

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Análisis del efecto de la forma y velocidad de los
discos parcialmente sumergidos de un aireador
en la rapidez de disolución de oxígeno a las
condiciones atmosféricas de Huancayo - 2022**

Hans Abner Naylamp Vásquez Meza

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

ASESOR

Mg. Ing. Steve Dann Camargo Hinostroza

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Divina Misericordia por brindarme su bendición y las fuerzas para nunca rendirme y seguir adelante. A mis abuelos, Marcelo e Isabel, que desde el cielo son mis luces que guían mi camino; a mi madre Gladys, por ser la fortaleza y el motivo de superación para conseguir mis objetivos.

Así también, manifestar mi más grande agradecimiento a toda mi familia, por su apoyo constante para conseguir mis metas.

De igual modo, agradezco a los docentes que guiaron mis pasos para la culminación de la carrera, en especial a mi asesor Mg. Steve Dann Camargo Hinostroza, por sus valiosas orientaciones para la culminación del presente trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Al padre celestial, a mi madre y familia, quienes cultivaron los valores necesarios para seguir adelante, por apoyarme en mi educación y en mi desarrollo personal.

ÍNDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Formulación del problema	3
1.1.2.1. Problema general	3
1.1.2.2. Problemas específicos	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Hipótesis y variables	5
1.4.1. Hipótesis de investigación	6
1.4.2. Hipótesis alterna	6
1.4.3. Operacionalización de las variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.1.1. Antecedentes internacionales	7

2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	9
2.1.3.	Antecedentes regionales y locales.....	10
2.2.	Bases teóricas	11
2.2.1.	Discos biológicos rotatorios	11
2.2.2.	Ventajas y desventajas del uso de biodiscos rotatorios	13
2.2.3.	Transferencia de oxígeno al agua.....	15
2.2.4.	Velocidad de transferencia de oxígeno	17
2.2.5.	Indicadores de desempeño de aireadores	18
2.3.	Definición de términos	19
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		21
3.1.	Método y alcance de la investigación	21
3.1.1.	Métodos de la investigación.....	21
3.1.1.1.	Método general	21
3.1.1.2.	Método específico	22
3.1.2.	Tipo de la investigación	22
3.1.3.	Nivel de la investigación	22
3.2.	Diseño de la investigación	23
3.3.	Población y muestra	24
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	25
3.4.1.	Técnicas e instrumentos.....	25
3.4.2.	Materiales.....	27
3.4.3.	Procedimientos.....	27
3.4.3.1.	Etapa de pre campo.....	27
3.4.3.2.	Etapa de campo	28
3.4.3.3.	Etapa de experimentación.....	28
3.4.3.4.	Etapa de gabinete	30
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		32
4.1.	Determinación de los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_{La}).....	32

4.1.1.	Mediciones experimentales	32
4.1.1.1.	Mediciones experimentales de discos con alabes	33
4.1.1.2.	Mediciones experimentales de discos lisos	34
4.1.2.	Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La})	36
4.1.2.1.	Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) de discos con alabes	36
4.1.2.2.	Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) de discos lisos..	38
4.2.	Relación matemática entre la velocidad de los discos y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La})	40
4.3.	Análisis factorial y prueba de hipótesis	41
4.4.	Discusión de resultados.....	47
CONCLUSIONES		48
RECOMENDACIONES		49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		50
ANEXOS		53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un RBC.	12
Figura 2. Películas líquida y gaseosa en la interfase agua-aire.	16
Figura 3. Diagrama del aparato de aireación.	17
Figura 4. Esquema del aireador de discos rotatorios.	25
Figura 5. Esquema de perfil y de planta del aparato de aireación con instrumentos.	26
Figura 6. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 30 RPM.	33
Figura 7. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 25 RPM.	33
Figura 8. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 20 RPM.	33
Figura 9. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 30 RPM.	34
Figura 10. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 25 RPM.	34
Figura 11. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 20 RPM.	35
Figura 12. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos con álabes con 30 RPM.	37
Figura 13. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos con álabes con 25 RPM.	37
Figura 14. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos con álabes con 20 RPM.	37
Figura 15. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 30 RPM.	38
Figura 16. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 25 RPM.	38
Figura 17. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 20 RPM.	38
Figura 18. Análisis de regresión cuadrática del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) y velocidad de giro.	40
Figura 19. Diagrama de Pareto.	43
Figura 20. Gráfico de efectos de los discos lisos y con alabes.	44

Figura 21. Interacciones de las medias de los discos con la velocidad.45
Figura 22. Probabilidad normal de coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}).....46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	6
Tabla 2. Porcentaje de remoción con biodiscos.	12
Tabla 3. Principales ventajas y desventajas del uso de biodiscos.....	13
Tabla 4. Niveles de las variables independientes.....	23
Tabla 5. Diseño experimental.	24
Tabla 6. Sustancias disueltas para preparar ARS.....	29
Tabla 7. Resultados del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) para cada réplica experimental.	39
Tabla 8. Ecuación cuadrática de la transferencia de oxígeno (K_{La}).	41
Tabla 9. Valores del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) de los discos (lisos y con alabes) a las velocidades (20, 25 y 30 RPM).	42
Tabla 10. Orden de los valores tomados aleatoriamente.	42
Tabla 11. Valores de la varianza.....	43

RESUMEN

Esta investigación se desarrolló con el objetivo de analizar el efecto de la forma y velocidad de los discos parcialmente sumergidos de un aireador, en la rapidez de disolución de oxígeno en agua residual sintética a las condiciones atmosféricas de Huancayo. Para este fin, se realizaron pruebas de aireación para oxigenar agua residual doméstica por lotes. El agua residual fue preparada de manera artificial con una mezcla de carbohidratos, proteínas y minerales, a una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 400 ppm. Para los ensayos de oxigenación, se implementó una unidad de aireación de discos parcialmente sumergidos. Se sometieron a prueba dos formas de discos, una con superficie lisa y otra con dos alabes en la superficie. Los niveles de velocidad giro a las que se ensayaron fueron de 20, 25 y 30 RPM. El número de discos por prueba fueron 04 unidades.

Durante los experimentos de aireación, se obtuvieron datos de concentración de oxígeno disuelto y temperatura del líquido. El indicador de la velocidad de disolución de oxígeno en el agua residual que se utilizó para evaluar el desempeño de los discos, fue el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}). De acuerdo con los resultados, se encontró que en promedio el máximo valor de K_{La} de los discos lisos fue de 0.0562 min^{-1} , mientras que para los discos con alabes fue de 0.1818 min^{-1} , en ambos casos a una velocidad de 30 RPM, de modo tal que la velocidad de disolución del oxígeno en el agua residual es mayor cuando se emplea discos con alabes. Con ambos discos, sucede que, cuando la velocidad de giro sufre un incremento, el valor de K_{La} aumenta. Finalmente, el efecto de los dos factores y su interacción sobre coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) es significativo a un nivel de confianza del 95 %.

Palabras claves: oxígeno disuelto, agua, residual, transferencia, disolución.

ABSTRACT

This research was developed with the objective of analyzing the effect of the shape and speed of the partially submerged discs of an aerator, on the rate of dissolution of oxygen in synthetic wastewater at the atmospheric conditions of Huancayo. For this purpose, aeration tests were carried out to oxygenate batch domestic wastewater. The wastewater was artificially prepared with a mixture of carbohydrates, proteins and minerals, at a Chemical Oxygen Demand (COD) of 400 ppm. For the oxygenation tests, a partially submerged disk aeration unit was implemented. Two disc shapes were tested, one with a smooth surface and one with two blades on the surface. The rotational speed levels at which they were tested were 20, 25 and 30 RPM. The number of disks per test was 04 units.

During the aeration experiments, data on dissolved oxygen concentration and liquid temperature were obtained. The indicator of the rate of oxygen dissolution in the wastewater that was used to evaluate the performance of the discs was the oxygen transfer coefficient (K_{La}). According to the results, it was found that, on average, the maximum K_{La} value of the smooth disks was 0.0562 min^{-1} , while for the bladed disks it was 0.1818 min^{-1} , in both cases at a speed of 30 RPM, so that the rate of dissolution of oxygen in the wastewater is higher when discs with blades are used. With both discs, it happens that, when the speed of rotation undergoes an increase, the value of K_{La} increases. Finally, the effect of the two factors and their interaction on the oxygen transfer coefficient (K_{La}) is significant at a confidence level of 95 %.

Keywords: dissolved oxygen, water, residual, transfer, dissolution.

INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales existen diversas maneras de llevarlos a cabo, así como tecnologías que es posible de aplicar. Estos se eligen según sea los casos que se tengan, como por ejemplo, el nivel de contaminación del agua y sus características físicas y químicas, la disponibilidad de energía, los factores ambientales, entre otros. Los dos grandes grupos que comúnmente se aplican son: el tratamiento aerobio y el tratamiento anaerobio. El primero, se basa en la utilización de microorganismos aerobios, pues, se les denomina así porque estos microorganismos requieren de oxígeno para respirar y con ello desarrollar sus funciones metabólicas.

El tratamiento aerobio es apropiado para aguas residuales con baja carga contaminante. El segundo grupo, se apoya en la utilización de microorganismos que realizan sus funciones metabólicas en ausencia de oxígeno y, principalmente, generan como subproducto gas metano. El tratamiento anaerobio es recomendado para aguas residuales con alta carga contaminante. Para llevar a cabo el tratamiento biológico, por cualquier método de tratamiento, previamente el agua se acondiciona, separa o libera de sustancias que puedan dificultar el proceso. En el caso del tratamiento aerobio, el agua se separa, en la máxima medida posible, de los sólidos, aceites y grasas. Esto, a raíz de que los microorganismos solo metabolizan la materia disuelta biodegradable. Por otro lado, con relación al oxígeno que el microorganismo requiere, este gas debe estar disuelto en el agua. Para tal efecto, se realiza la operación de aireación del agua con el fin de oxigenarlo, justamente esta investigación trata sobre dicha operación.

Resulta que la operación de aireación de aguas residuales es sencilla, pero demanda considerable cantidad de energía, a tal punto que de toda la inversión económica para llevar a cabo las operaciones dentro de una planta de tratamiento aerobio, más de la mitad se invierte en la aireación. Esta inversión dependerá de la tecnología que se utilice para la oxigenación, es decir, del desempeño, eficiencia y productividad que tienen los equipos aireadores en transferir oxígeno.

En la actualidad, se disponen de diversas tecnologías como aquellas que utilizan difusores de aire, aireadores mecánicos con ejes verticales, con ejes horizontales, de paletas, de efecto Venturi, y una combinación de estos que son denominados híbridos, sin embargo no todos tienen un mismo desempeño, además, su eficiencia en oxigenar se ve afectada por las condiciones climáticas del lugar donde se realiza la operación, forma de

detalles geométricos del aireador y las características del agua a oxigenar. A pesar de ser sencilla dicha operación, localmente existe poca información científica relacionada con estos aparatos de aireación. Por esta razón, en esta investigación, se hace un estudio que evalúa el desempeño de dos tipos de discos rotativos para oxigenar agua residual sintética, presentando todo lo que se encontró para este tema y se estructuró ordenadamente en capítulos.

En el Capítulo I se fundamenta el planteamiento del estudio, así como se presentan los objetivos de la investigación. En el Capítulo II se presentan los antecedentes nacionales e internacionales, así como las bases teóricas. En el Capítulo III se presenta la metodología que se estableció y se siguió a lo largo del estudio. En el Capítulo IV se muestran los datos y resultados que se obtuvieron con su correspondiente análisis. Finalmente, se declaran las conclusiones a las que se llegó.

El autor.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

El suministro de oxígeno disuelto a los microorganismos que se encargan de metabolizar contaminantes de aguas residuales, es muy importante durante el proceso de descontaminación biológica en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (1).

Este gas disuelto en el agua permite a los microorganismos aerobios, dentro de su proceso metabólico, realizar la respiración. Con ello, los microorganismos logran degradar la materia biodegradable disuelta, descontaminando el agua residual y, al formar paredes celulares (biomasa), dióxido de carbono y agua. La pared celular de los microorganismos es una sustancia sólida, ligeramente más pesada que el agua, característica que permite separarlo del agua mediante operaciones de sedimentación, decantación en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (2).

Para la oxigenación de aguas residuales por aireación, existen diversos sistemas o mecanismos que permiten la transferencia de oxígeno, disolviendo este gas en el líquido. La operación que se realiza para los mecanismos de aireación procura poner en contacto el aire atmosférico

con el agua, a fin de provocar la transferencia de masa y disolver el oxígeno. Para tal efecto, los elementos que componen los mecanismos de aireación requieren de energía en diversas formas, tales como para comprimir aire, hacer que se muevan elementos móviles o provocar otros efectos (3).

Dentro de la literatura especializada, se encuentra que los costos de consumo energético que demanda la oxigenación del agua por aireación en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es la más elevada de todas las demás operaciones. Tal es así que, entre el 45 % al 70 % de costo total de operación de la planta está destinado a cubrir el costo energético en la aireación (4).

Este aspecto, hace que las investigaciones en sistemas de aireación de aguas residuales, para mejorar la velocidad de transferencia, la eficiencia u otro parámetro de desempeño del sistema, sean interesantes pues con ello se contribuye a tener alternativas de elección para casos particulares en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Como se puede entender, la operación de la oxigenación de aguas residuales para llevar a cabo su proceso biológico de depuración aerobia es vital, pero la más costosa. En la ciudad de Huancayo, diariamente se vierten abundantes cantidades de aguas residuales sin previo tratamiento, principalmente a los ríos.

A la fecha, la ciudad de Huancayo no dispone de alguna planta donde se realice el tratamiento apropiado. Existen plantas de tratamiento en algunos distritos, que operan deficientemente, o en su defecto, que se encuentran inoperantes.

La razón que se refiere es por desconocimiento de la operación y también el elevado costo, sobre todo de la aireación en la etapa de depuración biológica. También a ello, se suma la poca información técnica disponible de las operaciones que se llevan a cabo en una planta de tratamiento aerobio a las condiciones de presión atmosférica y temperatura que imperan en esta localidad, así como de alternativas para la elección de dispositivos de aireación, con un consumo energético bajo.

Por todo ello, esta investigación se orienta a analizar la velocidad de transferencia de oxígeno, con la que dos tipos de discos rotativos de un sistema de aireación mecánico disuelven el oxígeno atmosférico al agua residual. Específicamente se investiga su dependencia con la forma y su velocidad rotacional de los discos. Esta evaluación se realizará a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo.

Esto contribuirá a disponer de una alternativa de un mecanismo de oxigenación que, de aplicarse en plantas de tratamiento en esta localidad, contribuiría positivamente en beneficio del medio ambiente que se ve bastante afectado.

De la literatura técnica se sabe que el proceso de transferencia de oxígeno del aire atmosférico al agua es afectado por la presión atmosférica, la temperatura, presencia de sólidos disueltos en el agua, la geometría o forma de los sistemas y elementos que se emplean en esta operación de oxigenación del agua.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto de la forma y velocidad de los discos parcialmente sumergidos de un aireador en la rapidez de disolución de oxígeno a las condiciones atmosféricas de Huancayo - 2022?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuánto será el coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$), que presenta el aireador con cada tipo de disco a diferentes velocidades de rotación?

- ¿Cuál es la relación que existe entre la velocidad de los discos y la rapidez del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La})?
- ¿Cuán significativo es el efecto de la forma y la velocidad que poseen los discos en el aireador, sobre la velocidad de disolución de oxígeno en agua por aireación?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la forma y velocidad de los discos parcialmente sumergidos de un aireador en la rapidez de disolución de oxígeno a las condiciones atmosféricas de Huancayo - 2022.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}), que presenta el aireador con cada tipo de disco a diferentes velocidades de rotación.
- Establecer la relación que existe entre la velocidad de los discos y la rapidez del coeficiente de transferencia de oxígeno.
- Evaluar la significancia de los efectos de la forma y la velocidad que poseen los discos en el aireador, sobre la velocidad de disolución de oxígeno en agua por aireación.

1.3. Justificación e importancia

Desde el punto de vista ambiental y económico, los elementos aireadores de aguas residuales son elementos importantes dentro del proceso de su tratamiento por el método aerobio, sin embargo, como se indicó en la contextualización del problema de esta investigación, los diversos elementos que existen para esta operación consumen cantidades significativas de energía, por lo cual son costosas.

En la ciudad de Huancayo, la realidad evidencia que diariamente se eliminan significativas cantidades de aguas residuales contaminando los ríos. El nulo tratamiento que reciben estas aguas es la razón por la cual en la provincia no existe una planta de tratamiento instalada, y si existen en algunos distritos, estas infraestructuras operan ineficientemente.

La explicación de esta situación es porque el proceso de tratamiento es bastante costoso, en especial la operación de oxigenación. Además de la dejadez de las autoridades, también está la falta de información técnica y especializada sobre los diferentes dispositivos y operaciones, con datos genuinos a las condiciones de esta localidad.

Por esta razón, se justifica el desarrollo de esta investigación, que busca obtener información sobre el desempeño de discos aireadores de agua residual, lo que constituirá una alternativa de elección para esta operación a estas condiciones.

Con ello se permitirá disponer de información técnica especializada que contribuirá a seleccionar alternativas para la disminución del impacto negativo al medio ambiente.

Por otro lado, desde el punto de vista social, las localidades, comunidades o centros poblados donde se aplique los resultados de esta investigación, en sistemas de tratamiento que puedan instalarse, permitirán que el proceso depurativo se desarrolle de manera más eficiente, beneficiando de este modo a los pobladores y usuarios del sistema de tratamiento y, con ello, mejorando su calidad de vida.

Finalmente, tecnológicamente, los dispositivos que se están proponiendo para investigar son discos aireadores que, según la información técnica, ofrecen más ventajas energéticamente y también ocupan poco espacio.

Es por esta razón que, con los resultados de esta investigación, se dispone de información y conocimiento sobre una alternativa tecnológica para la aireación de aguas residuales a las condiciones de atmosféricas de la localidad de Huancayo.

1.4. Hipótesis y variables

1.4.1. Hipótesis de investigación

H_0 : el efecto de la forma y la velocidad de los discos no influye de manera significativa en la disolución de oxígeno.

1.4.2. Hipótesis alterna

H_a : el efecto de la forma y la velocidad de los discos influye de manera significativa en la disolución de oxígeno.

1.4.3. Operacionalización de las variables

Tabla 1. Operacionalización de variables.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
DEPENDIENTES					
Coefficiente global de transferencia de oxígeno (K_{La})	Es un parámetro de desempeño de los aireadores, bastante relacionado con la velocidad con la que se transfiere el oxígeno del aire al agua (5).	El Coeficiente de transferencia (K _{La}) es el parámetro que indica cuán rápido o lento se realiza la transferencia de oxígeno. Se determinará mediante regresión lineal, con los datos experimentales de concentración de Oxígeno Disuelto (OD) y tiempo de aireación, empleando la teoría de la doble capa de Lewis y Whitman.	Velocidad de disolución de oxígeno atmosférico en agua mediante un aireador de discos rotativos.	Tasa de transferencia de oxígeno del aire al agua por aireación. Incremento de la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) por unidad de tiempo.	min ⁻¹
INDEPENDIENTES					
Velocidad de rotación	Es la velocidad con la que giran los discos en el aireador, durante la operación de aireación de agua (6).	Se medirá mediante el conteo directo del número de vueltas con que giran los discos por unidad de tiempo durante la operación de aireación.	Velocidad de giro de los discos.	Número de revoluciones por minuto	RPM
Forma de los discos	Se refiere a la cualidad de la superficie que poseen los discos del aireador (7).	Se determinará por observación directa de la superficie de los discos.	Formas geométricas de la superficie de los discos.	Aspecto de la superficie de los discos.	Lisa o deforme

Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Surampalli y Baumann (8) publicaron el artículo titulado “*Sludge production in rotating biological contactors with supplemental aeration and an enlarged first stage*”. El objetivo de su investigación fue estudiar la efectividad que ejerce la aireación suplementaria y una primera etapa ampliada para mejorar el rendimiento de un contactor biológico rotatorio (RBC). Los materiales y métodos que emplearon fue un RBC en una planta a gran escala, donde ingresa continuamente una mezcla de agua residual doméstica y una cantidad insignificante de agua residual industrial. La planta tiene dos trenes paralelos de cuatro etapas cada una, una primera etapa ampliada. El nivel de oxigenación que alcanzaron con el aire suplementario se situó entre 4 a 5 ppm de Oxígeno Disuelto (OD) al final de la etapa, mientras que, sin aire suplementario, entre 0.5 a 1.0 ppm. De sus experimentos, obtuvieron resultados que, en general, la producción de lodos fue mayor en la primera etapa debido a la mayor tasa de eliminación de DQO soluble (SCOD), sin embargo, la producción de lodos en la primera etapa fue significativamente mayor en presencia de aire suplementario que sin el aire. Además, con suplemento aire hubo una estabilización creciente de los sólidos volátiles en las etapas posteriores cuando el sustrato fue

limitando. Finalmente, concluyeron que el rendimiento total de RBC que recibió aireación suplementaria fue significativamente mejor en comparación con el RBC que no recibió aire suplementario tanto en términos de eliminación de DQO soluble o DBO soluble y nitrificación de amoníaco.

Quintero *et al.* (9) desarrollaron el artículo titulado “Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (Rotating Biological Contactor) para tanque primario de aguas residuales no domésticas provenientes de una industria de bebidas no alcohólicas”. La finalidad que tuvieron fue evaluar a escala de laboratorio un sistema RBC, para aguas residuales de la industria de bebidas no alcohólicas, que permita reducir la tasa de generación de lodos residuales en un tren de tratamiento, a través de oxidación y degradación de compuestos presentes en el agua. Para ello, los materiales y métodos que utilizaron fueron: un RBC a escala de laboratorio que disponía de 4 etapas y en cada etapa se dispusieron 7 discos. Los discos fueron de 23 cm de diámetro, separados a 1 cm de distancia entre ellos y a 7 cm entre etapas. Cada etapa poseía una capacidad de 5.325 L. La velocidad de rotación a la cual llevaron a cabo sus experimentos fue a 40 RPM. También, realizaron una caracterización bioquímica del afluente proveniente de la industria de bebidas no alcohólicas, así como la selección y bioproducción de microorganismos asilados del agua residual, así como determinaron los parámetros hidráulicos para funcionamiento óptimo del sistema. Con los resultados que observaron, llegaron a la conclusión que el sistema de 4 etapas propuesto es eficiente cuando opera con tiempos de retención altas y presentó porcentajes de remoción de DQO y DBO₅ mayores al 80 % en cada etapa.

Kubsad *et al.* (10) llevaron a cabo la investigación titulada “*Model for oxygen transfer in rotating biological contactor*”. El objetivo que persiguieron fue desarrollar el estudio del fenómeno físico de la transferencia de oxígeno del aire al agua mediante un contactor de disco giratorio, mediante un modelo matemático sugerido y modificado por Kim y Molof. Este modelo fue ajustado con datos disponibles en la literatura. La metodología y materiales que emplearon para tal fin se basó en validar el

modelo mediante datos experimentales de la aireación de agua en un RBC de un volumen total de 24 L divididos en tres etapas de volúmenes iguales. En cada etapa dispusieron 14 discos de 23 cm sobre un eje horizontal. Los discos fueron de material plástico polietileno de alta densidad, y fueron sumergidos 35 % con una velocidad de giro de 5.3 RPM. En los experimentos que desarrollaron para determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}), utilizaron discos limpios, libres de biomasa. La desoxigenación del agua lo realizaron burbujeando nitrógeno, lo cual les permitió disminuir el oxígeno disuelto hasta 0.15 mg/L. En el modelo de Kim y Molof, integraron el efecto de otros parámetros físicos significativos mediante un único término que lo denominaron número de renovación de volumen. Con los resultados a diferentes números de renovación, compararon con otros modelos. La conclusión a que arribaron fue que ambos modelos modificados de Kim y Molof y el lineal simplificado entre coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) y el número de renovación de volumen estiman con precisión con el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Vásquez (6) desarrolló el estudio titulado “Efecto de la velocidad rotacional en reactor biodiscos sobre la remoción de la materia orgánica en el agua residual doméstica de campamento minero La Libertad - Perú”. El objetivo que persiguió fue de evaluar el efecto de la velocidad rotacional de un reactor de biodiscos en la remoción de la materia orgánica de las aguas residuales domésticas en un campamento minero de la región de La Libertad. El autor manifiesta que los reactores de biodiscos logran la degradación de la materia orgánica y nutrientes al mismo tiempo, obteniendo así una elevada eficiencia de remoción. Para tal fin los materiales y métodos que empleó fue el agua residual doméstica captada de tres campamentos mineros de la región de la Libertad. Estas aguas fueron sometidas a un proceso de depuración en una planta de tratamiento de tecnología biodiscos. También, empleó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones y experimentó con 4 velocidades rotacionales de 1,

2, 3 y 4 RPM para permitir la aireación de las aguas. Los resultados no fueron los esperados, pese a ello, la velocidad rotacional de 3 RPM mostró resultados mucho más favorables donde se visualizó la remoción de materia orgánica hasta un 94.95 %, llegando así a la conclusión que la velocidad rotacional es un factor clave que influye en el rendimiento del reactor de biodiscos, con ello obtener una buena calidad del efluente.

2.1.3. Antecedentes regionales y locales

Bullón (11) en su tesis titulada “Modelamiento de la oxigenación de agua residual sintética con un aireador rotativo circular”, indica que la finalidad de la investigación fue evaluar el error que comete un modelo matemático que permite predecir la concentración de oxígeno disuelto en agua residual sintética, con aireadores rotativos circulares. Las pruebas de oxigenación fueron realizadas a las condiciones ambientales de Huancayo. El modelo matemático que utilizó resultó del balance de masas de oxígeno durante la transferencia del aire atmosférico al agua residual sintética, que fue un volumen fijo contenido en el recipiente del aireador. En el modelo aplicó la teoría de la doble capa, así como relaciones mecanicistas para el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) y la concentración de saturación. En las pruebas modificó la Demanda Química de Oxígeno disuelto (DQO) del agua residual sintética y el tipo de disco. Con ello obtuvo valores experimentales del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) para cada caso experimental. Estos valores fueron comparados con los obtenidos con el modelo matemático. Con sus resultados, logró demostrar que el error que comete el modelo no se ve afectado por la DQO del agua y tampoco por el tipo de disco. El máximo error que comete el modelo evaluado fue de ± 0.086 mg/L.

Avellaneda (12) desarrolló la tesis titulada “Evaluación de un modelo mecanicista para la aireación de agua residual con difusor de burbuja fina”. El objetivo que tuvo fue evaluar la variación del error de estimación de un modelo matemático, al variar la profundidad de sumergencia de un difusor de burbuja fina y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua. Para ello, utilizó un modelo matemático que inserta relaciones mecanicistas, de

la solubilidad de oxígeno disuelto en agua y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) en la ecuación de la teoría de Lewis y Whitman para la transferencia de oxígeno gaseoso al agua. Realizó experimentos de oxigenación en un recipiente provisto con un difusor de burbuja fina, la que fue instalado a profundidades, respecto del nivel de líquido a 35 cm, 70 cm y 105 cm. Utilizó agua potable y agua residual sintética para sus pruebas. Con los resultados que observó, encontró una diferencia máxima, entre el resultado del modelo y el experimental, de 0.229 ppm, y una mínima de 0.101 ppm. Finalmente, llegó a la conclusión que el error no es afectado significativamente por la profundidad de sumergencia y tampoco por el tipo de agua que empleó.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Discos biológicos rotatorios

Un contactor biológico rotatorio (en adelante RBC, de significado Rotating Biological Contactor), es una de las tecnologías disponibles para tratamiento de aguas residuales, en la cual, mediante procesos de bioaumentación, los microorganismos presentes en el agua se fijan a unos discos rotativos parcialmente sumergidos y paralelos entre sí, formando una biopelícula, alcanzado una adhesión sobre su superficie. Los discos se denominan comúnmente discos biológicos rotatorios.

Los RBC permiten, dentro de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, desarrollar la biodegradación de sustancias contaminantes mediante los microorganismos aerobios. De este modo, son empleados en el tratamiento secundario o biológico para la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y también para el pulido de efluentes nitrificados. En el caso de la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno este sistema puede alcanzar del 80 - 95 % de remoción; este parámetro depende primordialmente del tipo de agua residual a tratar (13).

Tabla 2. Porcentaje de remoción con biodiscos.

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	88
DQO	90
SST	92

Fuente: Huartos (14).

Los principales elementos que componen un RBC son: los discos, donde se adhiere la película microbiana, el recipiente donde se deposita el agua a tratar, el eje donde se fijan los discos y el motor de fuerza para la impulsión del eje y los discos. Un esquema básico es del siguiente modo (figura 1).

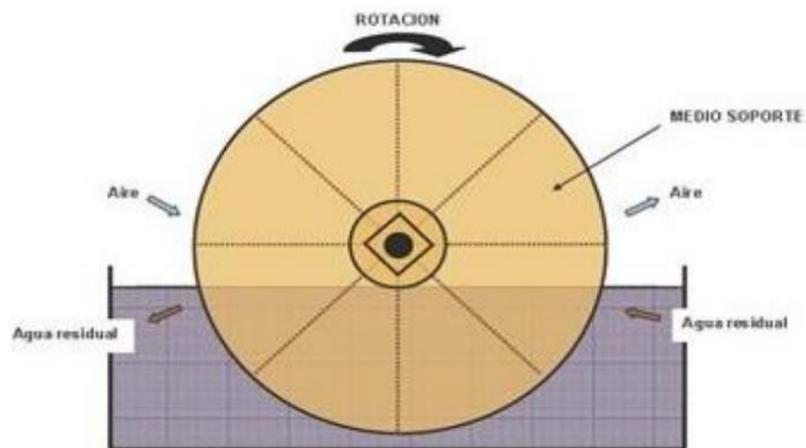


Figura 1. Esquema de un RBC.

Fuente: Von Sperling (15).

Los discos giran alrededor de un eje central, con una fracción del área sumergida y la otra fracción expuesta al aire, alternándose según la velocidad de rotación. Para mayor rendimiento recomienda sumergir el disco entre un 35 y 40 % del área superficial (15).

Los microorganismos que se encuentran en el agua residual inicialmente se fijan, para luego multiplicarse sobre la superficie del disco; esta película biológica tiene entre 2 y 4 milímetros de espesor (16).

Una descripción de la operación de aireación de agua en estos sistemas es del modo siguiente: cuando los discos giran, parcialmente sumergidos, generan una capa de líquido que se deposita sobre la superficie de los discos. Si sobre los discos se encuentra una película microbiana, el líquido se depositará sobre éste. En la película de líquido que entra en contacto con el aire, se dará la transferencia de oxígeno atmosférico, disolviéndose.

Cuando esta película oxigenada retorna y se mezcla con el volumen total de agua que se encuentra en el recipiente, la concentración de oxígeno disuelto del líquido en el recipiente irá incrementando. El fenómeno de transferencia de oxígeno, que se manifiesta en la capa de líquido sobre los discos en movimiento, se describe bastante bien con la teoría de la doble capa o película.

“El aumento de la velocidad de rotación de los discos incrementa la concentración de oxígeno disuelto disponible para los microorganismos y como resultado, contarán con mejores condiciones para degradar el sustrato en medio aerobio” (17), pero, cuando la velocidad aumenta, exige mayor consumo de potencia, generando un impacto negativo en la economía del proceso. Otra desventaja que se podría generar con el aumento de la velocidad es el desprendimiento excesivo de la biomasa soportada en el biodiscos.

2.2.2. Ventajas y desventajas del uso de biodiscos rotatorios

En la siguiente tabla se presentan las ventajas y desventajas de usar biodiscos rotatorio.

Tabla 3. *Principales ventajas y desventajas del uso de biodiscos.*

Ventajas	Desventajas
Este sistema de tratamiento es a alta tasa, esto se debe a la densidad de la biomasa que logra mantenerse en la superficie del soporte.	Los cojinetes y unidades de impulsión requieren mantenimiento en corto plazo.

Se pueden lograr altos niveles de remoción, con tiempos de retención relativamente cortos.

Se debe tener mayor atención en el diseño del eje, ya que por lo general presentan fallas estructurales o funcionales como pérdida de capacidad de soporte o grandes deformaciones.

En comparación con los otros sistemas de tratamiento requiere menos espacio para tratar los mismos volúmenes de agua.

Requiere energía externa para su funcionamiento.

Este sistema de tratamiento está especialmente adaptado para tratar el agua residual de poblaciones pequeñas, sin embargo, también se puede aplicar para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Los costos de inversión inicial son relativamente altos, como consecuencia de la compra de equipos mecánicos.

Posee gran capacidad para asimilar sobre cargas orgánicas e hidráulicas.

Tiene bajos requerimientos de energía.

Es autorregulable, porque la biomasa que se encuentra adherida al disco se desprende al alcanzar un cierto espesor, impidiendo que este aumente en forma indefinida.

El contacto entre la partícula biológica y el agua residual es total, a comparación de otros sistemas que es de forma parcial.

Generalmente no requiere recirculación, sin embargo, se podría incluir cuando existen altas cargas orgánicas.

No presenta malos olores, por tratarse de un sistema aeróbico.

Este sistema puede asimilar cargas de materiales tóxicos, debido a los tiempos de retención relativamente cortos.

Fácil operación, limpieza y mantenimiento del sistema.

Fuente: cotejo propio.

2.2.3. Transferencia de oxígeno al agua

La transferencia de oxígeno al agua residual es una operación que puede realizarse de distintos modos y también empleando diferentes equipos o aparatos. Todos ellos comparten un mismo principio, el de poner en contacto físico el gas con el agua residual. Respecto a la procedencia del gas oxígeno, puede ser alta pureza (es decir, de balones de oxígeno) o el oxígeno del aire atmosférico. Este último, el aire atmosférico, es el que más ventajas ofrece técnica y económicamente.

Un aspecto muy importante que tomar en consideración, cuando se selecciona los aparatos, o tal vez se diseñan nuevas formas de los aparatos o sistemas de aireación, es la demanda de energía que tiene cada uno. En general, los investigadores en estos temas de tratamiento aerobio de aguas residuales coinciden en que la operación de aireación de aguas es costosa. En relación a este tema, se puede mencionar a quienes indican: “en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), el mayor consumo energético es el asociado al sistema de aireación del tratamiento biológico” (4). Además, se menciona que: “los costes de aireación en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) convencional suponen entre el 45 y el 75 % de los costes energéticos totales de la EDAR” (18).

También cabe mencionar a quienes manifiestan que, al realizar un análisis energético en una planta de tratamiento de aguas residuales, se demuestra que siempre hay posibilidad para el ahorro energético en alguna etapa dentro del proceso. Con todo lo mencionado, los expertos coinciden en que los estudios relacionados a los aparatos de aireación de aguas residuales, para mejorar su eficiencia y disminución del consumo energético sean importantes e interesantes, ya que aportan con alternativas a disminuir la demanda de energía, lo que supone la disminución de los costos de operación de la planta de tratamiento (19).

Al establecer el contacto físico entre el gas oxígeno y el agua, la transferencia de oxígeno al agua, se describe de manera apropiada, mediante la teoría de las dos películas que propusieron (20).

Según esta teoría, hay una película gaseosa y una película líquida en la interfase líquido gas (agua - aire), a través de las cuales el oxígeno se transporta desde el aire al agua. En la película gaseosa, según los resultados de los ensayos que llevaron a cabo los investigadores antes mencionados, para el oxígeno - agua, la gradiente de presión parcial de oxígeno es insignificante. En la película líquida, existe una gradiente de concentración de oxígeno disuelto y el transporte de oxígeno se da por difusión. De esto se entiende que el oxígeno, en su proceso de transferencia, solo debe vencer la dificultad que ofrece la película líquida mas no de la película gaseosa.

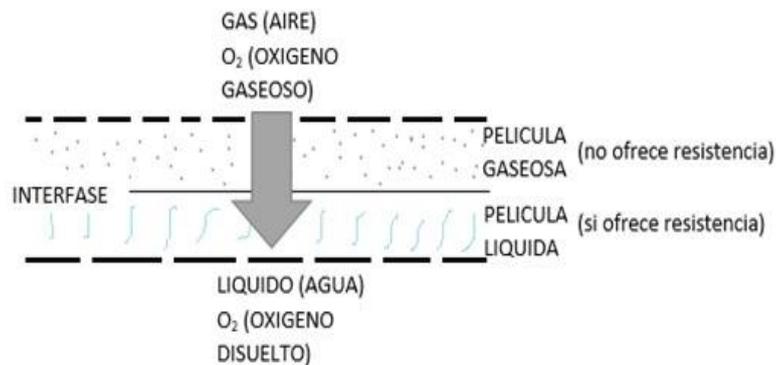


Figura 2. Películas líquida y gaseosa en la interfase agua-aire.

Fuente: cotejo propio.

La velocidad con la que se transfiere el oxígeno al agua, de acuerdo con este mecanismo de la doble película es:

$$R_{Ox} = (K_L a)_T (C_{sat} - C_{Ox,L}) \quad (1)$$

Donde:

- R_{Ox} , es la velocidad de transferencia de oxígeno por unidad de volumen. Es decir, masa de oxígeno que se transfiere por unidad de tiempo y unidad de volumen (mg O₂ transferido/min*L).
- $(K_L a)_T$, es el coeficiente de transferencia de oxígeno volumétrico (min⁻¹) a la temperatura T.
- C_{sat} , es la concentración de saturación del oxígeno disuelto (mg/L).
- $C_{Ox,L}$, es la concentración de oxígeno disuelto en el líquido.

El coeficiente de transferencia de oxígeno volumétrico $(K_L a)_T$ es muy importante para dimensionar sistemas de aireación. También, para el cálculo de la eficiencia del sistema. Este parámetro es afectado por las condiciones de operación del aireador, como la presión atmosférica, temperatura, intensidad de agitación, forma geométrica, dimensiones de los elementos aireadores y las características físicas del agua residual. Dada la cantidad de factores que lo afectan, resulta complicado determinarlo con bastante precisión.

En la literatura relacionada a este tema, se encontró varios métodos para la determinación de este coeficiente. Los métodos usuales son mediante el análisis de datos de ensayos de aireación de aguas, en estado no estacionario o, aireación en estado estacionario (21).

2.2.4. Velocidad de transferencia de oxígeno

Durante la aireación del agua, cuando los discos giran, la transferencia de oxígeno se manifiesta y, con ello, la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) del agua en el recipiente del aireador va en aumento. Realizando un balance de masa para el OD en el líquido del recipiente, se tiene:

$$\text{masa de O}_2 \text{ acumulado} = \text{masa de O}_2 \text{ transferido}$$

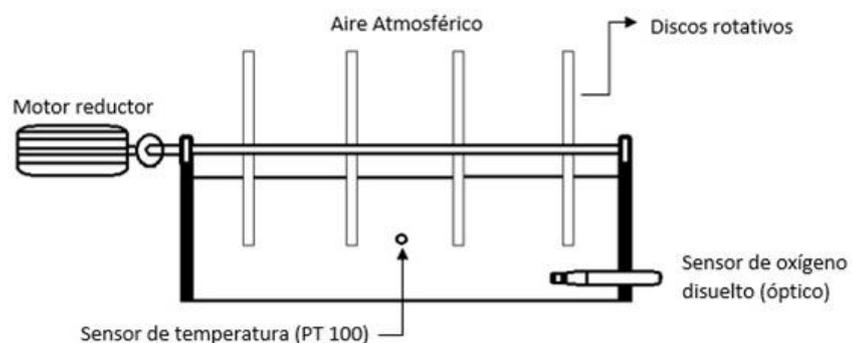


Figura 3. Diagrama del aparato de aireación.

Fuente: cotejo propio.

De acuerdo con este balance, y aplicando la ecuación de la velocidad de transferencia de masa de la teoría de la doble capa, se genera la ecuación diferencial que describe el desarrollo de la concentración de OD en el agua contenida en el recipiente (C_{OD}), expresado de la siguiente manera:

$$\frac{dC_{OD}}{dt} = K_L a_T (C_{sat} - C_{OD}) \quad (2)$$

Desarrollando la ecuación diferencial, se obtiene:

$$\ln(C_{sat} - C_{ox,L}) = -(K_L a)_T t + \ln(C_{sat} - C_{ox,L,0}) \quad (3)$$

Esta ecuación se utiliza juntamente con los datos de concentración de oxígeno disuelto en el tiempo adecuados de manera gráfica. La pendiente de la recta es el coeficiente de transferencia de oxígeno:

$$K_L a_T = \frac{\ln(C_{sat} - C_{OD, inicial}) - \ln(C_{sat} - C_{OD})}{t} \quad (4)$$

De acuerdo con esta ecuación, $K_L a_T$ se puede obtener de la pendiente de la ecuación lineal obtenido por regresión de los datos graficados de $\ln(C_{sat} - C_{OD})$ versus el tiempo.

2.2.5. Indicadores de desempeño de aireadores

Los indicadores de los sistemas de aireación, empleados para describir su desempeño en el tratamiento biológico de aguas residuales, están basados comúnmente en el estándar de requerimiento de oxígeno (SOR) y la razón de transferencia de oxígeno estándar (SOTR); las condiciones estándar son importantes, dado que estas incluyen el uso de agua limpia y separa las variaciones que ocasionan los contaminantes de aguas sucias o residuales, sobre su rendimiento (22).

Además de estos indicadores, la American Society of Civil Engineers (ASCE) (5) presenta otros indicadores como: la velocidad de transferencia de oxígeno (OTR), Eficiencia de aireación (AE), eficiencia de aireación estándar (SAE), eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE) y eficiencia de transferencia de oxígeno estándar (SOTE).

Las pruebas de los equipos de aireación, para determinar los indicadores de desempeño, se realizan con propósitos técnicos y/o comerciales, cuyos resultados se debe tomar mucha precaución, tanto en la fase de diseño o en la puesta en servicio de la unidad de aireación, en la interpretación y comprensión de la capacidad de transferencia de oxígeno. Pues, si con las pruebas y cálculos se sobreestima el rendimiento o la capacidad del sistema de aireación, eso puede conducir a inversión de capital y costos operativos excesivos.

En la literatura técnica en relación con las pruebas estándares para la determinación de los indicadores de desempeño, se resumen del siguiente modo:

- Preparación del agua almacenarlo en tanques apropiados por un periodo de tiempo sin permitir que se oxigene.
- Eliminación del oxígeno disuelto mediante la adición de sustancias químicas o extracción con gas.
- Registro de las curvas de concentración de oxígeno disuelto con el tiempo, durante la aireación hasta su saturación.
- Ajuste de los datos experimentales con el modelo matemático para determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La). Los que después se corrigen a las condiciones de presión, temperatura y efectos de la salinidad para obtener valores globales y representativos.
- Finalmente, con los valores del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) se calcula el o los indicadores de desempeño para su interpretación y análisis.

2.3. Definición de términos

- Coeficiente de transferencia de oxígeno: “es el factor de proporcionalidad que se encuentra en la ecuación matemática de la teoría de la doble película y está relacionada con la velocidad de transferencia de oxígeno a ciertas condiciones de operación de un sistema de aireación”.

- Discos Biológicos Rotativos: “son discos que sobre sus superficies están adheridas una película de microorganismos, y se encuentran sumergidas parcialmente dentro en aguas residuales, donde giran en conjunto a una velocidad para oxigenar el agua residual en tratamiento” (10).
- Solubilidad del oxígeno en agua: “es la máxima concentración a la que se encuentra disuelto el oxígeno en el agua, a una determinada temperatura y presión atmosférica”.
- Transferencia de oxígeno: “es el proceso mediante el cual se disuelve oxígeno, que se encuentra en fase gaseosa del aire atmosférico, al agua que se encuentra en fase líquida” (23).
- Velocidad de transferencia de oxígeno: “es la masa de oxígeno por unidad de tiempo, con la que se disuelve en un volumen de agua, mediante la transferencia por un sistema operando bajo condiciones de temperatura, presión barométrica, potencia, flujo de gas, y concentración de oxígeno disuelto” (5).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Métodos de la investigación

3.1.1.1. Método general

El método general que se adoptó en esta investigación fue el método científico. Este método está basado en una secuencia lógica de etapas, que fueron llevadas a cabo de manera secuencial e inició con la detección y planteamiento del problema científico; seguidamente, se colectó y evaluó la información especializada disponible, para tras ello establecer la hipótesis. Luego, con el fin de demostrar esta hipótesis, se realizaron pruebas experimentales con los discos de aireación parcialmente sumergidas en agua residual sintética (ARS). Las variables que se manipularon en las pruebas fueron: forma del disco y su velocidad de rotación.

Según se encuentra en la bibliografía, un método es un modelo de procedimiento que se establece y se sigue para alcanzar un fin, en este caso un conocimiento. Además, según Tamayo (24) “la investigación científica es sistemática, controlada, empírica y crítica, de proposiciones hipotéticas sobre las supuestas

relaciones que existen entre fenómenos naturales”. De otro modo, de acuerdo con el modo como se obtiene el conocimiento, el método que se aplicó correspondería al método hipotético deductivo, pues partió de una hipótesis o explicación tentativa que luego fue comprobada experimentalmente.

3.1.1.2. Método específico

El método específico aplicado, acorde al método general hipotético deductivo, fue el método experimental, esto a razón de que, como se indicó, se manipularon intencionalmente dos variables que fueron forma y velocidad de rotación de los discos, con ello, lo que se buscó fue observar el efecto en la velocidad de oxigenación del agua residual sintética (25).

3.1.2. Tipo de la investigación

De acuerdo con el propósito que se tuvo, el tipo de investigación fue aplicada, pues en todo su desarrollo se aplicaron conocimientos fundamentales, procedentes de investigaciones básicas, para solucionar de manera práctica el problema de investigación formulado. Según Hernández-Sampieri *et al.* (25), a este tipo de investigación se le designa también como investigación práctica y está orientada a resolver problemas, mas no al desarrollo de teorías, para lo cual emplea conocimientos básicos.

3.1.3. Nivel de la investigación

De acuerdo con el nivel de conocimiento que se logró alcanzar, el nivel de investigación que correspondió fue el explicativo, es decir, además de describir y comprender el fenómeno de aireación de agua residual con los discos parcialmente sumergidos, se estableció la relación entre las variables manipuladas y observada, así como la explicación de las causas

del efecto de la forma y velocidad de los discos parcialmente sumergidos, sobre la velocidad de oxigenación. Según Cabezas *et al.* (26), “los estudios explicativos no finalizan en la descripción de características, fenómenos o de establecer relaciones entre conceptos, los estudios explicativos están llamados a responder a las causas de los eventos, sucesos y fenómenos físicos o sociales”.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño experimental factorial fue la estrategia que se estableció y se desarrolló para la recabar los datos pertinentes y de interés, a fin de realizar con ellos el análisis y evaluación que permitieron verificar la hipótesis formulada. Se sabe que los diseños experimentales están orientados a la manipulación variables, denominados independientes, con el objetivo de observar los efectos o el comportamiento que se da sobre variables dependientes (25). La manipulación se realizó de manera intencional y controlada. En esta investigación, como se indicó, las variables independientes que se manipularon fueron dos: la forma que poseen los discos y la velocidad rotacional de los mismos (21). La variable independiente donde se observó el efecto fue el coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$). Los niveles de las variables independientes se muestran en la tabla 4, por lo que el diseño factorial fue 3 x 2 (21).

Tabla 4. *Niveles de las variables independientes.*

Variables independientes	Número de niveles	Valor de niveles
Velocidad de rotación (a)	3	20 RPM
		25 RPM
		30 RPM
Forma de los discos (b)	2	Liso
		Con alabes

Fuente: elaboración propia.

Las combinaciones que se establecieron con cada uno de estos niveles, como parte del diseño factorial y de acuerdo a como fue realizado los experimentos, se muestran en la tabla 5. También se muestra el esquema para el registro de las observaciones del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}), con sus réplicas respectivas en cada combinación.

Tabla 5. *Diseño experimental.*

VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLE DEPENDIENTE		
VELOCIDAD DE ROTACION (a, RPM)	FORMA DE LOS DISCOS (b)	Coeficiente de transferencia de oxígeno K_{La} (min^{-1})		
		RÉPLICA I	RÉPLICA II	RÉPLICA III
20	LISO	$K_{La(20, \text{LISO}, \text{I})}$	$K_{La(20, \text{LISO}, \text{II})}$	$K_{La(20, \text{LISO}, \text{III})}$
25	LISO	$K_{La(25, \text{LISO}, \text{I})}$	$K_{La(25, \text{LISO}, \text{II})}$	$K_{La(25, \text{LISO}, \text{III})}$
30	LISO	$K_{La(30, \text{LISO}, \text{I})}$	$K_{La(30, \text{LISO}, \text{II})}$	$K_{La(30, \text{LISO}, \text{III})}$
20	CON ALABES (c/a)	$K_{La(20, \text{c/a}, \text{I})}$	$K_{La(20, \text{c/a}, \text{II})}$	$K_{La(20, \text{c/a}, \text{III})}$
25	CON ALABES (c/a)	$K_{La(25, \text{c/a}, \text{I})}$	$K_{La(25, \text{c/a}, \text{II})}$	$K_{La(25, \text{c/a}, \text{III})}$
30	CON ALABES (c/a)	$K_{La(30, \text{c/a}, \text{I})}$	$K_{La(30, \text{c/a}, \text{II})}$	$K_{La(30, \text{c/a}, \text{III})}$

Fuente: elaboración propia.

3.3. Población y muestra

La unidad de análisis, los casos o elementos de quienes se obtendrán datos para esta investigación, según el problema formulado, fue el grupo de aireadores de discos rotatorios lisos o con alabes, parcialmente sumergidos en agua residual sintética. Con esta unidad de análisis, la población comprende a todos los aireadores con discos rotativos lisos o con alabes, acondicionado a la oxigenación de agua residual sintética (desoxigenado previamente con bisulfito de sodio en presencia de cloruro de cobalto), a las condiciones medioambientales de Huancayo. El esquema del aireador y los discos que estuvieron parcialmente sumergidos en el ARS se presenta a continuación.

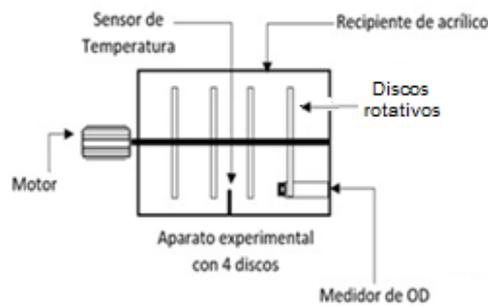


Figura 4. Esquema del aireador de discos rotatorios.

Fuente: cotejo propio.

Por otro lado, la muestra, que es un subgrupo representativo de la población, estuvo constituido por 09 aparatos adaptados con discos lisos y 09 aparatos con discos alabeados. Esto, a razón del diseño de la investigación, se realizaron 18 ensayos experimentales. En cada unidad de análisis se emplearon 14 L de ARS, haciendo un total de 252 L.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas e instrumentos

Para la recolección de los datos de los experimentos, se recurrió a ensayos de oxigenación de aguas residuales de origen sintético y la técnica que se empleó para llevar a cabo estas pruebas de oxigenación por aireación se basó en las normas estándares de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (5).

La unidad o aparato que permitió realizar los ensayos se adaptó apropiadamente para que los discos puedan sumergirse parcialmente en el agua residual sintética y también para que giren a las velocidades establecidas según el diseño experimental. El esquema del aparato es el siguiente.

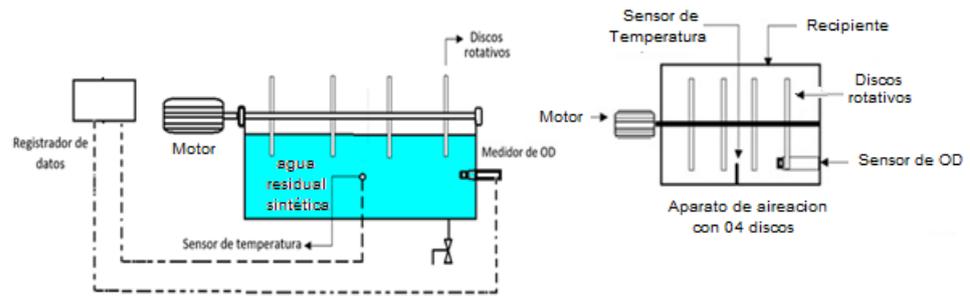


Figura 5. Esquema de perfil y de planta del aparato de aireación con instrumentos.

Fuente: cotejo propio.

De acuerdo con este esquema, los principales componentes del aparato son:

El recipiente que contiene el agua residual sintética fue hecho de un material de acrílico transparente, el cual fue un polímero termoplástico. La capacidad que posee fue de 14 L de líquido. Además, posee soportes y orificios para la instalación de sensores de temperatura y Oxígeno Disuelto (OD), así como una válvula de purga en la parte inferior.

El motor eléctrico fue el componente que impulsó a los discos a girar. Para tal efecto, se sujetó a un eje (diámetro de 1.6 cm) sobre el cual se encuentran fijados los discos. El motor fue asíncrono y funcionó con corriente trifásica de 220 V, además tuvo una potencia de 373 W.

Los discos fueron fabricados de policloruro de vinilo (PVC). También se empleó un material polimérico termoplástico. Las dimensiones del diámetro y el espesor fue 25 cm y 0.3 cm respectivamente. El sensor de temperatura es un dispositivo de medida por el principio de variación de la resistencia de hilo de platino. El rango de medida que posee es de - 200°C a 800°C.

El sensor de Oxígeno Disuelto (OD) tuvo un rango de medición de 0 a 20 mg/L; funcionó mediante el fenómeno óptico de fluorescencia por la presencia de OD en agua. Finalmente, el registrador de datos con indicador incorporado fue el componente que tenía la función de registrar las mediciones que se midieron con los sensores durante los experimentos.

3.4.2. Materiales

- 01 un aparato para ensayos, adaptado con 04 discos rotativos para aireación de aguas y sensores de medición según la figura anterior.
- 01 balanza de precisión.
- 02 vaso de precipitado de 250 ml.
- 01 recipiente plástico de 20 L.
- Agua residual sintética.
- Agua potable.

3.4.3. Procedimientos

3.4.3.1. Etapa de pre campo

Las actividades preliminares que se realizaron consistieron en una planificación, a fin de proveer todo lo necesario para llevar a cabo los experimentos. Estos fueron:

- El análisis y selección de la carga contaminante que debe poseer las muestras de ARS. En este caso se considerando que, serían muestras semejantes a las típicas aguas residuales domésticas y que previamente fueron acondicionadas en un tratamiento primario dentro de una PTAR, expedito para el tratamiento biológico.
- La elección de las dimensiones y detalles técnicos del aparato para las experiencias de aireación. También, se definió el circuito de conexión de los componentes eléctricos y piezas mecánicas.
- La selección de los materiales de los discos, recipientes y sensores. Para esto se tomó en consideración los factores: disponibilidad en el mercado especializado, las características de agresividad corrosiva del agua residual sintética y las ventajas que ofrecen los componentes para la instalación.

3.4.3.2. Etapa de campo

Realizada la planificación, en esta parte se ejecutó la implementación del aparato experimental, para ello:

- Se envió a construir el recipiente, los discos el eje y soportes al taller especializado, según el dimensionamiento y materiales definidos (indicados anteriormente). En esta parte también se supervisó y verificó, que las características de los componentes construidos cumplieran con lo establecido en la planificación.
- Luego, con todos los componentes construidos del aparato, se procedió a armar y fijar cada pieza en su respectivo lugar. También se instalaron los sensores en los lugares previstos del aparato. Se culminó esta parte, con la instalación eléctrica del motor, los sensores y el registrador e indicador de datos. Este último, se configuró para que detecte los dos sensores y para el tiempo en que debe registrar los datos que envían cada sensor.
- Finalmente, en relación con el aparato experimental, se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento de todos los componentes, así como la regulación de las velocidades de giro del eje y los discos, a las que se llevaron a cabo los experimentos. Estas pruebas de verificación se realizaron sin carga (sin agua en el recipiente) y otra con carga (con agua en el recipiente). El conteo del número de revoluciones se realizó visualmente, con la ayuda de una marca en los discos y eje, pues las bajas velocidades lo permitían.

3.4.3.3. Etapa de experimentación

Instalado y expedito el aparato experimental, se procedió a desarrollar las experiencias de aireación de ARS. Para cada ensayo, según el diseño experimental, se realizaron dos

actividades: a) la preparación del ARS y b) el experimento de aireación propiamente dicho.

a) La preparación de muestras de ARS consistió en lo siguiente:

- En el recipiente plástico de 20 L, se vertieron 14 L de agua potable. Seguido a ello se adicionaron las sustancias que permitieron alcanzar una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 600 ppm. Para esto, previamente fueron pesados en la balanza de precisión. Las sustancias y sus respectivas cantidades que se adicionaron al agua potable se presentan a continuación.

Tabla 6. *Sustancias disueltas para preparar ARS.*

SUSTANCIA	CANTIDAD (mg)
Peptona	4389.3
Sacarosa	987.6
Almidón	2 304.4
Sulfato de sodio	761.5
Fosfato dibásico de sodio	109.7

Fuente: elaboración propia.

- Hecho esto, esta mezcla se trasvasó al recipiente de acrílico del aparato instalado. Se esperó un aproximado de 30 segundos para que la lectura del sensor de oxígeno disuelto se estabilizara.
- Luego, se procedió a desoxigenar el agua preparada de acuerdo con el método químico según el procedimiento de la norma de la ASCE. Para ello, con el dato de la medida de oxígeno disuelto en el agua preparada, se calculó la cantidad de bisulfito de sodio y cloruro de cobalto que se adicionó y disolvió en esta agua.

- Luego, se procedió a desoxigenar el agua preparada de acuerdo con el método químico según el procedimiento de la norma de la ASCE. Para ello, con el dato de la medida de oxígeno disuelto en el agua preparada, se calculó la cantidad de bisulfito de sodio y cloruro de cobalto que se adicionó y disolvió en esta agua.
- b) Los experimentos de aireación se desarrollaron del siguiente modo:
- Con la muestra de ARS preparada y desoxigenada, se procedió a activar el motor eléctrico para impulsar y hacer que giren a la velocidad fijada según el diseño experimental. Se debe recordar también que, a este punto, los dispositivos de medida y registro de datos se encuentran activados.
 - En cada ensayo, hecho esto, se esperó a que cada muestra se oxigene hasta alcanzar la concentración de saturación del oxígeno disuelto. Una vez alcanzado esta condición, se desactivó el motor, para detener la oxigenación, y en seguida se procedió a extraer los datos almacenados en el registrador de datos.
 - Finalmente, se descargó y eliminó la muestra de ARS ensayada. Seguido a esto, se lavaron y enjuagaron, con agua potable, el recipiente y los discos del aparato para proceder con otro ensayo nuevo.

3.4.3.4. Etapa de gabinete

Con los datos de concentración de Oxígeno Disuelto (OD), temperatura y tiempo, extraídos de cada ensayo, se procedió a realizar los cálculos, análisis y evaluación de la siguiente manera:

- a) Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}). En inicio, se calculó este parámetro para cada ensayo que se realizó. Para el cálculo, se utilizaron los datos de concentración de Oxígeno Disuelto (OD) y el tiempo de aireación, los que, mediante un análisis de regresión lineal, se ajustaron a la ecuación lineal que obtuvo Lewis y Whitman, en su teoría propuesta para la transferencia de oxígeno a través de una doble capa. También se utilizó la concentración de saturación de OD, el cual fue el mayor valor de concentración alcanzado en cada experimento.
- b) Relación matemática entre la velocidad de giro de los discos y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}). Para esto, con los resultados promedio de coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) obtenidos a cada velocidad de giro, se realizaron análisis de regresión. Se obtuvo una ecuación para cada tipo de disco.
- c) Análisis de varianza. Para este análisis se utilizaron todos los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_{La}) obtenidos a cada velocidad de giro y tipo de disco. Con ello, se permitió evaluar la significancia de la influencia de la velocidad y tipo de disco sobre el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}). Este tipo de análisis corresponde a un ANOVA de dos factores a una confianza del 95 %.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se presentan los datos que se colectaron de los ensayos de aireación de las muestras de agua residual sintética, llevadas a cabo con el aparato que se describió en el capítulo anterior. También se encuentran los resultados de la rapidez de disolución de Oxígeno Disuelto (OD) y su relación con la velocidad de los discos. En la parte final, se encuentra el análisis de los efectos de los dos factores, que en este caso fueron forma y velocidad de discos, sobre la rapidez de disolución de oxígeno, de acuerdo a un diseño factorial, donde el primer factor posee dos niveles y el segundo factor tres niveles.

4.1. Determinación de los coeficientes de transferencia de oxígeno ($K_L a$)

4.1.1. Mediciones experimentales

El coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$) es el indicador de la velocidad de disolución de oxígeno en agua. Este parámetro se determinó con los datos obtenidos de mediciones de concentración de Oxígeno Disuelto (OD) en función al tiempo que se realizaron para cada ensayo y replica, de acuerdo al diseño factorial presentado en la parte metodológica (tabla 5).

Las mediciones de Oxígeno Disuelto (OD) en función al tiempo se presentan a continuación.

4.1.1.1. Mediciones experimentales de discos con alabes

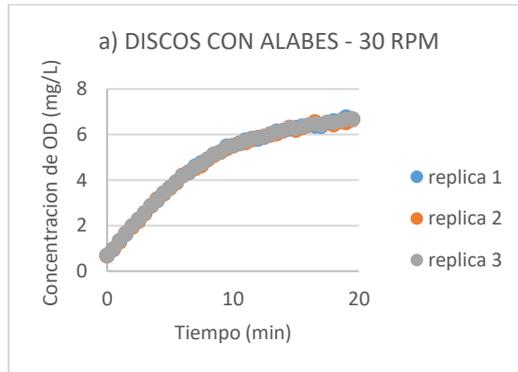


Figura 6. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 30 RPM.

Fuente: elaboración propia.

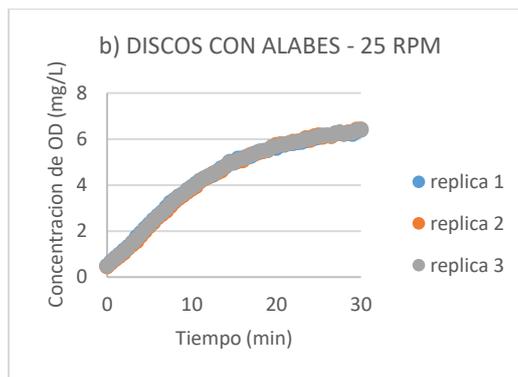


Figura 7. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 25 RPM.

Fuente: elaboración propia.

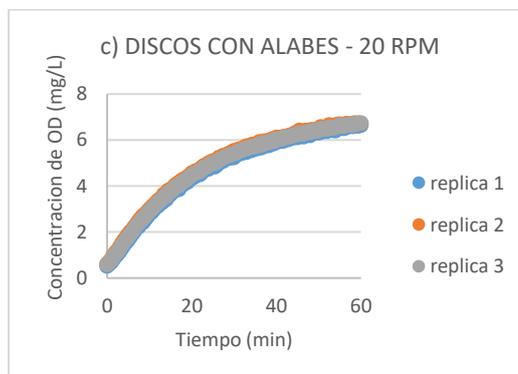


Figura 8. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos con alabes a 20 RPM.

Fuente: elaboración propia.

Se puede apreciar que la concentración del Oxígeno Disuelto (OD) en todos los casos va en aumento con el tiempo. La forma de las figuras que se generaron, posee pendientes que disminuye a medida que avanzó el tiempo. En particular, para este tipo de discos y de manera aproximada, las pendientes notablemente son mayores al inicio de los experimentos, hasta 12, 15 y 25 minutos respectivamente para las velocidades de 30 RPM, 25 RPM y 20 RPM.

4.1.1.2. Mediciones experimentales de discos lisos

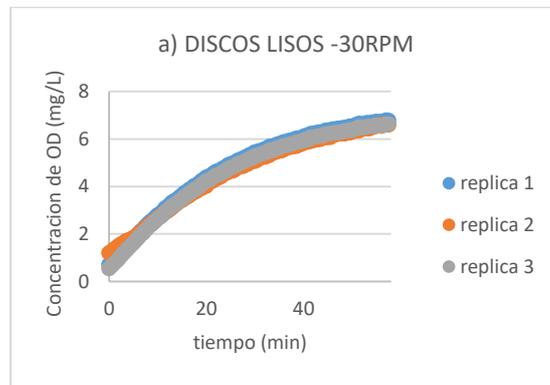


Figura 9. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 30 RPM.

Fuente: elaboración propia.

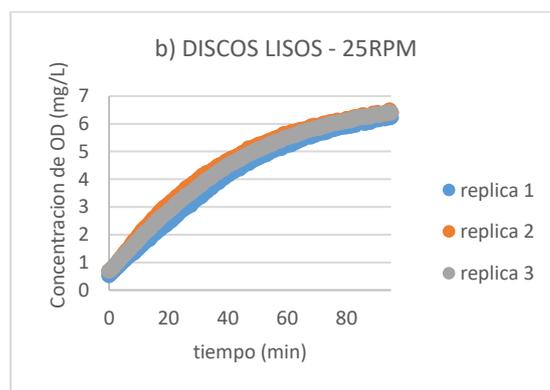


Figura 10. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 25 RPM.

Fuente: elaboración propia.

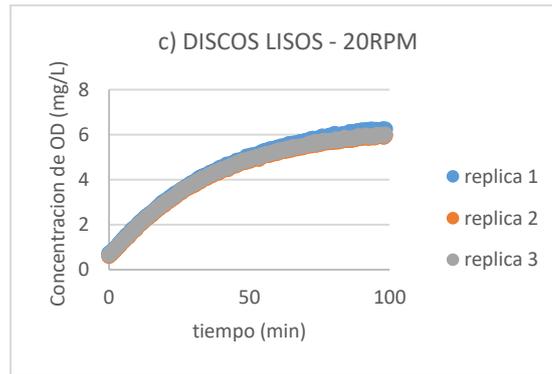


Figura 11. Datos experimentales de concentración de oxígeno disuelto con discos lisos a 20 RPM.

Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) en función del tiempo para esta forma de discos lisos, es semejante a lo que se observó con los discos con alabes. Las pendientes, en los momentos iniciales son mayores aproximadamente hasta los 40, 60 y 70 minutos respectivamente a las velocidades de 30 RPM, 25 RPM y 20 RPM.

Las pendientes de todas las curvas, se interpreta como el incremento de la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) en el agua por unidad de tiempo, o expresado de otro modo, como la velocidad con la que se incrementa la concentración de OD, lo quiere decir que la velocidad con que se incrementa la concentración de OD al inicio de los ensayos (mayor déficit de OD), fueron mayores que a tiempos donde la concentración de OD fueron próximos a la concentración de saturación de OD (pequeños déficits de OD).

Según la teoría de la doble capa, el déficit de oxígeno es la fuerza impulsora del proceso de transferencia de oxígeno para que se disuelva en el agua (27), es decir, si este déficit es cero entonces la transferencia cesa. En todas las curvas se aprecia que, en los minutos finales, la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) va aproximándose a la concentración de

saturación, por lo que el déficit va reduciéndose a cero. Con ello, la velocidad de transferencia va reduciéndose y, por lo tanto, la pendiente de las curvas también va disminuyendo.

En relación con el tiempo que demoró cada ensayo, para que la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) alcance el valor de la saturación, se observa claramente que son diferentes, es decir, se modifica con la forma que posee los discos, así como también con su velocidad de giro. Con los discos que poseen alabes, la oxigenación se realiza en menos tiempo, es decir más rápido comparado con los discos lisos. Por otro lado, con ambos discos, se observa que a mayor velocidad de giro, la rapidez de cambio de la concentración de OD es mayor que a velocidades menores.

4.1.2. Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La)

Los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_La) se obtuvieron utilizando los datos de concentración de oxígeno disuelto (OD) y tiempo; mostradas en las figuras anteriores, y acondicionadas de acuerdo a la ecuación lineal de la teoría de las dos capas de Lewis y Whitman, que se indicó en el marco teórico como ecuación (3) pues se consideró que la disolución de oxígeno en el agua, utilizando los discos parcialmente sumergidos, sigue el mecanismo explicado en la teoría de las dos capas:

$$\ln\left(\frac{C_{sat}-C_{(ox,L)}}{C_{sat}-C_{(ox,L,0)}}\right) = -\left[\left(\frac{K_La}{V}\right) \cdot T\right] + \ln\left(\frac{C_{sat}-C_{(ox,L,0)}}{C_{sat}-C_{(ox,L,0)}}\right)$$

La pendiente negativa de esta ecuación lineal es el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La).

De acuerdo a ello, a continuación se muestran las gráficas resultantes que corresponden a una de las réplicas, de las restantes, se presentan en los anexos.

4.1.2.1. Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) de discos con alabes

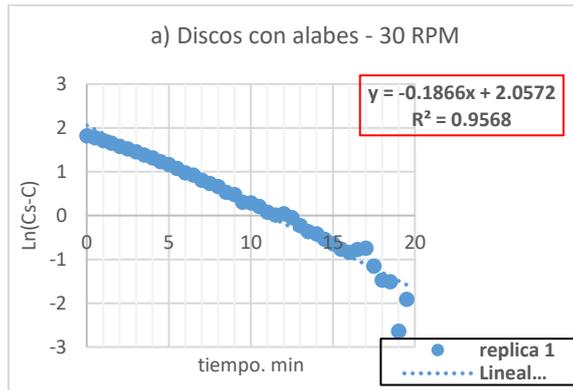


Figura 12. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera replica de discos con álabes con 30 RPM.

Fuente: elaboración propia.

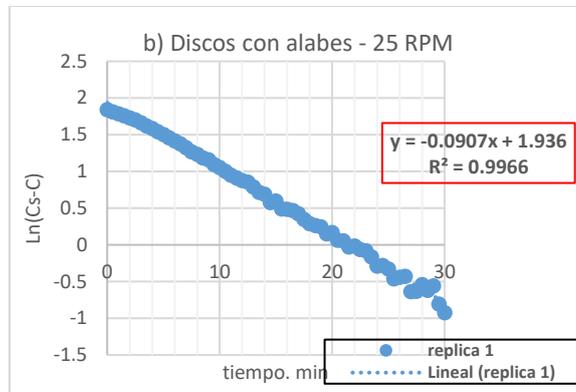


Figura 13. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera replica de discos con álabes con 25 RPM.

Fuente: elaboración propia.

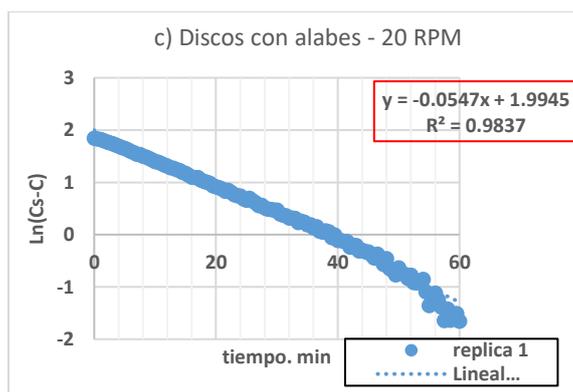


Figura 14. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera replica de discos con álabes con 20 RPM.

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.2. Cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$) de discos lisos

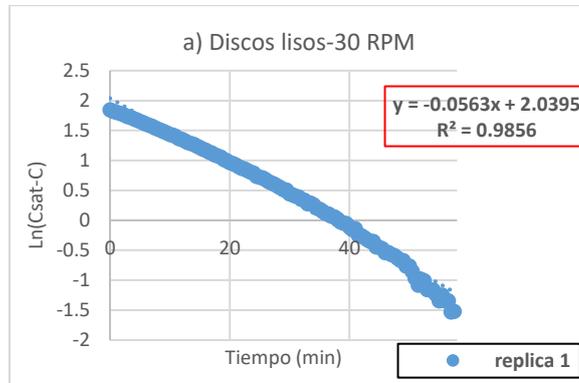


Figura 15. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 30 RPM.

Fuente: elaboración propia.

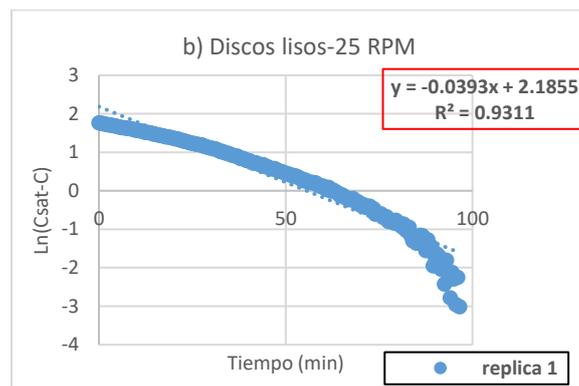


Figura 16. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 25 RPM.

Fuente: elaboración propia.

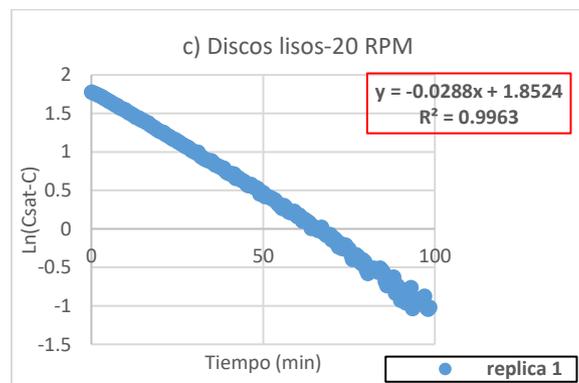


Figura 17. Regresión lineal de datos de concentración de oxígeno disuelto de primera réplica de discos lisos con 20 RPM.

Fuente: elaboración propia.

Se debe indicar que las condiciones a las que se llevaron a cabo todos los ensayos de aireación fueron: presión atmosférica 520 mmHg (Huancayo) y una temperatura de líquido en un rango promedio entre 15.5 a 17 °C.

En la siguiente tabla se tienen los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_{La}) que se obtuvieron en todos los ensayos.

Tabla 7. Resultados del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) para cada réplica experimental.

Coeficiente de Transferencia de Oxígeno (K_{La}) (min^{-1})						
RÉPLICA	DISCOS CON ALABES			DISCOS LISOS		
	30 RPM	25 RPM	20 RPM	30 RPM	25 RPM	20 RPM
1	0.1866	0.0907	0.0547	0.0563	0.0393	0.0288
2	0.1762	0.0918	0.0624	0.0538	0.034	0.0262
3	0.1825	0.0928	0.0579	0.0586	0.0333	0.0242
Promedio	0.1818	0.0918	0.0583	0.0562	0.0355	0.0264

Fuente: elaboración propia.

El mayor valor del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La} , valor de transferir oxígeno del aire al agua) que se obtuvo de los 2 tipos de discos empleados (alabes y lisos) es 0.1818 min^{-1} , el cual corresponde a los discos con alabes con una velocidad de 30 RPM.

El desempeño que evalúa el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) en los aireadores está relacionado con la rapidez de disolución del oxígeno atmosférico al agua (5), es decir que este parámetro permitirá comparar la rapidez que tienen los sistemas de aireación, en oxigenar aguas utilizando aire, cuando la superficie del agua esté expuesta a la atmósfera.

4.2. Relación matemática entre la velocidad de los discos y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La})

Para establecer esta relación, se realizó la gráfica de coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) y la velocidad de los discos, generando así la siguiente figura.

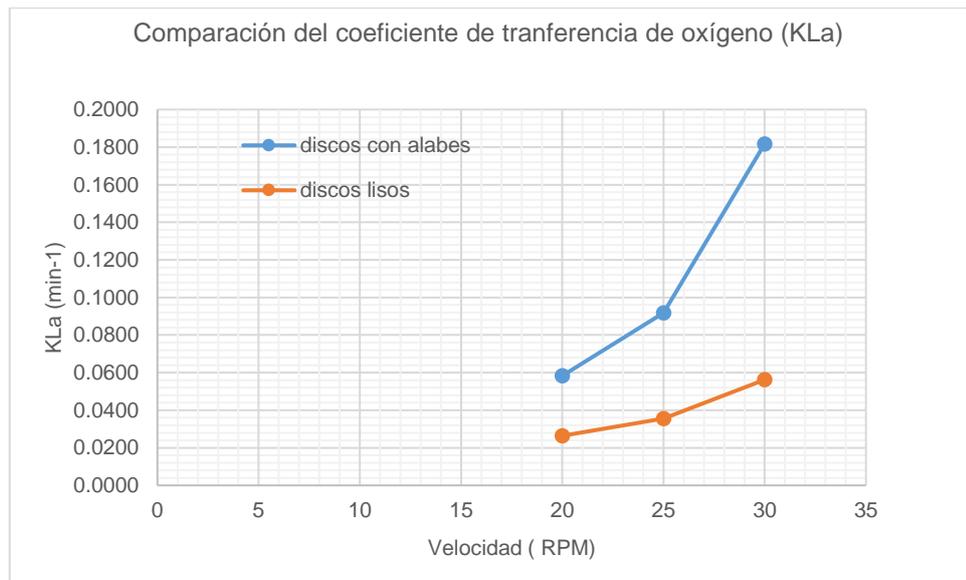


Figura 18. Análisis de regresión cuadrática del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) y velocidad de giro.

Fuente: elaboración propia.

En la figura se observa que el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) aumenta en magnitud, cuando la velocidad de giro de los discos también aumenta, mientras que los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_{La}) obtenidos con los discos con alabes son mayores que los obtenidos con los discos lisos.

Entonces, se puede inferir con esto que, además del área total no sumergida de los discos para transferir el oxígeno, es importante la agitación constante del agua en el recipiente para incrementar la rapidez de transferencia del oxígeno de la atmósfera al agua, pues los alabes que se incorporaron a los discos son elementos que provocan una mayor agitación de líquido en el recipiente, comparado con la agitación provocada con los discos lisos. Esto se comprueba comparando los resultados que obtuvo Von Sperling (15) empleando discos perforados de dos tipos que, considerando las condiciones de ambientales de Huancayo, se alcanzó a

obtener el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) de 0.0411 y 0.0436 min^{-1} a la velocidad de 50 RPM, donde estas magnitudes son menores a los que se obtuvieron en esta investigación.

Realizando el análisis de regresión matemática, el tipo de ecuación que mejor ajuste tiene a estos datos es la cuadrática para ambos tipos de discos. Las ecuaciones resultantes se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Ecuación cuadrática de la transferencia de oxígeno (K_{La}).

Discos	Ecuación	R^2
Lisos	$K_{La} = 0.000337 \cdot \text{RPM}^2 + 0.004235 \cdot \text{RPM}$	0.99756227
Con alabes	$K_{La} = 6.0235 \times 10^{-5} \cdot \text{RPM}^2 + 2.7059 \times 10^{-5} \cdot \text{RPM}$	0.99407896

Fuente: elaboración propia.

4.3. Análisis factorial y prueba de hipótesis

Para la realización de este análisis, la metodología que se implementó fue en función a las combinaciones de los dos factores que se manipuló en los experimentos, que fueron: la velocidad de giro y la forma de discos. Esto se encuentra en la tabla 5. De acuerdo a ello, el diseño de los experimentos que se tiene en este caso corresponde a un diseño factorial de dos factores (28), teniendo lo siguiente:

- El primer factor fue de velocidad de giro el cual tuvo 3 niveles = a.
- El segundo factor fue la forma de los discos el cual tuvo 2 NIVELES = b.

También, como se indicó, se realizaron 3 réplicas para cada combinación de niveles ($n = 3$).

De acuerdo a ello, se presenta la siguiente tabla resultante con los datos del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) que se obtuvieron en la sección anterior.

Tabla 9. Valores del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) de los discos (lisos y con alabes) a las velocidades (20, 25 y 30 RPM).

VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLE DEPENDIENTE		
VELOCIDAD DE ROTACION (a, RPM)	FORMA DE LOS DISCOS (b)	Coeficiente de transferencia de oxígeno K_La (min^{-1})		
		RÉPLICA I	RÉPLICA II	RÉPLICA III
20	LISO	0.0288	0.0262	0.0242
25	LISO	0.0393	0.034	0.0333
30	LISO	0.0563	0.0538	0.0586
20	CON ALABES (c/a)	0.0547	0.0624	0.0579
25	CON ALABES (c/a)	0.0907	0.0918	0.0928
30	CON ALABES (c/a)	0.1866	0.1762	0.1825

Fuente: elaboración propia.

El orden en que se realizaron las pruebas fue:

$a \times b \times n = 3 \times 2 \times 3 = 18$ observaciones fue completamente al azar, por lo que este diseño es completamente aleatorizado. En la siguiente tabla se encuentra el orden en que se llevaron a cabo estos experimentos.

Tabla 10. Orden de los valores tomados aleatoriamente.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN (a, RPM)	FORMA DE LOS DISCOS (b)	REPLICAS		
		I	II	III
20	LISO	7°	5°	2°
25	LISO	1°	8°	15°
30	LISO	9°	12°	11°
20	CON ALABES (c/a)	18°	3°	13°
25	CON ALABES (c/a)	4°	17°	10°
30	CON ALABES (c/a)	14°	6°	16°

Fuente: elaboración propia.

Análisis de varianza:

Con los datos de la tabla anterior se procedió a realizar el análisis de varianza, para tal efecto se utilizó el Software MINITAB. El resumen de resultados es el mostrado a continuación.

Tabla 11. Valores de la varianza.

Fuente	gl	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0.048689	0.009738	893.98	0.000
Lineal	3	0.041612	0.013871	1273.39	0.000
Forma de disco	1	0.022834	0.022834	2096.24	0.000
Velocidad	2	0.018779	0.009389	861.97	0.000
Interacciones de 2 términos	2	0.007077	0.003538	324.85	0.000
Error	12	0.000131	0.000011		
Total	17	0.048820			

Fuente: elaboración propia.

Según los datos de esta tabla, se observa que el valor p es 0.000 en todos los casos de las fuentes de variación (factores e interacción), el cual es menor a 0.05 (nivel de significancia), esto conduce a concluir que el efecto que ejercen los dos factores (forma de disco y velocidad de giro), así como la interacción de ambos, son significativas sobre el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}).

También se obtuvo el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, presentado a continuación.

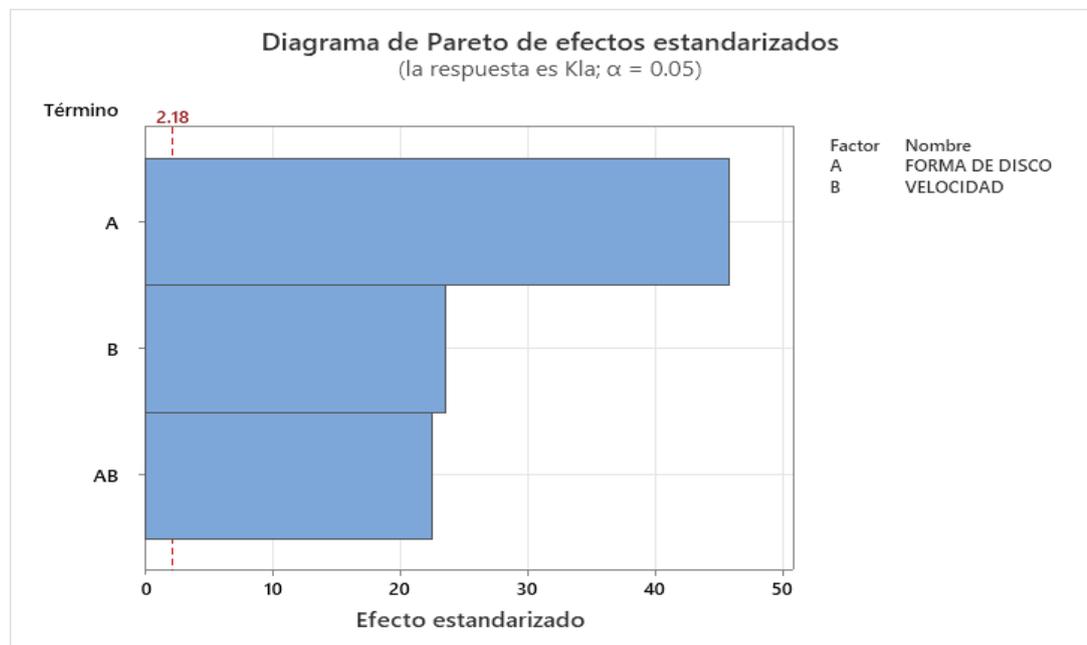


Figura 19. Diagrama de Pareto.

Fuente: elaboración propia.

En el diagrama de Pareto se muestran los efectos estandarizados en forma descendente. Del factor que ejerce mayor efecto al factor que ejerce menor efecto, o expresado de otro modo, el factor forma de disco es el que ejerce un efecto más significativo que el factor velocidad de los discos y, estos dos a su vez, mayor que la interacción de ambos factores, esto se explica a razón de que los dos factores y la interacción de ambos, cruzan la línea de referencia de 2.18, siendo estadísticamente significativos a un nivel de significancia de 0.05.

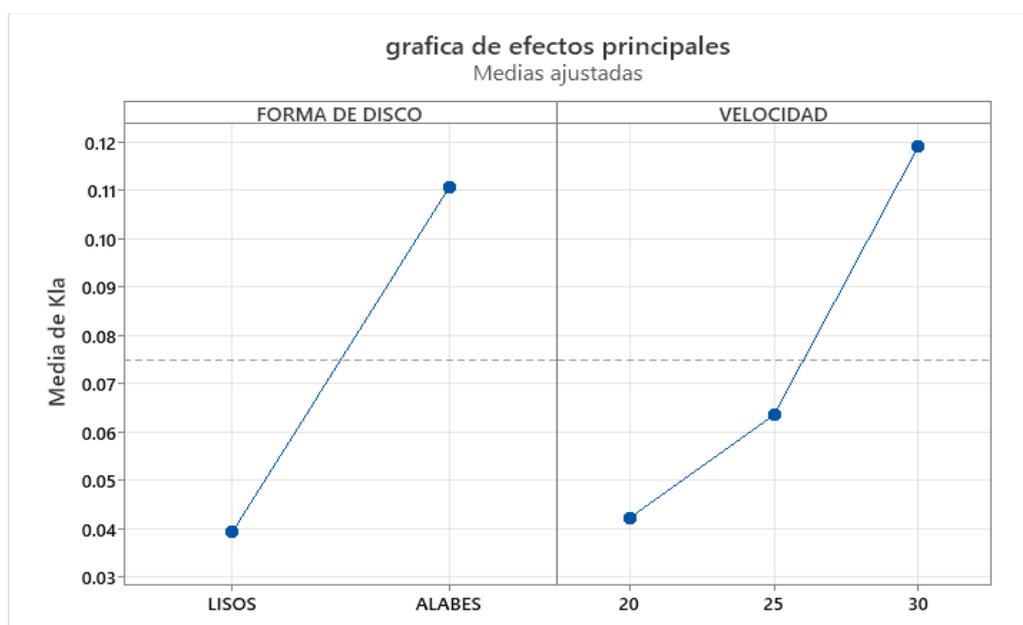


Figura 20. Gráfico de efectos de los discos lisos y con alabes.

Fuente: elaboración propia.

En la anterior figura se muestra la gráfica de los efectos principales y como es el efecto de cada una sobre la variable respuesta. De acuerdo a esto, tanto el factor de forma de disco, como la velocidad de giro, ejercen un efecto positivo, es decir, al modificarse de un nivel bajo a un nivel alto, la variable coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) también aumenta.

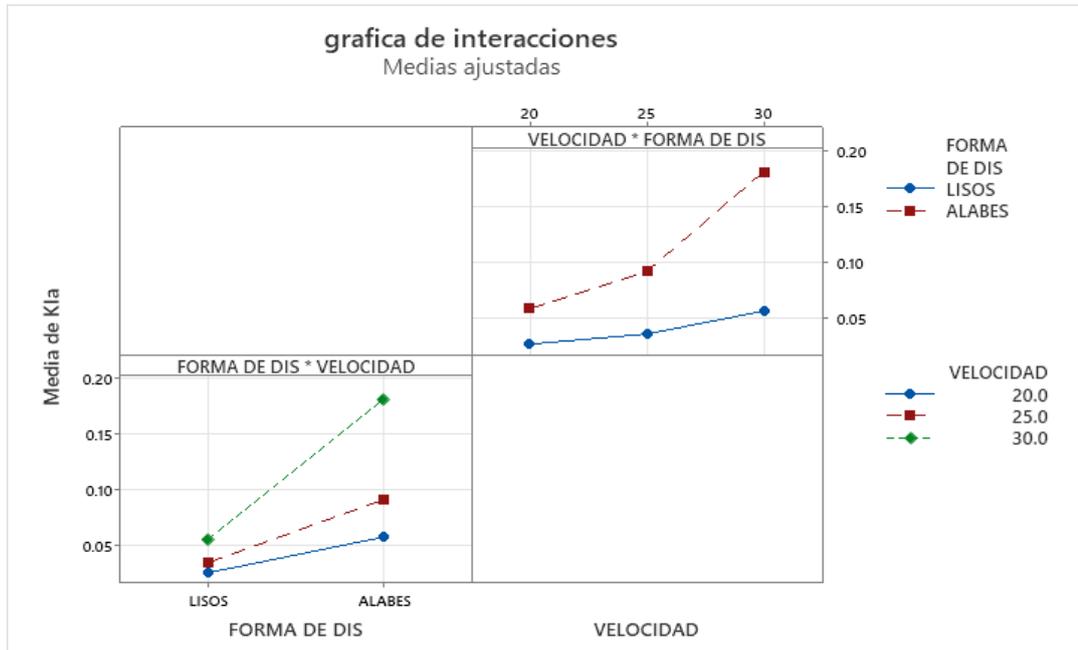


Figura 21. Interacciones de las medias de los discos con la velocidad.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la anterior figura, se observa que las líneas no son paralelas en ambos casos, es decir, se verifica que la interacción de ambos factores ejerce un efecto significativo sobre coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La). Explicado de otro modo, la relación entre un factor categórico, que en este caso puede ser la forma de disco o velocidad de giro, y la respuesta del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La), depende del valor que toma el segundo factor, que en este caso viene a ser la velocidad de giro o forma de disco, respectivamente.

Se realizó el análisis de regresión, encontrándose la siguiente ecuación:

$$K_{La} = 0.075006 - 0.035617 \cdot \text{FORMA DE DISCO-LISOS} + 0.035617 \cdot \text{FORMA DE DISCO_ALABES} - 0.03264 \cdot \text{VELOCIDAD_20} - 0.01136 \cdot \text{VELOCIDAD_25} + 0.04399 \cdot \text{VELOCIDAD_30} + 0.01965 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_LISOS 20} + 0.00750 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_LISOS 25} - 0.02715 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_LISOS 30} - 0.01965 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_ALABES 20} - 0.00750 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_ALABES 25} + 0.02715 \cdot \text{FORMA DE DISCO} \cdot \text{VELOCIDAD_ALABES 30}$$

La gráfica de probabilidad normal de los residuos, se presenta en la siguiente figura.

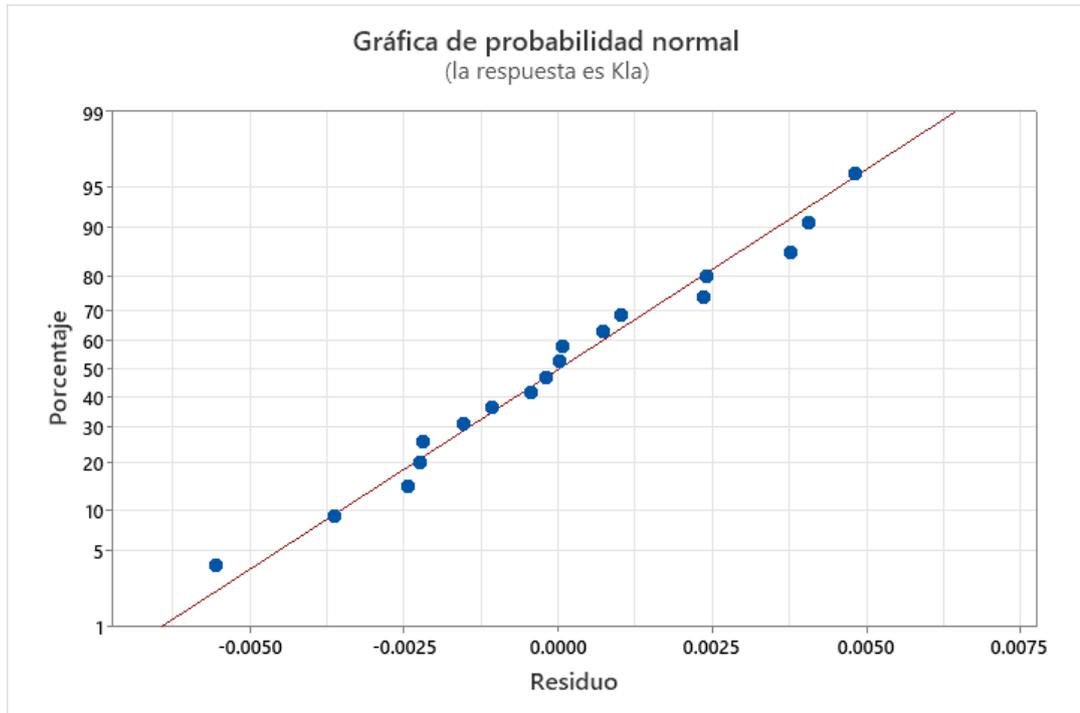


Figura 22. Probabilidad normal de coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La).

Fuente: elaboración propia.

Según la gráfica anterior, se observa que la probabilidad sigue un patrón de una línea recta, por lo que se establece que los residuos tienen una distribución normal.

Con respecto a la prueba de hipótesis, se utilizaron los resultados del análisis de varianza y la hipótesis que se formuló es:

Hipótesis estadística:

H_0 : El efecto de la forma y la velocidad que poseen los discos en el aireador, sobre la disolución del oxígeno en agua por aireación, no es significativo.

H_a : El efecto de la forma y la velocidad que poseen los discos en el aireador, sobre la disolución del oxígeno en agua por aireación, es significativo.

Como ya se indicó, el nivel de significancia a la que se realizó la prueba de la hipótesis estadística fue de 0.05.

Según Montgomery (21), si el estadístico F_0 es mayor que el estadístico de distribuciones F , se rechaza la hipótesis nula (se rechaza que la media de las muestras del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) son iguales).

Por tanto, realizando la comparación con los F_0 de la tabla 11, se rechaza que no hay variación significativa del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) por efecto de la forma de los discos y su velocidad de giro.

Expresado de otro modo, esta conclusión confirma que tanto la forma de los discos, así como la velocidad de giro, afectan en la rapidez de transferencia de oxígeno a un nivel de significancia del 5 %.

4.4. Discusión de resultados

Según todo lo descrito y expresado, en términos generales, la operación de oxigenación de las muestras de agua residual empleando discos rotativos parcialmente sumergidos, cuya superficie fue en un caso liso y en otro modificada con alabes, siguen un comportamiento semejante a los sistemas de aireación con difusores por lotes. El mecanismo de disolución de oxígeno del aire al agua, descrito por la teoría de la doble capa, se adapta satisfactoriamente a los datos experimentales que se obtuvieron, por lo que se pudo obtener los parámetros del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) para cada ensayo experimental.

Este parámetro permitió realizar la comparación del desempeño en la oxigenación de agua con aire, de cada tipo de disco, a diferentes velocidades y con discos perforados, encontrándose que los alabes incorporados en los discos como elementos de agitación, permitieron obtener una mayor rapidez de disolución del oxígeno atmosférico en el agua.

Con ello se verifica que la agitación del agua, durante la operación de oxigenación por aireación con estos discos parcialmente sumergidos, es recomendable para acelerar la transferencia de oxígeno. Con relación a la velocidad de giro de los discos, se observa que, al incrementar esta variable, también se incrementa la rapidez de transferencia, pero en menor medida que modificando la forma de los discos.

CONCLUSIONES

- Se evaluó el efecto de la forma y velocidad de los discos de un aireador en la rapidez de oxigenación de agua residual.
- Se determinó el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) del aireador, con discos lisos y con alabes, parcialmente sumergidos que giran a diferentes velocidades. Los coeficientes de transferencia de oxígeno (K_{La}) (min^{-1}) promedios obtenidos son los siguientes:

Discos	20 RPM	25 RPM	30 RPM
Lisos	0.0264	0.0355	0.0562
Con alabes	0.0583	0.0918	0.1818

- La relación matemática que se establece entre la velocidad de giro de los discos y el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La}) para los tres niveles de velocidad de giro tienen forma cuadrática, siendo los siguientes:

Discos lisos	$K_{La} = 0.000337 \cdot \text{RPM}^2 + 0.004235 \cdot \text{RPM}$
Con alabes	$K_{La} = 6.0235 \times 10^{-5} \cdot \text{RPM}^2 + 2.7059 \times 10^{-5} \cdot \text{RPM}$

- Se evaluó los efectos de la forma y la velocidad que poseen los discos parcialmente sumergidos en el agua contenida en el aireador, sobre la velocidad de disolución de oxígeno, concluyendo que ambos factores y su interacción ejercen un efecto significativo.

RECOMENDACIONES

Dentro de este tema de aireación de aguas residuales, en investigaciones futuras se recomienda lo siguiente:

- Desarrollar investigaciones que permitan evaluar el número de alabes en la superficie de los discos y su efecto en la velocidad de disolución de oxígeno, así como determinar el número ideal de alabes para un sistema de aireación con discos parcialmente sumergidos.
- Realizar investigaciones que permitan evaluar la efectividad de los discos y su efecto en la velocidad de disolución de oxígeno en Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR).
- Se recomienda a otros investigadores implementar este mecanismo en el tratamiento de otros tipos de aguas residuales.
- Evaluar el consumo energético de estos sistemas de aireación con diferentes tipos de discos.
- Implementar los paneles solares fotovoltaicos para disminuir el costo de energía eléctrica que consume el motor del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OROZCO, A. *Bioingeniería de Aguas residuales: Teoría y diseño*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2014.
- (2) METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. España: Mc Graw-Hill, 1995. ISBN: 0070416907.
- (3) RAMALHO, R. *Tratamiento de aguas residuales*. España: Reverté, 1996. ISBN: 84-291-7975-5.
- (4) IVAILOVA, I., y otros. Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno en procesos de fangos activados para optimizar la aireación. *Ingeniería del agua*, 2020, 24(3). DOI 10.4995/ia.2020.12877.
- (5) AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Measurement of oxygen transfer in clean water*. Estados Unidos: ASCE/EWRI, 1992. ISBN: 9780784471524.
- (6) VÁSQUEZ, E. Efecto de la velocidad rotacional en reactor biodiscos sobre la remoción de materia orgánica en agua residual doméstica de campamento minero La Libertad - Perú. *Ciencia y Tecnología*, 2018, 14(1). ISSN: 1810-6781.
- (7) ADEL, M., y otros. A comparative study of impeller aerators configurations. *Alexandria Engineering Journal*, 2019, 58(4). DOI 10.1016/j.aej.2019.11.014.
- (8) SURAMPALLI, R. y BAUMANN, E. Sludge production in rotating biological contactors with supplemental aeration and an enlarged first stage. *Bioresource Technology*, 1995, 54(3). [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00147-6).
- (9) QUINTERO, L., MOLANOGUARÍN, A. y PRAMPARO, L. Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (Rotating Biological Contactor) para tanque primario de aguas residuales no domésticas provenientes de una industria de bebidas no alcohólicas. *Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería*, 2021, 29(2). ISSN: 0718-3305.
- (10) KUBSAD, V., CHAUDHARI, S. y GUPTA, S. Model for oxygen transfer in rotating biological contactor. *Water Research*, 2004, 38(20). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.016>.
- (11) BULLÓN, K. Modelamiento de la oxigenación de agua residual sintética con un aireador rotativo circular. Tesis de maestría (Maestro en Ingeniería Química Ambiental). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021.
- (12) AVELLANEDA, B. Evaluación de un modelo mecanicista para la aireación de agua residual con difusor de burbuja fina. Tesis de maestría (Maestro en Ingeniería Química Ambiental). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021.

- (13) ECKENFELDER, W. y MUSTERMAN, J. *Bioinhibition, VOC stripping*. Nashville: Environmental Progress, 1997.
- (14) HUARTOS, J. Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Colombia: Universidad Católica de Manizales, 2018.
- (15) VON SPERLING, M. *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*. IWA, 2015. ISBN: 9781843391654.
- (16) DELOYA, A. Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. *Tecnología en Marcha*, 2001, 13(4).
- (17) MENÉNDEZ, C. y DUEÑAS, J. Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2020, 41(2). ISSN: 1680-0338.
- (18) ROSSO, D. y STENSTROM, M. Economic implications of fine-pore diffuser aging. *Water Environment Research*, 2006, 78(8). DOI 10.2175/106143006x101683.
- (19) FOLADORI, P., VACCARI, M. y VITALI, F. Energy audit in small wastewater treatment plants: Methodology, energy consumption indicators, and lessons learned. *Water Science and Technology*, 2015, 72. DOI 10.2166/wst.2015.306.
- (20) LEWIS, W. y WHITMAN, W. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 16(12). DOI 10.1021/ie50180a002.
- (21) MONTGOMERY, D. *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F.: Limusa, 2016. ISBN: 968-18-6156-6.
- (22) UBY, L. Next steps in clean water oxygen transfer testing - A critical review of current standards. *Water Research*, 2019, 157. DOI 10.1016/j.watres.2019.03.063.
- (23) BHUYAR, L., THAKRE, S. y INGOLE, N. Design characteristics of Curved Blade Aerator w.r.t. aeration efficiency and overall oxygen transfer coefficient and comparison with CFD modeling. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2010, 1(1). DOI 10.4314/ijest.v1i1.58055.
- (24) TAMAYO, M. *Metodología formal de la investigación científica*. Bogotá: Limusa, 1999. ISBN: 968-18-1186-0.
- (25) HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ-COLLADO, C. y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw Hill, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- (26) CABEZAS, M., ANDRADE, D. y TORRES, J. *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Ecuador: ESPE, 2018. ISBN: 978-9942-765-44-4.

- (27) RAMALHO, R. *Tratamiento de aguas residuales*. España: Reverté, 2006.
- (28) MONTGOMERY, D. *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F.: Limusa, 2004.
ISBN: 968-18-6156-6.

ANEXOS

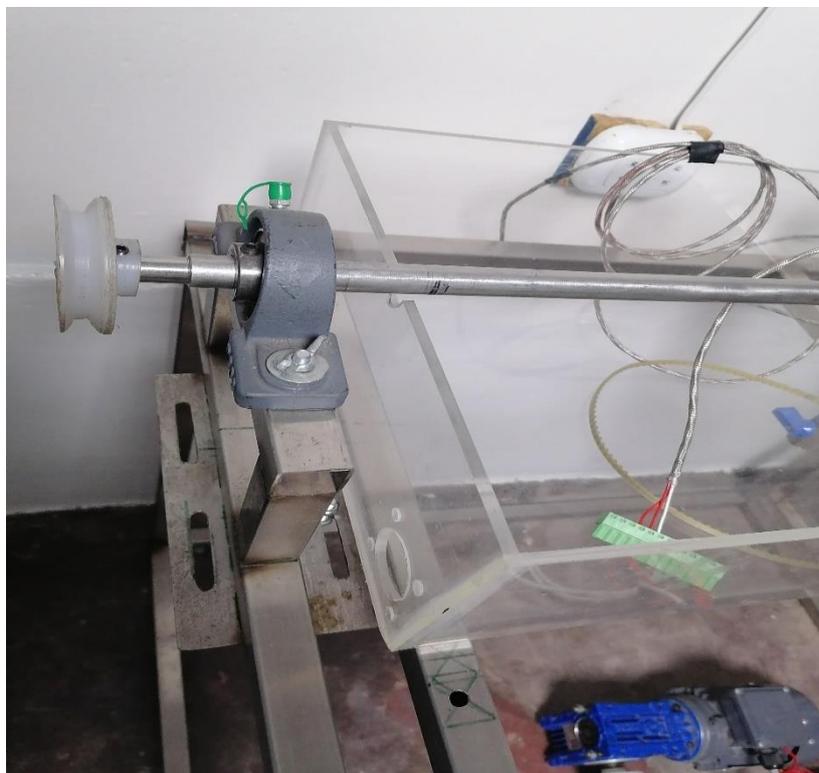
Anexo 1. Operacionalización de variables.

Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable independiente: FORMA DE DISCOS	Es cualidad geométrica que poseen los discos de aireación.	Se distingue por observación directa de la presencia de alabes en la superficie de los discos.	<ul style="list-style-type: none"> • Alabes en la superficie. • Diámetro de discos. • Espesor de discos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia / ausencia de alabes. 	Nominal
	VELOCIDAD DE DISCOS	Es el número de vueltas que los discos realizan en una unidad de tiempo.	Se determina mediante el conteo de las vueltas con que giran los discos por unidad de tiempo.	<ul style="list-style-type: none"> • Número de revoluciones por unidad de tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de vueltas por minuto.
Variable dependiente: RAPIDEZ DE DISOLUCIÓN DE OXIGENO	Es la masa de oxígeno transferido; del aire al agua, por unidad de tiempo y volumen de líquido.	Se mide mediante el incremento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua sometida a aireación por unidad de tiempo.	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de concentración de Oxígeno Disuelto (OD) por unidad de tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de concentración de Oxígeno Disuelto (OD) por minuto 	Razón
			<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de transferencia de oxígeno (KLa). 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de transferencia de oxígeno (KLa) (min⁻¹). 	Razón

Anexo 2. Panel fotográfico.



Fotografía 1. Instalación del equipo con el sensor de oxígeno disuelto.



Fotografía 2. Instalación del eje y varilla de soporte.



Fotografía 3. Motor instalado.



Fotografía 4. Sensor de oxígeno disuelto.



Fotografía 5. Discos lisos y con alabes.