

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO BASADO EN LA
CAÍDA DE PRESIÓN PARA LA AERACIÓN SUSTENTABLE A
NIVEL PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA**

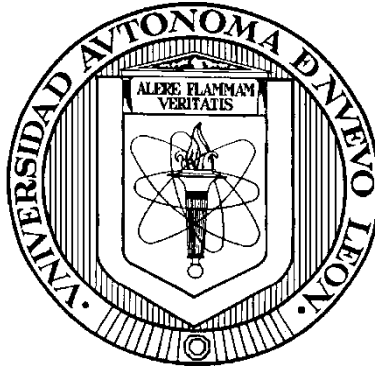
POR

JORGE EDUARDO TORRES REYNA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON
ORIENTACIÓN EN LA INGENIERÍA AMBIENTAL**

Noviembre 2015

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



Diseño y evaluación de un dispositivo basado en la caída de presión para la aeración sustentable a nivel planta piloto para el tratamiento del agua

Por

Jorge Eduardo Torres Reyna

**En Opción al Grado de Maestría en Ciencias con
Orientación en la Ingeniería Ambiental**

**Director de Tesis Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián
Codirector de Tesis Dr. Arquímedes Cruz López**

Noviembre 2015

Dedicatoria

A Dios:

Por permitirme terminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida y llenarme de bendiciones en todo este camino hasta este punto, por protegerme y darme fuerzas para superarme día con día a lo largo de mi vida.

A mis padres:

Jorge Torres Villarreal y María de la Luz Reyna Mendoza, por apoyarme durante toda mi vida y brindarme todo lo que tenían a su alcance, por motivarme y guiar me en mi camino.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como a la Facultad de Ingeniería Civil, por haberme permitido ser parte de esta experiencia como lo es el estudiar la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, y por los apoyos económicos y becas que me han facilitado y que por ende permitido concluir con mis estudios de posgrado.

Agradezco a CONACyT por la beca que me otorgo y que me permitió solventar gastos mis gastos durante esta etapa de estudio he investigación.

Al Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián, quien fungió como mi director de tesis, quien agradezco por permitirme llevar a cabo la investigación bajo su tutoría y por guiarme con paciencia, tolerancia, entusiasmo y dedicación durante todo el desarrollo de la tesis. Además por siempre asesorarme y ayudarme inmensurablemente en gestión de todos los recursos necesarios para poder realizar las estancias en el IHE- UNESCO en Holanda, IPN de la ciudad de México y la participación en el congreso Nacional de Hidráulica 2014 en Puerto Vallarta.

Al Dr. Arquímedes Cruz López, mi co-director de tesis, le agradezco por todo el apoyo, contribuciones y tiempo que me brindo a lo largo de mi investigación, siempre de la manera más atenta y con visión a la excelencia. Además por brindarme la oportunidad de poder realizar una estancia en el IPN de la ciudad de México y apoyarme y asesorarme para poder lograr asistir al

congreso de Hidráulica Nacional y a la estancia realizada en el IHE- UNESCO en Holanda.

Al Dr. Jimmy Luis Loaiza Navia, por el tiempo aportaciones y apoyo brindado para la revisión y culminación de la investigación.

Al Dr. Arturo Manzo Robledo por ayudarme y asesorarme en el tema de la electroquímica, y por permitirme llevar a cabo una estancia en el Instituto Politécnico Nacional y al Dr. Carlos Lopez Vazquez por permitirme llevar acabo la estancia de investigación en la UNESCO-IHE en Holanda, y por asesorarme y guiarme durante ese periodo.

Al Dr. Cesar A. Juárez Alvarado por facilitar los recursos necesarios para llevar a cabo las diferentes estancias de investigación.

Al M.C. Ricardo Alberto Cavazos González y al M.C. David clemente López Pérez por haberme facilitado las herramientas y uso del laboratorio de hidráulica donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales.

Al cuerpo académico por su paciencia, dedicación y formación durante los cursos llevados a lo largo del posgrado y al personal administrativo de subdirección de estudios de posgrado por todas sus atenciones y servicios, en especial al Ing. Ramiro Torres Pérez por todo su apoyo en el área administrativa.

Índice

Capítulo I.....	2
I.1 Introducción General	3
I.2 Antecedentes	9
I.3 Justificación.....	18
I.4 Hipótesis.....	21
I.5 Objetivo General	22
I.5.1 Objetivos Específicos	22
Capitulo II.....	23
II.1 La importancia del tratamiento de agua	24
II.2 La importancia del Oxígeno disuelto en el agua.....	31
II.3 Los dispositivos de Aeración	33
II.4 Efecto Venturi.....	41
II.5 Dispositivos basados en la caída de presión.....	43
II. 6 Otros dispositivos similares.	46
II.6.1 Cono de aeración de flujo descendente.....	46
II.7 Transferencia de gases.	48
II.8.- Oxígeno Disuelto.....	53
II.9 Métodos para la determinación de oxígeno disuelto	55
II.10Técnicas electroquímicas	56
II.10.1 Voltamperometría cíclica.....	56
II.10.2 Barrido lineal	57
II.11 Importancia de la eficiencia de los sistemas de aeración.....	60
II.11.1 Eficiencia de los sistemas de aeración.	61
II.11.2 Eficiencia de aeración y su determinación.	62
II.12.- Consumo de oxígeno microbiano.....	66
Capitulo III	69
III.1 Introducción.....	70
III.2 Fundamentos de la Determinación del Oxígeno Disuelto.....	71
III.2.1 Métodos para la determinación de oxígeno disuelto	71
III.2.2 Sondas de oxígeno disuelto	72

III.2.3 Electrodo de Clark.....	72
III.3 Descripción del Sistema Experimental a Nivel Piloto	75
III.3.1 Características Generales.....	75
III.3.2 Descripción de dispositivo basado en la caída de presión.....	75
III.3.3 Descripción de línea de conducto del agua.	77
III.3 Descripción de la sonda de análisis	79
III.4 Técnicas Instrumentales para Evaluación del Oxígeno Disuelto.....	82
III.4.1 Determinación de Oxígeno disuelto in-situ.....	82
III.5 Determinación de oxígeno disuelto inicial.	85
III.6 Descripción de pruebas.....	87
III.6.1 Pruebas de la etapa uno	87
III.6.2 Pruebas de la etapa dos	88
III.7 Caracterización Electroquímica.....	91
III.7.1 Voltamperometría cíclica.....	92
III.7.2 Linear Sweep	93
III.8 Elaboración de puente salino	95
III.9 Descripción de pruebas.....	96
III.9.1 Potencial a circuito abierto	96
III.9.2 Barrido lineal	100
III.10 Eficiencia del dispositivo.....	102
Capitulo IV	103
IV.1 Etapa uno.....	104
IV.2 Etapa Dos	113
IV.3 Método electroquímico.....	123
IV.3.1 Potencial a circuito abierto.....	123
IV.3.1 Barrido Lineal.....	126
IV.4. Eficiencia de aeración.....	133
IV.5.- Resumen de resultados	145
IV.6.- Pruebas a nivel de banco	149
IV.6.1.- Determinación de aeración natural.....	149

IV.6.3.- Determinación de aeración del dispositivo basado en la caída de presión.	153
IV.6.4.- Determinación de consumo de oxígeno de organismos en lodo	157
IV.6.4.1.-Determinación de solidos en lodo.	164
Conclusiones.....	168
Bibliografía	170

Lista de Tablas

Tabla		Pág.
1	Resumen de artículos.	16
2	Eficiencia de los sistemas de aeración	62
3	Resultados de primera prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	104
4	Resultados de segunda prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	106
5	Resultados de tercera prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	108
6	Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración, prueba 1.	133
7	Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 1.	134
8	Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración, prueba 2.	136
9	Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 2.	137
10	Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración, prueba 3.	139
11	Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 3.	140
12	Resultados de sea.	143
13	Resumen de resultados de la etapa dos con respecto al espacio.	146
14	Resumen de resultados de la etapa uno con respecto al tiempo.	148

Lista de figuras

Figura		Pág.
I.1	Dispositivos basados en la caída de presión.	11
II.1	Diferentes tecnologías de aeración y transferencia de gas empleadas en plantas de tratamiento.	34
II.2	Clasificación de los sistemas mecánicos para la inyección de aire en plantas de tratamiento.	35
II.3	Clasificación de los sistemas de gas comprimido en plantas de tratamiento.	38
II.4	Clasificación de los sistemas de aspiración de aire en plantas de tratamiento	40
II.5	Esquema de efecto venturi.	41
II.6	Partes de un dispositivo venturi.	44
II.7	Dimensiones constructivas para dispositivo venturi.	45
II.8	Esquema de un cono de aeración de flujo descendente.	46
II.9	Esquema de la teoría de la doble capa.	49
II.10	Curva característica de un voltoamperograma.	57
II.11	Curva característica de barrido lineal.	58
III.1	Esquema básico de una sonda de oxígeno disuelto comercial del tipo sonda de clark.	73
III.2	Vista en planta de planta piloto.	75
III.3	Dispositivo de caída de presión.	76
III.4	Fotografía de dispositivo basado en la caída de presión en proceso de aeración.	77
III.5	Vista de perfil de planta piloto.	78

III.6	Fotografía de planta piloto.	78
III.7	Esquema básico de una sonda de oxígeno disuelto comercial del tipo sonda de clark.	79
III.8	Sonda comercial “thermo scientific orion star”.	81
III.9	Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto, vista en planta de planta piloto.	89
III.10	Cuadrícula de referencia para puntos de medición.	84
III.11	Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto inicial en el tanque 1.	85
III.12	Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto inicial en el tanque 2.	86
III.13	Representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 1.	88
III.14	Representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 2.	88
III.15	Representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 3.	89
III.16	Representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 4.	89
III.17	Representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 5.	90
III.18	Curva característica de un voltioamperograma	92
III.19	Curva característica de un barrido lineal.	93
IV.1	Resultados de la primera prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	105
IV.2	Resultados de la segunda prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	107
IV.3	Resultados de la tercera prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	109
IV.4	Resultados de oxígeno disuelto de 3 módulos de aeración.	110

IV.5	Resultados de oxígeno disuelto de sistema de aeración por difusión.	111
IV.6	Gráfica de colores en 3 dimensiones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.	112
IV.7	Oxígeno disuelto inicial en el tanque 2 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos.	113
IV.8	Oxígeno disuelto inicial en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos.	114
IV.9	Oxígeno disuelto a 20 cm de profundidad después de aeración en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos.	115
IV.10	Oxígeno disuelto a 20 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.	116
IV.11	Oxígeno disuelto a 40 cm de profundidad después de aeración en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos.	117
IV.12	Oxígeno disuelto a 40 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.	117
IV.13	Oxígeno disuelto a 80 cm de profundidad después de aeración en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos.	118
IV.14	Oxígeno disuelto a 80 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.	118
IV.15	Gráfica de colores de la distribución del oxígeno disuelto en la zona de estudio.	120
IV.16	Gráfica de colores en 3 dimensiones de la distribución del oxígeno disuelto en la zona de estudio.	121
IV.17	Potencial a circuito abierto en ausencia de oxígeno y saturado de oxígeno.	123
IV.18	Potencial a circuito abierto de 7 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 17 °C, ambiente 14 °C.	125
IV.19	Potencial a circuito abierto de 8 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 18 °C, ambiente 22 °C.	125

IV.20	Barrido lineal de ausencia de oxígeno y aeración en diferentes tiempos.	127
IV.21	Barrido lineal de 7 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 17 °C, ambiente 14 °C.	129
IV.22	Barrido lineal de 8 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 18 °C, ambiente 22 °C.	129
IV.23	Relación oxígeno disuelto – potencial de resultados mostrados en figuras IV.24.	131
IV.24	Relación corriente – oxígeno disuelto de resultados mostrados en figura IV.29.	132
IV.25	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_{\infty} - C_s$) de la prueba uno contra el tiempo.	134
IV.26	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_{\infty} - C_s$) de la prueba dos contra el tiempo.	137
IV.27	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_{\infty} - C_s$) de la prueba tres contra el tiempo.	141
IV.28	Oxígeno disuelto durante un lapso de tiempo, referente a la etapa uno experimental.	147
IV.29	Gráfica de aeración natural oxígeno disuelto contra tiempo.	150
IV.30	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto en la aeración natural contra tiempo.	150
IV.31	Gráfica de concentración de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de mezclado.	152
IV.32	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^{\infty} - C_t$) de la prueba uno con respecto al tiempo de mezclado.	152
IV.33	Gráfica de concentración de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de aeración.	154
IV.34	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^{\infty} - C_t$) de la prueba dos con respecto al tiempo de aeración.	155

IV.35	Gráfica de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de las pruebas a nivel planta piloto y en reactor de 20 L.	156
IV.36	Gráfica de consumo de oxígeno disuelto de microorganismos en lodo, prueba 1.	158
IV.37	Gráfica de semi-log de consumo de OD de microorganismos en lodo, prueba 1 parte 2.	158
IV.38	Gráfica de semi-log de consumo de OD de microorganismos en lodo, prueba 1 parte 2.	159
IV.39	Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^\infty - C_t$) de la prueba 4 con respecto al tiempo de aeración.	160
IV.40	Gráfica referente al consumo de oxígeno de microorganismos en lodo. Prueba 4-2.	162
IV.41	Gráfica de consumo de oxígeno de microorganismos al consumir sustrato.	167

Nomenclatura

C_{∞}	Grado de Saturación de Oxígeno a 20 grados de temperatura
cm	Centímetros
Ef	Potencial Final
Ei	Potencial Inicial
FEP	Fluoretileno propileno
hr	Hora
I	Amperes
Kg	Kilogramos
Kw	Kilowatt
L	Litros
mg	Miligramos
OD	Oxígeno Disuelto
OTC	Coeficiente de Transferencia de Oxígeno
SAE	Eficiencia Estándar de Oxigenación
Seg	Segundos
SOTR	Velocidad de Transferencia de Oxígeno
T	Temperatura
V	Volts

Resumen

Ing. Jorge Eduardo Torres Reyna **Fecha de Graduación:** Noviembre 2015.

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de ingeniería Civil.

Título del Estudio: “Diseño y evaluación de un dispositivo basado en la caída de presión para la aeración sustentable a nivel planta piloto para el tratamiento del agua”

Número de páginas: 187

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en ingeniería Ambiental.

Área de estudio: ingeniería ambiental.

Propósito y Método del Estudio: Los sistemas de aeración utilizados en el tratamiento de aguas residuales, demandan cantidad de energía muy elevada, elevando los costos en el proceso depurativo del agua, hasta en un 70%. La aplicación de un sistema de aeración adecuado así como su correcto diseño, resulta imprescindible para la viabilidad técnica y económica de una estación de tratamiento de aguas residuales. Existe una gran variedad de métodos y sistemas que pueden ser utilizados en el proceso de aeración del agua. Numerosos estudios han reportado una alta eficiencia en la transferencia de gases al agua al implementar los dispositivos basados en la caída de presión implementados como sistema de aeración. El trabajo de investigación consistió en diseñar y evaluar un dispositivo hidráulico basado en la caída de presión, aprovechando el efecto Venturi. La función de este dispositivo consiste en la oxigenación de un efluente de agua. Su principal ventaja es el ahorro de energía, logrado gracias a que el oxígeno disuelto en el agua es adquirido de la atmosfera y aprovechando los sistemas de recirculación de flujo. Las pruebas se han llevado a cabo en una planta piloto, donde el flujo recircula con ayuda de una bomba, a través de un circuito de tuberías, donde se encuentra instalado el dispositivo, que se encarga de oxigenar el fluido. Se realizaron mediciones del oxígeno disuelto implementando métodos electrométricos de membrana sensible y electroquímicos.

Conclusiones y contribuciones: Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de aeración logra saturar de oxígeno todo el volumen de agua de manera homogénea en 30 min, alcanzando un 98% de la saturación, logrando así cumplir con su objetivo en poco tiempo y con bajos consumos de energía, garantizando de esta manera un ahorro considerable de recursos en el proceso de aireación.

Capítulo I

Introducción

I.1 Introducción General

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentra bajo una creciente presión. El crecimiento demográfico, la urbanización y el aumento en el consumo de agua en los hogares, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso global del agua. Algunos de los grandes inconvenientes generados, van desde el agotamiento de los recursos naturales hasta el cambio climático.

A pesar de esta condición, los usuarios del recurso hídrico y demás sectores económicos involucrados siguen satisfaciendo sus necesidades sin tomar en cuenta el impacto sobre los demás. Afortunadamente en las últimas décadas el gobierno ha implementado un marco normativo que se encarga de regular la explotación y descarga de aguas residuales a los cuerpos receptores con el fin de preservar la salud humana y de los ecosistemas. Para lograr este propósito es necesario tratar de manera eficaz las aguas residuales domésticas e industriales y de acuerdo con Banco Interamericano de Desarrollo el agua de tipo industrial colectadas y tratada pasen de 36% en 2006 a 46% en 2012 (Lahera, 2010).

Los procesos convencionales de tratamiento del agua reproducen de manera industrial el efecto depurador de los cuerpos de agua donde se efectúa la degradación de la materia orgánica. Las etapas de tratamiento mayormente empleadas son decantación, coagulación, floculación, tratamiento biológico y cloración (Manahan, 2007).

En el caso de la degradación aerobia, el oxígeno juega un papel importante para que se realice una degradación de la materia orgánica. Desafortunadamente el oxígeno es un gas poco soluble en el agua por lo tanto es necesario que sea introducido de manera continua (Loire, 2002; Rosso *et al*, 2008). De ahí que la aeración sea un punto clave en la calidad del tratamiento del agua. No solamente asegura el requerimiento de oxígeno para la degradación bacteriana, sino además en los procesos de biomasa libre, juega un papel en la operación de mezclado y permite mantener en suspensión de la biomasa. No obstante este proceso requiere entre 45-70% de la demanda energética en una planta de tratamiento y esto representa un tercio del costo del funcionamiento (Mantilla, 2008). De ahí que en los últimos años se han desarrollado diferentes tecnologías que podrían solucionar los problemas de contaminación, y los consumos excesivos de energía.

La implementación de sistemas sustentables es una forma viable que debemos considerar para abatir estos problemas. Existe una gran cantidad de dispositivos y métodos de carácter sustentable. Un claro ejemplo de estos métodos, son los dispositivos de caída de presión implementados en los sistemas de aeración. La aeración es un fenómeno de transferencia de masa entre el aire y el agua (Dong *et al*, 2009), ésta es indispensable porque proporciona oxígeno al efluente. El oxígeno disuelto permite que se realicen procesos bioquímicos que favorecen la descomposición de la materia orgánica suspendida en el agua residual (Martínez, 2003).

Existen varios métodos y sistemas de aeración que se pueden implementar en el tratamiento de aguas residuales. Cada uno de estos tiene sus ventajas y

desventajas. En general la mayoría de estos mecanismos presentan poca eficiencia de oxigenación en relación a la energía que consumen (Bischof *et al*, 1996). Esto genera una gran inversión económica a la hora de darle el tratamiento correspondiente a las aguas residuales. La implementación de un sistema de aeración adecuado así como su correcto diseño, resulta imprescindible para la viabilidad técnica y económica de una estación de tratamiento de aguas residuales (Collado *et al*, 2009).

Por otro lado, estudios recientes sobre el mejoramiento en la transferencia de oxígeno, han reportado que los dispositivos basados en la caída de presión implementados como sistema de aeración, presentan una alta eficiencia en la transferencia de gases al agua (Tejero *et al.*, 2012). Motivo por el cual se pretende investigar el grado de eficiencia de estos dispositivos, en los sistemas de aeración de agua, midiendo el grado de oxigenación que genera en el agua, en relación a la energía que consume. Esto permitirá determinar la factibilidad del uso de los dispositivos de caída de presión en la oxigenación del agua. La finalidad primordial es generar un ahorro considerable de energía en el proceso de aeración.

Como ya se mencionó, los sistemas de aeración implementados en las plantas tratadoras de aguas residuales, requieren una gran cantidad de energía. Esta energía implementada se encuentra entre el 50% y el 70% del costo total del proceso (Manga *et al*, 2001; Ovezea, 2009). Todo esto representa un mayor gasto económico y repercusión en el medio ambiente, razón por la cual nos llevó a realizar esta investigación.

Los costos en el tratamiento de aguas residuales, al igual que cualquier proceso industrial, han de realizarse siempre con un mínimo. Así mismo, los sistemas de tratamiento de aguas dependen fundamentalmente de las características del agua de entrada, de las necesidades de calidad del agua de salida y del caudal depurado así como del diseño de los sistemas de tratamiento (Andreu, 2009). Un correcto diseño y operación del sistema de aeración, pueden asegurar la viabilidad económica de una planta tratadora de aguas residuales (Collado, 2009).

El trabajo de investigación que se presenta en este documento, consistió en evaluar un dispositivo hidráulico basado en la caída de presión. La función de este instrumento consiste en la oxigenación del agua. Este artefacto podría ser implementado en el tratamiento de aguas residuales, subterráneas o industriales. Su principal ventaja es el ahorro de energía, logrado gracias a que el oxígeno disuelto en el agua es adquirido de la atmosfera.

Dentro de la investigación, se pretende obtener el grado de oxigenación del agua, que el dispositivo de caída de presión pueda generar. Para lograr esto, el oxígeno disuelto será medido en distintos puntos del tanque donde se realizaran las pruebas. La principal finalidad de esto es determinar la eficiencia en relación al oxígeno suministrado y la energía consumida en un en un tiempo determinado, por parte del accesorio basado en la caída de presión en el proceso de aeración.

El documento inicia en el capítulo I con una pequeña introducción que describe el contenido del documento. Iniciando con la descripción de manera sucinta de la justificación del trabajo donde se trata de mencionar las causas por las cuales fue seleccionado el tema como proyecto de investigación, posteriormente se presenta la hipótesis planteada para esta investigación. Para finalizar se muestra el objetivo general y los específicos, parte en la cual se muestra la finalidad del estudio.

Al capítulo II de del documento le corresponde al área teórica de la investigación o el estado del arte. En esta parte se explicará detalladamente todos los conceptos y temas relacionados a los sistemas de aeración implementando dispositivos basados en la caída de presión, la clasificación de los diferentes sistemas de aeración así como la función del oxígeno disuelto en el agua son algunos de los temas que se presentaran en este capítulo.

En el capítulo III se refiere a la metodología de la investigación. Se describe cómo se implementaron las metodologías de la etapa experimental, explicando detalladamente la discretización del volumen de agua corriente en el tanque en estudio, la medición instrumental del oxígeno disuelto así como la posterior confirmación del fenómeno de oxigenación por rutas electroquímicas. En esta parte se realiza una descripción de tallada del área donde se realizaran los experimentos, la cual a grandes rasgos consta de un tanque cuyas dimensiones son de 190cm x 360cm por una altura de 158 cm, donde el flujo recircula en el sistema con ayuda de una bomba de agua de 3 caballos de potencia, el flujo se

moverá a través de un conducto formado por tuberías, donde ira colocado el dispositivo de diafragma (dispositivo de aeración).

En el capítulo IV se realizará la presentación, la descripción, análisis e interpretación–de los resultados. Por medio de gráficas colorimétricas se busca mostrar los perfiles de concentración del oxígeno disuelto (%) en la zona de estudio, además de las correspondientes tablas de frecuencia y la respectiva corroboración de la oxigenación del agua empleando técnicas electroquímicas tales como el barrido lineal y la medición del potencial a circuito abierto.

Para finalizar se presentaran las conclusiones donde se hablará sobre lo más destacado del trabajo, mostrando las aportaciones que esta investigación generó.

I.2 Antecedentes

A lo largo de la historia el hombre ha tenido la necesidad de transportar, almacenar y distribuir el agua para su consumo. Esta necesidad, aunada al crecimiento desmesurado de la población, ha ido generando nuevas exigencias con el transcurrir de los años. Una de estas exigencias es la que nos permite tener agua potable a la hora de abrir el grifo en nuestras casas. Para poder lograr todo esto, se debió realizar un proceso de purificación del agua. Dicho proceso se lleva a cabo en plantas potabilizadoras. Además, toda actividad humana implica una generación de aguas residuales. Estas aguas deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso (Martelo y Lara, 2012).

En las plantas de tratamiento y potabilización se llevan a cabo diferentes procesos para proporcionar al agua la calidad deseada. Cada uno de ellos, presentan un conjunto de características específicas de acuerdo a su función. Tal es el caso de los sistemas de aeración, los cuales, tienen como característica que en su mayoría requieren de una gran cantidad de energía. La energía consumida en grandes proporciones por parte de estos sistemas, implica un costo elevado en el proceso.

No obstante, existen sistemas y dispositivos de carácter sustentable. Mecanismos que permiten un ahorro considerable de energía y recursos, como por ejemplo los dispositivos de caída de presión.

Los dispositivos de caída de presión consisten en un flujo de agua que es conducida por un ducto. A medida que el flujo de agua, pasa a una zona de reducción de diámetro, ésta aumenta su velocidad. El aumento de velocidad hace que descienda la presión en determinada área del dispositivo. La caída de presión generada, permite que el flujo de aire sea aspirado hacia adentro del eyector. Para facilitar el proceso se implementan tubos piezométricos conectados a las áreas de baja presión como se muestra en la figura I.1. Esto causa una turbulencia en la zona de mezcla, donde los flujos de agua y aire se combinan en un chorro del líquido que contiene pequeñas burbujas de aire (Ghassemi y Hamidreza, 2011). De esta manera se logra optimizar el tiempo de contacto entre el oxígeno y el agua.

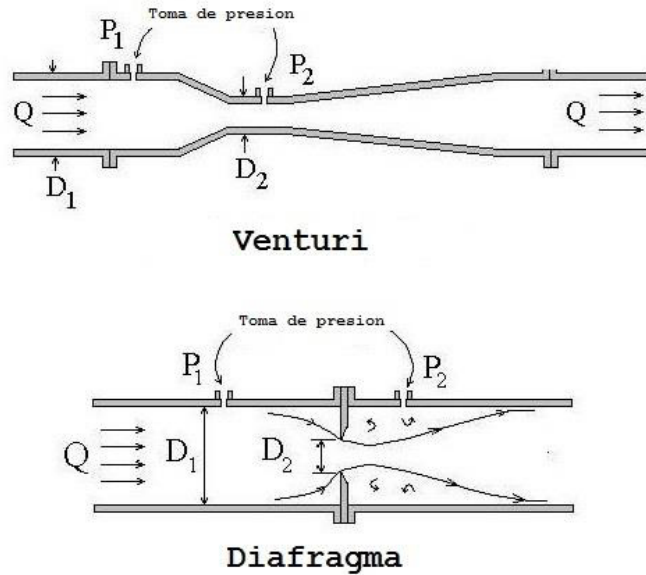


Figura I.1. Dispositivos basados en la caída de presión (modificada de www.engineeringexcelspreadsheets.com).

El dispositivo basado en la caída de presión “Venturi” ha reportado haber proporcionado tasas de transferencia de gases, en un reactor biológico, más altas que los inyectores convencionales, tales como los difusores de aire (Thalasso *et al.*, 1995).

Baylar y Ozkan en el 2005 mencionan en su estudio sobre la aplicación del principio de Venturi en los sistemas de aeración del agua, que la aeración través de dicho principio podría contribuir significativamente a la eficiencia de aeración. Por lo que, basado en la caída de presión, presentaría un alto rendimiento a la hora de implementarlo en los procesos de aeración del agua (Baylar y Ozkan, 2005).

Además en el 2003 Baylar realizó un estudio donde comparaba la tasa de aeración en una presa, generada por un vertedero rectangular y un vertedero Venturi. Se demostró que la tasa de aeración en la presa, implementando el vertedero Venturi, fue significativamente mejor que la del vertedero rectangular. Esta ventaja incrementaba a medida que la anchura de la garganta del vertedero Venturi se reducía, con la finalidad de aumentar la velocidad del flujo, lo que mejoraba el arrastre de aire (Baylar, 2003).

Piccin y colaboradores en el 2010 implementaron un sistema que consistía en un dispositivo de tipo Venturi conectado a un tubo para aspiración de aire atmosférico con la finalidad de promover la oxigenación del agua a través del aire. Realizaron un mapeo hidráulico lo que demostró las condiciones de operación del sistema implementado para la aeración. El sistema demostró una excelente eficiencia en la aspiración de aire y un bajo consumo de energía. La implementación de dicho dispositivo mostró que era posible eliminar el 98,7% del hierro presente en el agua (Piccin *et al.*, 2010).

En el 2007 Baylar describe el efecto del número de Reynolds, diámetro del orificio de entrada de aire, diámetro y longitud de la tubería, así como el diámetro de la garganta de un dispositivo Venturi, en la tasa de inyección de aire. Se pudo observar que los dispositivos Venturi tienen altas eficiencias de inyección de aire. Por lo tanto, los dispositivos Venturi implementados como sistemas de aeración, pueden aplicarse eficientemente en distintas áreas tales como; estanques, lagos, criaderos de peces, plantas de tratamiento de agua, etc (Baylar *et al.*, 2007).

En el 2007 se llevaron a cabo estudios experimentales para investigar el efecto que tenía la ubicación del orificio, en la zona de caída de presión de tal forma que genere una aspiración de aire, en dispositivos Venturi. Se observó a partir de los resultados que la ubicación del orificio juega un papel importante en la aspiración de aire. Se determinó la localización óptima de la entrada de aire que maximiza la adsorción de aire en los dispositivos Venturi implementados como sistemas de aeración (Baylar *et al*, 2007).

Baylar en el 2009 menciona en su investigación “Estructuras hidráulicas en los procesos de aeración del agua” que los dispositivos Venturi implementados como sistema de aeración mostraron una alta eficiencia, sin embargo, dichos dispositivos presentan una baja relación aire / agua corriente (Baylar *et al*, 2009).

En 1999 Gonçalves realizó una investigación con el objetivo de estudiar el uso de un dispositivo con efecto Venturi instalado en el tubo de alimentación de un reactor de aire comprimido, con la finalidad de mejorar la aeración, para esto se determinó el coeficiente de transferencia de masa y la eficiencia de la unidad de aeración. Con el propósito de aumentar la tasa de transferencia de masa, se instaló dicho dispositivo reduciendo la sección transversal de la tubería, lo que genera una turbulencia en los fluidos y un flujo de burbujas de aire mayor, en consecuencia el área de contacto entre fases incrementa lo que mejora la transferencia de masas. La tasa de eficiencia en la aeración en la transferencia de oxígeno al agua se mantuvo alrededor de 1.5 Kg O₂/ kWh (Gonçalves, 1999).

Los dispositivos de caída de presión basados en el efecto Venturi, son implementados para diferentes tareas, algunas de estas incluyen el inyectar fertilizantes, productos químicos, gases y oxígeno o aire en los sistemas de agua a presión. Por lo que es importante conocer los efectos de los diámetros de entrada y de la garganta del dispositivo basado en la caída de presión (efecto Venturi), longitud de la tubería aguas abajo del dispositivo con efecto Venturi, el diámetro de la tubería de aspiración de aire, el ángulo de la tubería aguas abajo, velocidad de flujo entrante, su densidad y la viscosidad del líquido inyectado y la tasa de inyección de líquido (Ozkan *et al*, 2006).

En junio del 2012 Rodríguez realizó pruebas experimentales en una planta operada con tres dispositivos comerciales de contacto gas-líquido diferentes: un eyector Venturi, un jet-Venturi y un difusor. De lo cual pudo determinar que el jet-Venturi ofrece la mejor transferencia de oxígeno con bajo consumo de energía en comparación con el difusor y el eyector Venturi. La aplicación práctica de la tecnología de aeración más eficiente es posible desde ambos puntos de vista técnicos y económicos (Rodríguez *et al*, 2012).

En el 2011 se presentó un estudio donde se compara la eficacia de la inyección de CO₂ en el agua de mar implementando una piedra porosa difusora de aire y un Venturi. No se observaron diferencias significativas en la eficiencia de la inyección de CO₂ utilizando velocidades de flujo de CO₂ diferentes, sin embargo, la eficiencia de inyección de CO₂ con Venturi fue de aproximadamente 100% más alta que la del difusor. Por lo tanto, es posible reducir el costo y aumentar la

eficacia de la disolución de CO_2 en agua de mar, mediante el uso de Venturi (Hong-Du, 2011).

Seis módulos de aeración fueron contruidos usando inyectoros de aire Venturi conectados en serie y paralelo, estos fueron evaluados y comparados en relación a sus coeficientes de transferencia de oxígeno (OTC), su rango estándar de transferencia de oxígeno (SOTR) y su eficiencia estándar de oxigenación (SOE) determinado por el estudio agua limpia (Clean Water). De este estudio se pudo determinar que se presentaba una mayor eficiencia para los dispositivos Venturi conectados en paralelo (Dong, 2009).

La aeración, mediante la implementación del dispositivo de caída de presión, ha sido objeto de múltiples investigaciones a lo largo de la historia. Tal como se muestra en la Tabla 1, donde se hace mención de un resumen de las investigaciones que involucran a dichos accesorios en la transferencia de grasas.

Tabla 1. Resumen de artículos.

Titulo	Autor	Revista	Año	Síntesis
Optimization of oxygen transfer through Venturi - based systems applied to the biological sweetening of biogas	Rodríguez, Ginesta; David Dorado, Antonio; Bonsfills, Anna; et al.	Journal Of Chemical Technology And Biotechnology Volume: 87 Issue: 6 Special	JUN 2012	La planta puede ser operada con tres dispositivos comerciales contacto gas-líquido diferentes: un eyector Venturi, un jet-Venturi y un difusor. El jet-Venturi ofrece la mejor transferencia de oxígeno con bajo consumo de energía en comparación con el difusor y el eyector Venturi. La aplicación práctica de la tecnología de aeración más eficiente es posible desde ambos puntos de vista técnicos y económicos.
Higher efficiency of CO2 injection into seawater by a Venturi than a conventional diffuser system	Hong Du, Junda Lin b, Chris Zuercher	Bioresource Technology 107 131-134	17 Decem ber 2011	El presente estudio compara la eficacia de la inyección de CO ₂ en el agua de mar de una piedra porosa difusora de aire y un Venturi. No se observaron diferencias significativas en la eficiencia de la inyección de CO ₂ entre las tres velocidades de flujo de CO ₂ ($p > 0,05$), sin embargo, la eficiencia de inyección de CO ₂ con Venturi fue de aproximadamente 100% ($p < 0,05$) más alta que la del difusor de aire. Por lo tanto, es posible tanto reducir el coste y aumentar la eficacia de la disolución de CO ₂ en agua de mar mediante el uso de Venturi operado a una velocidad de flujo inferior, es decir, estándar ml / min en un pequeño estanque y 4 L / min en un gran estanque 400 L/min.
CFD analysis to predict optimal air inlet hole diameter of venture tube in terms of air injection	Ahmet Baylar Cihan Aydın Mehmet Ünsal FahriÖzkan	ISSN:1306-3111 Journal of New World Sciences Academy, 3;2	Febrer o 2008	Se hizo un análisis mediante un sistema computacional de fluidos dinámicos para generar un modelo para predecir cuál sería el diámetro más eficiente para la inyección de aire en un tanque de agua mediante un dispositivo Venturi, se realizaron estudios experimentales para comprobar los resultados obtenidos por el modelo. ($Q = 12.11$ lps $D = 42$ mm, $D_t = 31.5$) diámetro de orificio piezométrico, 3, 6 y 12 mm el modelo generado fue congruente con los resultados experimentales obtenidos, siendo el orificio de 12 mm el que genera una mayor aeración.
Evaluation of six aerator modules built on Venturi air injectors using clean water test	C. Dong, J. Zhu and C. F. Miller	Water Science & Technology—WST 60.5	2009	Seis módulos de aeración fueron construidos usando inyector de aire Venturi conectados en serie y paralelo, estos fueron evaluados y comparados en relación a su coeficientes de transferencia de oxígeno (OTC), su rango estándar de transferencia de oxígeno (SOTR) y su eficiencia estándar de oxigenación (SOE) determinado por el estudio Clean Weater.
Evaluation of Ejectors Using the Venturi Effect for a Continuous Positive Airway Pressure System without Compressed Air	Jun Hayakawa, Yutaka Usuda Y Katsuo Numata	J. Anesth 3: 166-171	1989	En esta investigación se realizó una comparación de 4 eyectores de presión continua positiva. La implementación de estos dispositivos permite mezclar el aire con el oxígeno mediante el efecto Venturi. Se pudo manipular los niveles de oxígeno en el aire al aumentar la presión positiva en los dispositivos.

Tabla 1. Resumen de artículos (continuación).

Titulo	Autor	Revista	Año	Síntesis
Applications of Venturi Principle to Water Aeration Systems	AHMET Baylara, y FAHRI Ozkanb	Environmental Fluid Mechanics	2005	En esta investigación se aplicó el principio de venturo en los sistemas de aeración del agua. Se analizaron las características de aeración, dando como resultado, que estos dispositivos pueden contribuir significativamente a la eficiencia de aeración del agua.
Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate	Ahmet Baylar, Fahri Ozkan, and Mehmet Unsal	KSCE Journal of Civil Engineering	2009	En este estudio se realizaron pruebas con dispositivos que implementan el efecto Venturi para oxigenar el agua. Se realizaron pruebas con diferentes medidas en los diámetros de entrada de oxígeno de los dispositivos, logrando obtener un diámetro óptimo para maximizar la inyección de oxígeno.
Design and Performance of a bioreactor equipped with injector for high gas transfer rates	F. Thalasso, H. Naveau y E-J. Nyns.	The chemical Engineering Journal, 57 B1-B5	1995	En este trabajo, se implementó un inyector Venturi en un birreactor, con la finalidad de obtener altos tasas de transferencia de gases a los microorganismos presentes en el birreactor, permitiéndoles desarrollarse y realizar sus actividades.
The Effects Of Arbitrary Injection Angle And Flow Conditions On Venturi-Jet Mixer	Subramanian Sundararaj y Velappan Selladura!	Thermal Science, Vol. 16, No. 1, Pp. 207-221	2012	Este artículo se investigó el efecto del ángulo de inyección a chorro, de flujo cruzado y la velocidad de relación en el arrastre y la mezcla de chorro en un mezclador Venturi de chorro. Para analizar estos parámetros se implementaron 5 diferentes ángulos de inyección de chorro. Los resultados de esta investigación, muestran que el rendimiento del mezclador Venturi, puede mejorar significativamente al aumentar el ángulo de inyección y el aumento de la relación de velocidad.

I.3 Justificación

El cuidado del ambiente es un tema de gran interés que preocupa a todos en el planeta. Dado que, a consecuencia de los modelos de desarrollo urbano, económico y sociales pasados y presentes, que no han tomado en cuenta el medio ambiente, ha propiciado la manifestación de graves problemas en nuestro entorno. Algunos de los grandes inconvenientes generados, van desde el agotamiento de los recursos naturales hasta el cambio climático.

Existen muchas formas en las que se pueden solucionar los problemas de contaminación, y los consumos excesivos de energía en el planeta. La implementación de sistemas sustentables es una forma viable que debemos considerar para abatir estos problemas. Hay una gran cantidad de dispositivos y métodos de carácter sustentable. Un claro ejemplo de estos métodos, son los dispositivos de caída de presión implementados en los sistemas de aeración. La aeración es un fenómeno de transferencia de masa entre el aire y el agua (Dong, 2009), ésta es indispensable porque proporciona oxígeno al efluente. El oxígeno disuelto permite que se realicen procesos bioquímicos que favorecen la descomposición de la materia orgánica suspendida en el agua residual (Martínez, 2003). La concentración de oxígeno disuelto es un importante indicador de calidad del agua, debido a que la vida acuática depende de este para su desarrollo. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y lo bien que el agua puede soportar el desarrollo de plantas y animales en

ella. Un nivel alto de oxígeno disuelto indica una mejor calidad del agua (Baylar y Ozkan, 2005).

Existen varios métodos y sistemas de aeración que se pueden implementar en el tratamiento de aguas residuales. Cada uno de estos tiene sus ventajas y desventajas. El rendimiento y la eficiencia de aeración de estos sistemas, métodos, dispositivos y estructuras hidráulicas se ha estudiado experimentalmente por una gran cantidad de investigadores (Chanson, 1995. Gulliver *et al*, 1998. Wilhelms *et al*, 1993). En general la mayoría de estos mecanismos presentan poca eficiencia de oxigenación en relación a la energía que consumen (Bischof *et al*, 1996). Esto genera una gran inversión económica a la hora de darle el tratamiento correspondiente a las aguas residuales. La implementación de un sistema de aeración adecuado así como su correcto diseño, resulta imprescindible para la viabilidad técnica y económica de una estación de tratamiento de aguas residuales (collado, 2009).

Por otro lado, estudios recientes sobre el mejoramiento en la transferencia de oxígeno, han reportado que los dispositivos basados en la caída de presión implementados como sistema de aeración, presentan una alta eficiencia en la transferencia de gases al agua (Rodríguez *et al.*, 2012). Esta alta eficiencia les permite ser aplicados satisfactoriamente en distintas áreas tales como; estanques, lagos, criaderos de peces, plantas de tratamiento de agua, remoción de hierro, entre otras (Baylar *et al*, 2007. Piccin *et al*, 2010). Motivo por el cual se pretende investigar el grado de eficiencia de estos dispositivos, implementados como

sistemas de aeración de agua. Midiendo el grado de oxigenación que genera en el agua, en relación a la energía que consume. Esto permitirá determinar la factibilidad del uso de los dispositivos de caída de presión en la oxigenación del agua. La finalidad primordial es generar un ahorro considerable de energía en el proceso de aeración.

Actualmente los sistemas de aeración utilizados en las plantas tratadoras de aguas residuales, requieren gran cantidad de energía. Esta energía implementada se encuentra entre el 50% y el 70% del costo total del proceso (Manga *et al*, 2001; Ovezea, 2009). Todo esto representa un mayor gasto económico y repercusión en el medio ambiente, razón por la cual nos llevó a realizar esta investigación.

Los costos en el tratamiento de aguas residuales, al igual que cualquier proceso industrial, han de realizarse siempre con un mínimo. Así mismo, los sistemas de tratamiento de aguas dependen fundamentalmente de las características del agua de entrada, de las necesidades de calidad del agua de salida y del caudal depurado así como del diseño de los sistemas de tratamiento (Andreu, 2009). Un correcto diseño y operación del sistema de aeración, pueden asegurar la viabilidad económica de una planta tratadora de aguas residuales (Collado, 2009). De esta manera, el utilizar de los dispositivos basados en la caída de presión implementados como sistemas de aeración, podrían contribuir eficientemente en la viabilidad económica no solo en el tratamiento de agua, si no que, con un gran número de aplicaciones en la industria, minería, agricultura y demás áreas (Kongskilde, 2014; Alcides et al, 2004; IMTA, 2001).

I.4 Hipótesis

Si se mide y evalúa la eficiencia de un dispositivo basado en la caída de presión, implementado como sistema de aeración en el tratamiento de aguas, se podrá comparar y verificar el grado de eficiencia con respecto a otros dispositivos de aeración.

I.5 Objetivo General

Evaluar un sistema de aeración, implementando un dispositivo basado en la caída de presión, a nivel de planta piloto para el tratamiento de aguas residuales.

I.5.1 Objetivos Específicos

- Equipar un tanque piloto para llevar a cabo las pruebas.
- Determinar el grado de oxigenación del agua, mediante métodos electrométricos, (en el tanque de la planta piloto), que ofrece el sistema de aeración con el dispositivo basado en la caída de presión.
- Medir la velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SORT) en el tanque piloto aportado por el dispositivo de aeración.
- Determinar el coeficiente de oxigenación en relación al oxígeno disuelto en el tanque piloto y la energía consumida o eficiencia de aeración estándar (SAE).
- Evaluar los resultados en la eficiencia de oxigenación y comparar el ahorro de energía con otros dispositivos (sistemas de aeración mecánicos y difusores).

Capitulo II

Marco Teórico

II.1 La importancia del tratamiento de agua

En general el agua residual es aquella a la que se han incorporado productos de desecho. Las principales fuentes de aguas residuales son: Aguas domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, aguas de usos agrícolas, aguas pluviales. En México el 90% de las aguas residuales proviene del uso doméstico e industrial, y el 10% restante proviene de aguas de uso agrícola y pluvial. Sin embargo en México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado. De acuerdo a los datos obtenidos por CONAGUA a finales del 2012 sólo 47.5 % de las aguas residuales generadas reciben tratamiento (CONAGUA, 2013). Esto genera la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que ayuden en el tratamiento del agua. La depuración de aguas residuales es un tema primordial a nivel mundial, ya que es imperativo tener agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que dará origen a una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida (Romero-Aguilar *et al*, 2009). Cabe destacar que en México solo dos estados tratan el 100% de sus aguas residuales, entre los cuales Nuevo León es uno de ellos (CONAGUA, 2009).

En las últimas décadas la población en México ha experimentado un crecimiento considerable, incrementándose de manera importante el consumo de agua y, consecuentemente, el volumen de aguas residuales. En México, un volumen sustancial de aguas residuales es vertido sin previo tratamiento contaminando el

suelo y las aguas superficiales, tanto en zonas urbanas como rurales, creando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

La preocupación por las descargas de las aguas residuales y sus efectos al medio ambiente ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio

Ecológico; La Protección al Ambiente y la Ley de Aguas Nacionales, cuyo objetivo es prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos.

Además de esto se han establecido programas con la finalidad de ayudar al mejoramiento de este aspecto en el país. Entre estos programas se encuentran el

Programa de Agua Potable y Alcantarillado en Zonas Urbanas (APAZU);

Programa de Devolución de Derechos (PRODDER); Programa Federal de

Saneamiento de Aguas Residuales (PROSANEAR); Programa de Modernización

de Organismos Operadores (PROMAGUA), Programa para la Construcción y

Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales

(PROSSAPYS) y Programa de Tratamiento de Aguas Residuales (PROTAR).

A través de estos programas se proporciona apoyo técnico y económico a gobiernos municipales y estatales con el propósito de que con los recursos financieros que ellos también aporten se construyan plantas de tratamiento de aguas residuales y se encarguen de su operación.

Por medio del tratamiento de las aguas residuales se persigue reducir la incidencia de enfermedades de origen hídrico. Los beneficios de contar con agua de calidad

son innumerables, por esta razón, en México se ha creado un marco jurídico que se encarga de regular las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas:

Norma	Descripción
Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT- 1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.
Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.
Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT- 1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada el 21 de septiembre de 1998.
Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT- 2001	Establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso complejo y de suma importancia que exige un gran esfuerzo para la evaluación de las necesidades de depuración, como la caracterización de las aguas residuales. Esto último se logra a partir de diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales se incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y el pH. Es de suma importancia definir correctamente estos aspectos para poder obtener los mejores resultados en la depuración de las aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales consta de tres fases de tratamiento: primaria, secundaria y terciaria.

1. En la primaria se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia inorgánica.
2. En la secundaria se trata de reducir el contenido en materia orgánica, acelerando los procesos biológicos naturales.
3. La terciaria es necesaria cuando el agua va a ser reutilizada; elimina 99% de los sólidos y emplea varios procesos químicos para garantizar que el agua esté tan libre de impurezas como sea posible.

Por otro lado, la formulación, planeación y diseño de un sistema de tratamiento también pueden depender del objetivo o uso que se le dará al agua tratada, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, así como los criterios establecidos para descarga de efluentes o eficiencias

mínimas y, eventualmente, motivaciones ecológicas. Estos objetivos son principalmente:

1. Proteger la Salud Pública y el Medio Ambiente. Si las aguas residuales van a ser vertidas a un cuerpo receptor natural (mar, ríos, lagos), será necesario realizar un tratamiento para evitar enfermedades causadas por bacterias y virus en las personas que entran en contacto con esas aguas, y también para proteger la fauna y flora presentes en el cuerpo receptor natural.
2. El Reúso del Agua Tratada. Existen actividades en las que no se requiere utilizar agua potable estrictamente y que se pueden realizar con agua tratada, sin ningún riesgo a la salud, tales como:
 - Riego de Áreas Verdes (glorietas, camellones, jardines, centro recreativos, parques, campos deportivos, fuentes de ornato)
 - Industriales y de servicios (lavado de patios y nave industrial, lavado de flota vehicular, sanitarios, intercambiadores de calor, calderas, cortinas de agua, etc.).

El agua como bien sabemos juega un papel muy importante en la vida de todos en el planeta. Muchas actividades en el transcurrir de nuestros días involucran el uso del agua, lo que conlleva la generación de aguas residuales. Esta debe ser sometida a un tratamiento antes de su disposición en los cuerpos receptores de aguas.

El tratamiento de aguas residuales como ya se ha mencionado anteriormente consiste en una serie de operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes de toda índole presentes en el agua efluente del uso humano. Existen una gran variedad de procesos que se llevan a cabo en esta tarea, algunos ejemplos que se podrían mencionar son cribados, filtración, sedimentación, aeración, entre otros. La aeración es de suma importancia en el tratamiento de aguas residuales, dado que proporciona oxígeno al efluente que se desea tratar.

El oxígeno disuelto (DO) se define como la cantidad de moléculas de oxígeno disponible en el agua. La concentración de oxígeno disuelto es un indicador importante de la calidad del agua debido a que muchos organismos dependen de este para su existencia y desarrollo. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y lo bien que el agua puede soportar la vida vegetal y animal. A mayor nivel de oxígeno disuelto mejor será la calidad del agua.

Muchos procesos biológicos y químicos que ocurren naturalmente usan el oxígeno, disminuyendo así la concentración de oxígeno disuelto en el agua. El proceso físico de transferencia de oxígeno de la atmósfera actúa para reponer el oxígeno usado. Este proceso ha sido denominado de aeración.

Algunas estructuras y dispositivos de carácter mecánico o hidráulico pueden aumentar los niveles de oxígeno disuelto mediante la creación de condiciones de turbulencia y la generación de pequeñas burbujas de aire,

permitiendo así la distribución del oxígeno en la mayor parte del flujo. El rendimiento y eficiencia de aeración de los diferentes mecanismos y dispositivos hidráulicas, se ha estudiado experimentalmente en diferentes investigaciones (Casey, 2009; Tunstapanich, 2006; Jones *et al*, 2005).

Sin embargo, la revisión de los estudios existentes sobre el rendimiento de la aeración de las estructuras hidráulicas, indica que no hay demasiados estudios sobre la aeración implementando dispositivos basados en la caída de presión. Estos dispositivos aprovechan el diferencial de presión producido para succionar el aire de la atmosfera para después combinarlo con el efluente.

II.2 La importancia del Oxígeno disuelto en el agua

El oxígeno disuelto es indispensable para poder tener una buena calidad en el agua. El oxígeno es un elemento necesario para todas las formas de vida. Los procesos de purificación naturales requieren niveles de oxígeno adecuados para facilitar la supervivencia de las formas de vida aeróbicas tales como peces, invertebrados, plantas y bacterias aeróbicas, los cuales requieren oxígeno para la respiración (Milacron, 2004).

Gran parte del oxígeno disuelto en el agua viene de la atmósfera. Una vez realizada la disolución en la superficie, el oxígeno se distribuye gracias a la corriente y la turbulencia. La fotosíntesis producida por las algas y las plantas acuáticas también aporta una cantidad considerable de oxígeno al agua. El crecimiento de residuos orgánicos es el principal factor que contribuye a los cambios en los niveles de oxígeno disuelto. El decaimiento de los residuos orgánicos consume oxígeno y frecuentemente se concentra en el verano, cuando los animales acuáticos requieren más oxígeno para soportar altos metabolismos (Stevens Institute Of Technology, 2014).

La temperatura, la presión y la salinidad afectan la capacidad del agua para disolver el oxígeno. La relación de la disolución del contenido de oxígeno (ppm) a la capacidad potencial (ppm) da el porcentaje de saturación, que es un indicador de la calidad del agua (Seibel, 2010).

El agua de las plantas tratadoras de aguas residuales normalmente tienen grandes cantidades de materiales orgánicos los cuales son degradados por

microorganismos, estos microorganismos requieren de oxígeno disuelto para poder llevar a cabo este proceso de descomposición. (La cantidad de oxígeno consumida por estos organismos en la degradación de materia orgánica se denomina demanda bioquímica de oxígeno o DBO) (Milacron, 2004).

II.3 Los dispositivos de Aeración

La etapa de aeración en el tratamiento de las aguas residuales es indispensable porque proporciona oxígeno al efluente que se quiere tratar. Dentro de las funciones que se conoce que realiza el oxígeno está que cumple con un gran número de funciones tales como; i) la de mantener suspendida la materia orgánica en los desarenadores aerados, ii) en las cámaras de floculación el aire produce los gradientes de velocidad para generar los choques entre partículas, iii) la oxidación de hierro y magnesio disuelto de las aguas subterráneas con la finalidad de formar compuestos que puedan precipitarse y así facilitar su remoción, iv) además de proporciona oxígeno a las aguas residuales con la finalidad de mantener el nivel adecuado disuelto en el medio líquido necesario para la degradación aeróbica de la materia orgánica, siendo esta última la función principal de la aeración (Popel, 1976).

Existen diferentes métodos y sistemas que se implementan en la aeración de aguas residuales hoy en día (figura II.1), siempre con el objetivo de maximizar el contacto entre las fases líquido y gas para su adecuada transferencia de gases, tales métodos se dividen en sistemas mecánicos, por gravedad, por gas comprimido y sistemas de aspiración (Metcalf & Eddy, 1996).

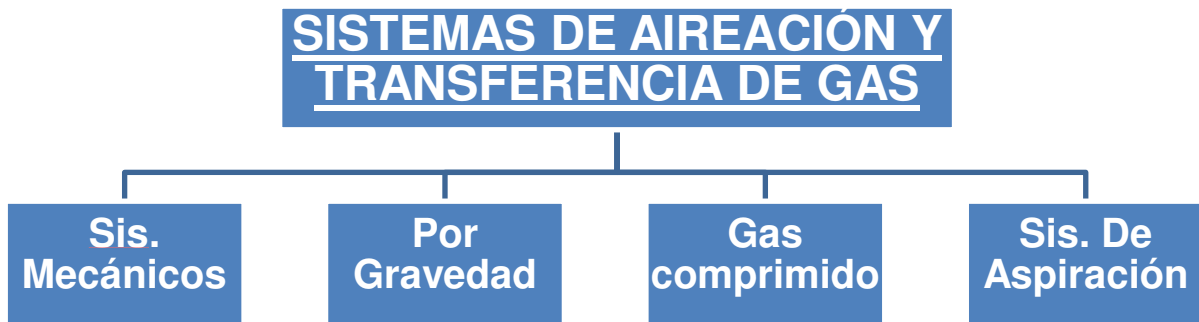


Figura II.1. Diferentes tecnologías de aeración y transferencia de gas empleadas en plantas de tratamiento.

Cada uno de estos sistemas tiene sus ventajas e inconvenientes por ejemplo, los sistemas por gravedad el agua fluye a través de canales de forma escalonada, en pendiente o de pared vertical logrando un mayor contacto del líquido con el gas de la atmosfera (Galli, 2007).

II.3.1 Sistemas Mecánicos

En los sistemas mecánicos se utiliza la energía mecánica para provocar la ruptura del agua en gotas. El aumento de la transferencia del oxígeno, se logra por el incremento en el área de la interfase aire-agua. Estos pueden ser: superficiales o bombas de aeración como se muestra en la figura 2.2 (Gally, 2007).



Figura II.2. Clasificación de los mecánicos para la inyección de aire en plantas de tratamiento.

Los sistemas superficiales o también llamados de baja velocidad están compuestos por un elemento rotativo que se asemeja a un agitador, debido a que trabaja a baja velocidad (20-100 rpm) pero muy alta torsión, es grande y robusto, su geometría es variada, su forma lo hace poco hidrodinámico teniendo alta resistencia a la rotación dentro del agua, pero el vencimiento de esta resistencia es la que genera la dispersión y la mezcla. Entre sus bondades esta la buena mezcla, la alta capacidad de bombeo, su extendido radio de mezcla y suspensión de sólidos, lo que lo hace apto para lagunas aireadas con sólidos totalmente suspendidos y lodos activados.

Datos de sistemas mecánicos superficiales.

- Peso: (43-5,000)kg
- Consumo: (1,1-150) kW
- Caudal Nominal: (2,3- 150) kgO₂/h
- Caudal:(540-16,920) m³/h

Los sistemas mecánicos soplador de aeración también conocidos como de alta velocidad o flujo axial, estos operan a la velocidad de giro de los motores

eléctricos (900-1800 rpm), por lo que no requieren de moto-reductores, están provistos de propelas marinas o tornillos, con tamaños más pequeños si se comparan con los de baja velocidad, su funcionamiento es homólogo al de una bomba, en este caso bombeando hacia la atmosfera, en algunos casos tiene un tubo axial que aumenta la profundidad de succión, intentando de esta manera mantener la mejor mezcla y suspensión de sólidos, es necesario destacar que los sistemas de alta velocidad no tiene tan buena mezcla ni suspenden sólidos con tanta eficiencia como los sistemas de baja velocidad (Metcalf & Eddy, 1996).

Sí ofrecen ventajas operativas ya que al no trabajar con pares de torsión altos, al ser mecánicamente más sencillos, son más livianos, no requieren de sistemas de anclaje robustos, incluso se puede considerarse como un equipo portátil, la mayoría de ellos flotan en los tanque o lagunas, con lo que su configuración puede ser cambiada de manera fácil y rápida.

A pesar de tener una mezcla y suspensión de sólidos no tan eficiente como otros sistemas, su fácil mantenimiento y su capacidad de transferencia de oxígeno competitiva si se compara con los sistema de baja velocidad, el valor del consumo eléctrico y la ventaja operativa los hace una opción que prevalece y puede ser utilizada en lagunas parciamente mezcladas y lodos activados.

Datos de sopladores de aeración

- Consumo:(0.75-112) kW
- Capacidad Nominal:(8-110) kgO₂/h
- Caudal de Circulación:(456-5020) m³/h

II.3.2 Sistemas por gravedad

En estos sistemas se utiliza la energía liberada cuando el agua pierde altitud al aumentar el área de contacto superficial entre el aire y el agua, esto da origen al incremento de la concentración de oxígeno en el agua. Estos son ampliamente utilizados en acuicultura, debido a que son de fácil diseño y económicos. También se les denomina aireadores de cascada. Su eficiencia depende del área de contacto agua – aire.

II.3.3 Sistemas de Gas Comprimido

Los sistemas de gas comprimido consisten en la inyección de gas a través de conductos para la generación de pequeñas burbujas de aire dentro del contenedor del líquido, generando un área de contacto entre el agua y cada burbuja. Como se muestra en la figura II.3, estos sistemas se clasifican en aire difundido como placas prosas, membranas o tubos y los de aire dispersado que a su vez se dividen en elementos móviles como rodetes o turbinas de dispersión y elementos fijos como orificios, rociadores y dispositivos de corte (Ramalho, 2003).

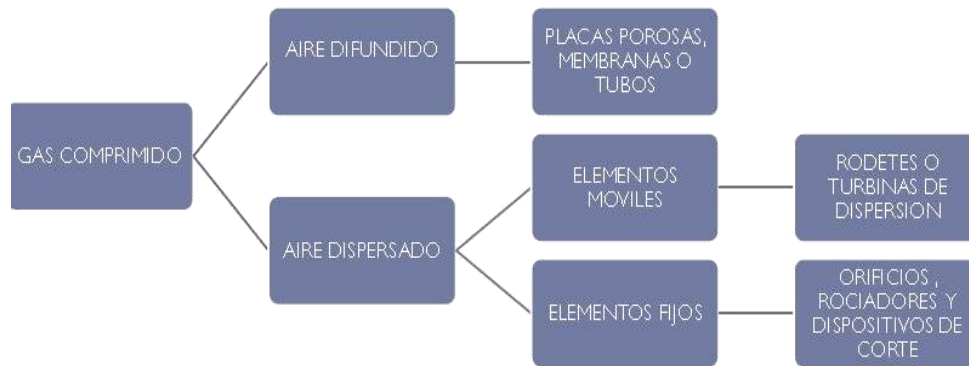


Figura II.3. Clasificación de los sistemas de gas comprimido en plantas de tratamiento.

II.3.3.1 Difusores

Los difusores aspiran el aire del medio ambiente, lo comprimen y lo conducen por una tubería hasta los difusores, donde el aire es burbujeado continuamente a través de una membrana en el reactor aerobio, para mantener la concentración de oxígeno disuelto en un valor de 1-2 mg/L. Los difusores de burbuja fina son los más eficientes de esta clasificación. Sin embargo estos se tapan por la formación de sarro y otros depósitos, en los poros del difusor, así como por la introducción de polvo y otras partículas en el aire que se inyecta, por lo que se requiere de una previa filtración del aire suministrado y de un mantenimiento mas frecuente en los difusores. Tienen una eficiencia del 12% y una velocidad de transferencia de 1.12 kg O₂/Kw- hr (Metcalf & Eddy, 1996).

II.3.3.2 Dispersores

Los dispersores generalmente llevan a cabo la aeración a través de turbinas, orificios o rociadores distribuidos a lo largo del área que se desea oxigenar, lo que permite la difusión de aire cerca de la zona de los impulsores. Los dispersores presentan una eficiencia de 25% y una velocidad de transferencia de 1.51 kg/Kw - hr. Estos presentan ciertas restricciones, deben estar a una profundidad de 4.5 m y deben tener un caudal de 17 m³ de aire por hora por cada metro lineal de tanque (Metcalf & Eddy, 1996).

II.3.4 Sistemas de Aspiración

Los sistemas de aspiración son aquellos en los cuales el gas es adquirido mediante la succión del mismo, combinando el gas succionado con el líquido que se desea airear, estos se dividen en mecánicos como las paletas huecas y los generadores de vórtices, y los hidráulicos como los son las bombas y dispositivos con efecto Venturi (Gally, 2007). Estos últimos serán objeto de estudio en esta investigación (figura II.4).

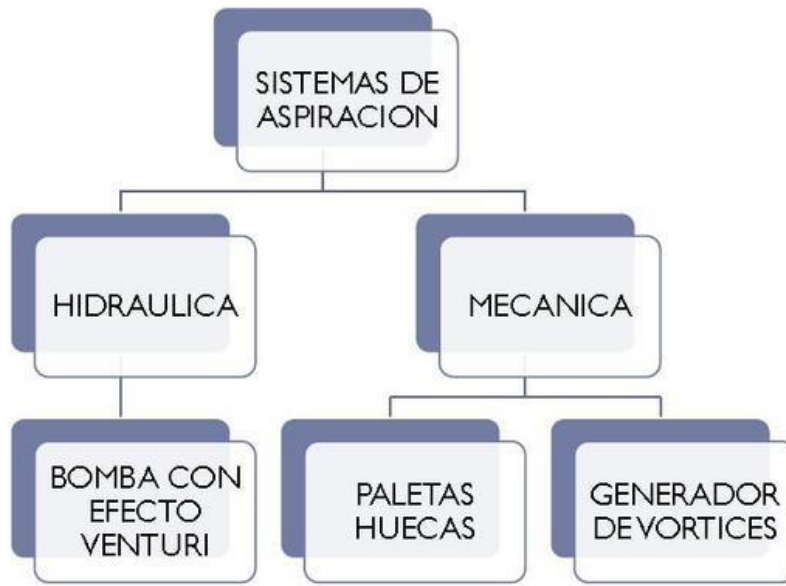


Figura II.4: Clasificación de los sistemas de aspiración de aire en plantas de tratamiento.

II.3.4.1 Sistemas de Aspiración Mecánica

En estos sistema se bombea el líquido a presión, el cual pasa por un dispositivo Venturi lo que genera una zona de caída de presión y por ende de succión donde se implementa una abertura que permite la entrada y mezcla del líquido con el gas, estos presentan una velocidad de transferencia de oxígeno que va de 0.6 a 3.6 kg/kWh.

II.3.4.2 Sistemas de Aspiración Hidráulica

Estos sistemas consisten en la implementación de turbinas que permiten la aspiración de aire mediante la generación de vórtices, estas presentan una velocidad de transferencia de 0.6 a 1 kg/kWh. Su principal desventaja es que frecuentemente presentan taponamiento en los conductos de aspiración.

II.4 Efecto Venturi

El efecto Venturi (también conocido tubo de Venturi) consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado, disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido que va a pasar al segundo conducto (figura II.5). Este efecto, demostrado en 1797, recibe su nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822) (Daugherty et al., 1985).

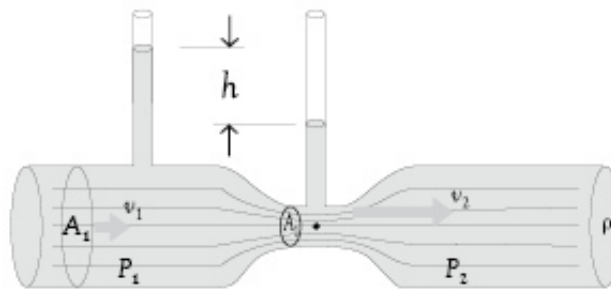


Figura II.5: Esquema de efecto Venturi.

El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la conservación de la energía mecánica, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente.

Para la ecuación de Bernoulli (1) tenemos que:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$$

Donde 1 y 2 son los subíndices que indican los puntos 1 y 2; P_1 y P_2 son las presiones; “ γ ” es el peso específico; Z_1 y Z_2 son elevaciones; V_1 y V_2 son las velocidades y g es la aceleración gravitacional (Baylar *et al*, 2009).

II.5 Dispositivos basados en la caída de presión.

Consisten básicamente de una reducción gradual o brusca de la sección transversal de la tubería, ocasionando con esto un aumento de velocidad y una disminución de la presión en el fluido. Relacionando la variación de presión con la velocidad, es posible cuantificar el gasto. Entre estos dispositivos se encuentran el Venturi, el tubo Dall, la tobera y el diafragma o placa orificio. Aunque el principio de funcionamiento de estos medidores es el mismo, la geometría constructiva de cada uno impone diferencias básicas en el comportamiento hidráulico del agua al atravesar el medidor, tal como es la pérdida de carga.

Cuando un fluido circula a través de un conducto de sección transversal variable como lo es el caso de estos dispositivos, su velocidad cambia de punto a punto a lo largo del conducto. Se presentan los siguientes casos:

1. Conducto convergente: es cuando la sección transversal disminuye, por lo que la velocidad aumenta y la presión disminuye.
2. Conducto divergente: ocurre cuando la sección transversal aumenta, con lo cual la velocidad disminuye y la presión aumenta.

Los dispositivos basados en la caída de presión están constituidos por dos partes distintas, cada una con una función diferente. La primera, conocida como elemento primario, es la parte del sistema que está en contacto directo con el agua y proporciona algún tipo de interacción con el flujo. La segunda, el elemento secundario, es la parte del sistema que transforma estas interacciones en lecturas

o registros deseados. En otras palabras los elementos primarios son las partes localizadas dentro de la tubería, mientras que los elementos secundarios son los accesorios localizados fuera de la tubería. Estos son los dispositivos para medir la presión en la tubería. La por lo general se realizan tomas de presión y el instrumento más común para registrarla es el manómetro.

En la figura II.6 se muestran las partes que integran los dispositivos basado en la caída de presión. El tubo Venturi se compone de tres secciones:

1. Entrada
2. Garganta
3. Salida

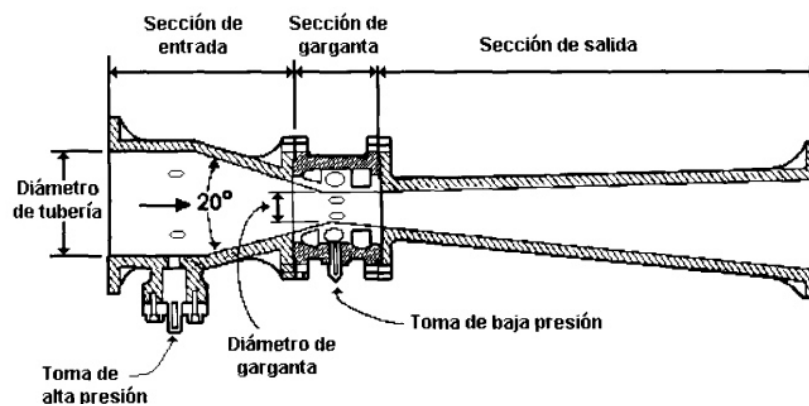


Figura II.6: Partes de un dispositivo Venturi.

La sección de entrada tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería y una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta y deberá contar con un ángulo de inclinación de 21° ; la salida consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería. La toma de presión alta deberá estar a una distancia de la sección cónica de la mitad del

diámetro de la tubería, y la toma de presión baja deberá estar a la mitad del diámetro de la garganta de cada extremo de sección cónica de entrada y de salida (figura II.7).

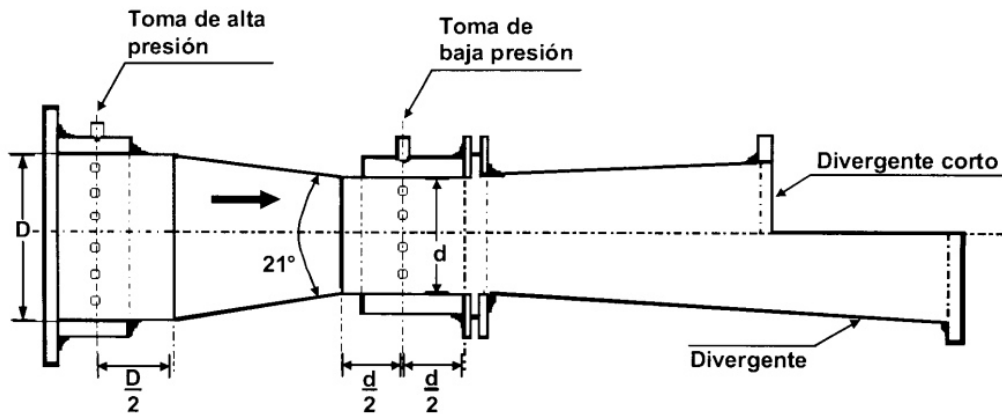


Figura II.7: Dimensiones constructivas para dispositivo Venturi.

II. 6 Otros dispositivos similares.

II.6.1 Cono de aeración de flujo descendente

Este es un dispositivo de forma cónica y su funcionamiento es simple, el agua y gas (ya sea oxígeno puro, ozono u otros gases) entran desde arriba a una velocidad relativamente alta, con ayuda de una bomba, el agua mueve las burbujas hacia abajo (figura II.8). Como el cono se ensancha la velocidad se reduce. Las burbujas no disueltas se mantienen volviendo a la parte superior, de modo que sólo el agua sin burbuja puede salir de la parte inferior. A mayores presiones, la concentración de oxígeno disuelto se puede incrementar significativamente por encima de la saturación.

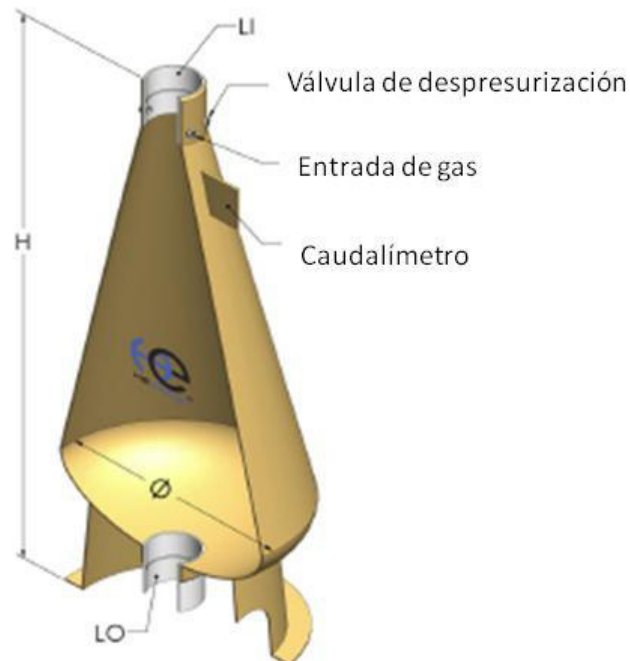


Figura II.8: esquema de un cono de aeración de flujo descendente, modificado de "integrated-aqua.com".

El principio de este dispositivo se explica con la ley de Henry la cual menciona que en condiciones de estado estacionario, las presiones parciales de los gases disueltos en el agua, mantiene un equilibrio con los gases de la atmosfera que los

rodea. Cuando se disminuye la presión de los gases sobre el agua, la cantidad de gas disuelto también disminuye. De igual manera a presiones mayores, la cantidad de gas disuelto es mayor por unidad de volumen, por lo que el grado de saturación aumenta conforme aumenta la presión (Rogers, 2009).

Este dispositivo permite optimizar la transferencia de oxígeno en gran medida. Pueden proporcionar niveles de oxígeno disuelto de 25 a 50 mg/L, muy por arriba del grado de saturación común del agua. La variación entre el rango de eficiencia obtenido está en función de la tasa de flujo, el tamaño del cono, la temperatura y la presión (Rogers, 2009).

II.7 Transferencia de gases.

Fenómeno físico acompañado de cambios químicos, bioquímicos y biológicos mediante el cual, moléculas de un gas son intercambiadas entre un líquido y un gas a una interface gas – líquido dando como resultado el incremento de la concentración de gas o gases en la fase líquida en tanto ésta fase no esté saturada con el gas a determinadas condiciones dadas, tales como: presión, temperatura (absorción del gas) y un decremento cuando la fase líquida está sobresaturada (desorción o escape de gas). Existen diferentes teorías que explican el mecanismo de transferencia de gases, como la teoría de la doble capa por Lewis y Withman de 1924, el modelo de penetración de Higbie de 1935 y la teoría de renovación superficial por Dankwets de 1951. Sin embargo la teoría más usada para entender el mecanismo de la transferencia de gases es la de doble capa (Metcalf and Eddy 1991).

La teoría de la doble capa es un modelo físico donde se establece, que la tasa de transferencia se puede expresar en términos de un coeficiente global de transferencia y las resistencias en ambos lados de la interface (gas-liquido). En estas fases se presenta una resistencia al paso de las moléculas de gas de una fase a la otra (figura II.9). En el caso de gases poco solubles, la capa ofrece una mayor resistencia al paso de las moléculas de gas, de la fase gaseosa a la fase líquida, mientras que para el caso de gases más solubles es la capa gaseosa la que presenta una mayor resistencia (Metcalf and Eddy 1991; Stenstrom et al. 2006).

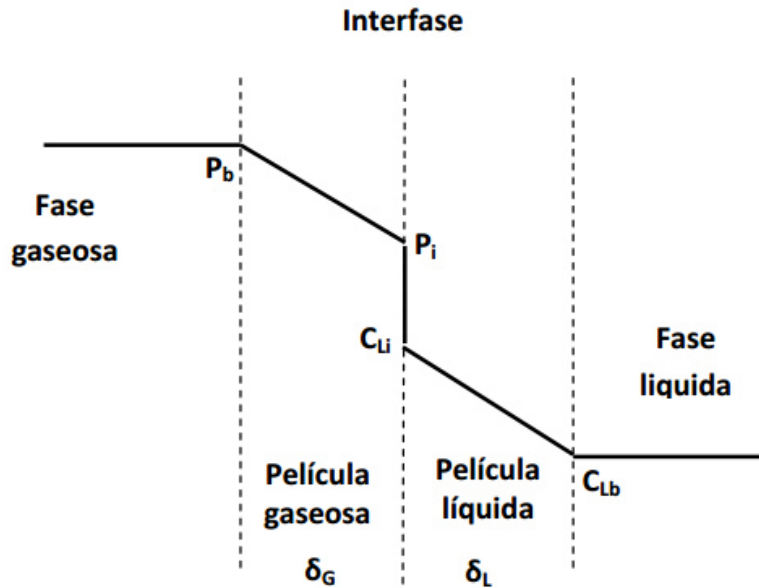


Figura II.9: Esquema de la teoría de la doble capa (Chapra, 1997).

Donde:

δ_L = Espesor de película líquida.

δ_G = Espesor de la película de gas.

C_{Li} = Concentración de oxígeno en la película líquida de la interfase.

C_{Lb} = Concentración de oxígeno en el volumen líquido.

P_i = Presión parcial de oxígeno en la película de gas de la interfase.

P_b = Presión parcial de oxígeno en el volumen gaseoso.

En este modelos se realizan las siguientes suposiciones:

1. Perfil de concentración lineal a través de la película inactiva.
2. Condiciones de estado estable.
3. Equilibrio instantáneo en la interface.
4. El transporte por difusión no es una limitante.
5. Las soluciones están diluidas, por lo tanto se aplica la ley de Henry.
6. Existe flujo laminar en las películas de gas y agua.

Según la teoría del modelo, el gas se moviliza por difusión molecular a través de la película líquida y se distribuye por difusión turbulenta a través del líquido. Por tanto la velocidad de transferencia del gas depende de la resistencia de cualquier de las dos películas (gaseosa o líquida). La velocidad de difusión a través de la película de gas es proporcional a la concentración de soluto en la masa de aire y en la película delgada de gas (Kiely and Veza 1999). La difusión en la película de agua es controlada por la diferencia en concentraciones entre C_{Li} y C_{Lb} . En la película de gas, existen menos moléculas de gas en comparación con la densidad elevada de moléculas en la película de agua, por lo tanto la resistencia a la difusión en la película del líquido es mayor que la de la película del gas (Chapra, 1997; Kiely and Veza, 1999).

La transferencia de masa de oxígeno, que representa la cantidad de soluto absorbido por unidad de tiempo por la difusión a través de las dos películas se muestra a continuación (Lewis and Whitman, 1924).

Se tiene un N_0 que representa la transferencia de oxígeno en condiciones de estado estable:

$$N_{oG} = N_{oL} \quad (1) \text{ (no hay acumulación de gas en la película líquida)}$$

De acuerdo a la primera ley de Fick, se obtiene:

$$N_{oG} = K_G a \left(\frac{P_b M_w}{RT} - \frac{P_i M_w}{RT} \right) \quad (2)$$

$$N_{oL} = K_L a (C_{Li} - C_{Lb}) \quad (3)$$

Donde:

k_L = Coeficiente de transferencia de masa en la película líquida.

k_G = Coeficiente de transferencia de masa en la película gaseosa.

a = área de la interfase.

M_W = Peso molecular.

Igualando las ecuaciones 2 y 3 tenemos:

$$K_G a \left(\frac{P_b M_W}{RT} - \frac{P_i M_W}{RT} \right) = K_L a (C_{Li} - C_{Lb}) \quad (4)$$

Para eliminar la presión parcial, utilizamos la ley de Henry:

$$P_b = H C_\infty \quad (5)$$

$$P_i = H C_{Li} \quad (6)$$

Donde:

H = Coeficiente de Henry para O_2 en agua.

C_∞ = Concentración de oxígeno en el agua en equilibrio con el volumen de gas parcial.

El objetivo es resolver para la concentración de la interfase C_{Li} , ya que esta cantidad es esencialmente imposible de determinar. Sustituyendo las ecuaciones

5 y 6 dentro de la ecuación 4 y aplicado que $H \left(\frac{M_W}{RT} \right)$ se tiene:

$$K_G (H_C C_\infty - H_C C_{Li}) = K_L (C_{Li} - C_{Lb}) \quad (7)$$

Se despeja C_{Li}

$$C_{Li} = \left(\frac{k_b H_C C_\infty + k_L C_{Lb}}{k_L + k_G H_C} \right) \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación 8 en la 3 se obtiene:

$$N_0 = k_L \left(\frac{k_b H_C C_\infty + k_L C_{Lb}}{k_L + k_G H_C} \right) \quad (9)$$

$$N_0 = k_L \left(\frac{k_b H_C C_\infty + k_L C_{Lb} - k_L C_{Lb} - k_G H_C C_{Lb}}{k_L + k_G H_C} \right) \quad (10)$$

$$N_0 = \left(\frac{k_b k_G H_C}{k_L + k_G H_C} \right) (C_\infty - C_{Lb}) \quad (11)$$

$$N_0 = \left(\frac{k_L}{\frac{k_L}{k_G H_C} + 1} \right) (C_\infty - C_{Lb}) \quad (13)$$

Ahora tenemos que:

K_L = Coeficiente global de transferencia de masa

Se tiene:

$$N_o = K_L (C_\infty - C_{Lb}) \quad (14)$$

Aplicando la misma relación a la película de gas, se puede obtener:

$$N_o = K_G (P_b - P_\infty) \quad (15)$$

Donde:

P_∞ = Presión parcial de oxígeno en el gas, en equilibrio el volumen de concentración líquida.

II.8.- Oxígeno Disuelto

El Oxígeno Disuelto (OD) es una distribución física de moléculas de oxígeno en el agua. Se puede utilizar como punto de referencia para determinar el grado de contaminación en el que se encuentra el agua o de lo bien que puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Greenpeace, 2007).

El oxígeno disuelto naturalmente en el agua proviene del oxígeno en el aire. Parte del oxígeno disuelto en el agua es el resultado de la fotosíntesis de las plantas acuáticas, por lo que ríos con muchas plantas en días de sol pueden presentar sobresaturación de OD. Otros factores como la salinidad, o la altitud (debido a que cambia la presión) también afectan los niveles de OD (Stevens Institute Of Technology, 2014).

Además, la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD) depende de la temperatura. El agua más fría puede contener más oxígeno en ella que el agua más caliente (Seibel, 2010).

Los niveles de oxígeno disuelto típicamente pueden variar de 7 y 12 partes por millón (ppm o mg/L). A veces se expresan en términos de Porcentaje de Saturación.

Los niveles bajos de OD pueden encontrarse en áreas donde el material orgánico (vertidos de depuradoras, granjas, plantas muertas y materia animal) está en descomposición. Las bacterias requieren oxígeno para descomponer desechos orgánicos y, por lo tanto, disminuyen el oxígeno del agua (Stevens Institute Of Technology, 2014).

II.9 Métodos para la determinación de oxígeno disuelto

Entre los métodos implementados para determinar el oxígeno disuelto, se encuentra el método yodométrico (o de Winkler), este es un método ampliamente utilizado, sin embargo, es muy laborioso, además es necesario en la mayoría de los casos, contar con un analista entrenado en la determinación del punto final de la valoración, para lograr buenos resultados, además este método o sus modificaciones están sujetos a errores graves debidos a interferencias (Mayari *et al*, 2005).

Existen otros métodos para la determinación del oxígeno disuelto, entre los que se encuentran los métodos de determinación por electrodo de membrana o métodos electrométricos. El método electrométrico es de gran utilidad, por su rápida manipulación y obtención de resultados así como la alta precisión con la que cuentan (APHA, 1998).

II.10 Técnicas electroquímicas

A lo largo de este proyecto se han utilizado diferentes técnicas electroquímicas para diversos fines, como la activación de los electrodos, su caracterización o la calibración previa de estos antes de efectuar las medidas de oxígeno. Las principales técnicas utilizadas han sido la voltamperometría cíclica, linear sweep o barrido lineal y la cronoamperometría; de las cuales se hablará a continuación.

II.10.1 Voltamperometría cíclica

Esta técnica se basa en la realización de un barrido triangular de potencial, iniciando en un potencial E_i hasta llegar a un potencial E_f y retornar de nuevo al potencial inicial, o bien a un segundo potencial diferente (Bontempelli y Toniolo, 2009).

Al aplicar el barrido triangular de potencial y registrar la variación de la intensidad respecto al voltaje aplicado, se obtiene un voltamperograma como se muestra en la figura II.10, que será de gran utilidad para el análisis de procesos redox.

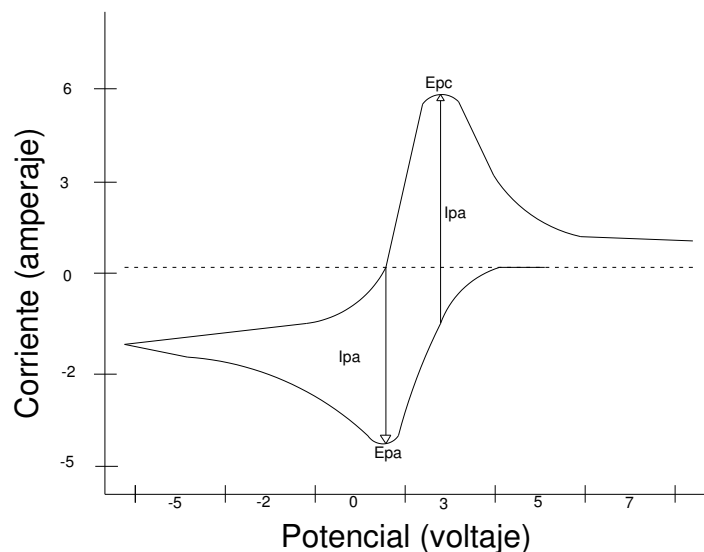


Figura II.10: ejemplo de Voltoamperograma (elaboración propia).

En el voltamperograma, en el supuesto de realizar el barrido inicialmente en sentido anódico, se observa que al alcanzar cierto potencial aumenta notablemente la intensidad, debido a la reacción de oxidación. Del mismo modo, al realizarse el barrido en sentido contrario se observa un pico de intensidad al producirse la reacción de reducción como se puede apreciar en la figura II.10 (Duan, 2013).

II.10.2 Barrido lineal

En la voltamperometría de barrido lineal, o linear sweep, se realiza un barrido de potencial desde un potencial E_1 hasta un potencial E_2 , a velocidad de barrido constante, y se registra la corriente que circula a través del electrodo de trabajo, como se muestra en la figura II.11 (Bontempelli y Toniolo, 2009).

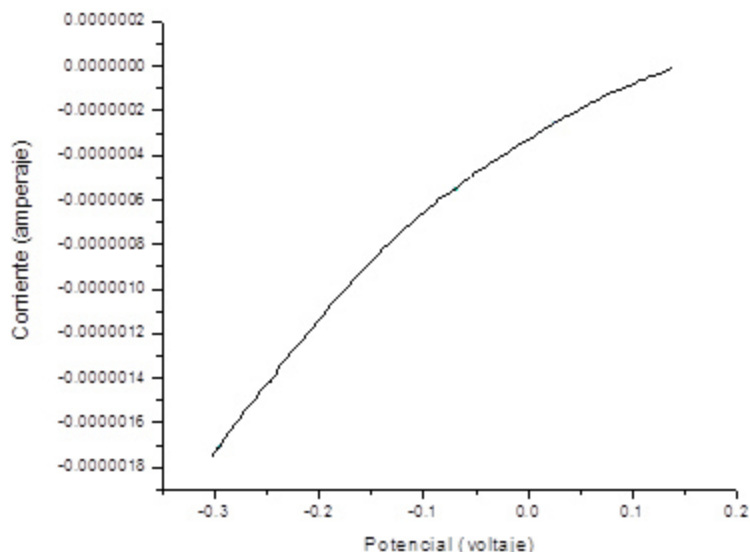


Figura II.11: Curva característica del barrido lineal. (Elaboración propia)

La forma característica de este tipo de voltamperogramas (Figura II.11) se explica de manera análoga a la de los voltamperogramas cíclicos. En el caso del voltamperograma anterior, al comenzar el barrido el potencial inicial no es suficiente para reducir las especies en el medio, al ir aumentando el potencial se observa un primer aumento de la intensidad, señal de que se está produciendo una reacción de reducción del analito, esta intensidad aumenta hasta alcanzar un pico máximo, tras el que retorna a la línea base. Esto se explica debido a que en este punto la reacción se encuentra limitada por la difusión del analito, la cual no es suficiente para mantener la concentración de analito estable en la superficie del electrodo, dando lugar a una menor transferencia de electrones y en consecuencia una disminución de la intensidad registrada (Ananth, 2009).

Esta técnica aporta mucha información cuantitativa de los analitos en solución, dado que la intensidad pico registrada en la reacción redox de la especie

estudiada está relacionada con la concentración de ésta. Del mismo modo se puede obtener información cualitativa de las especies en solución, dado que cada especie tiene un potencial característico de oxidación/reducción (Ananth, 2009).

II.11 Importancia de la eficiencia de los sistemas de aeración

Uno de los procesos más importantes implementados en el tratamiento de aguas residuales, es el de los lodos activados, y un elemento fundamental de este proceso, es el sistema de aeración necesario para la cobertura de la demanda de oxígeno. Anteriormente no se le daba la importancia adecuada al elevado consumo de energía que implica la aeración, pero la eficiencia energética en estos sistemas, comienza a ser un tema importante en la correcta gestión de las plantas tratadoras de aguas residuales.

En la actualidad se utilizan diferentes procesos para eliminar los contaminantes orgánicos del agua en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales que asegure su uso para el futuro. Los lodos activados es uno de los procesos más comunes como ya se ha mencionado anteriormente, en el cual se utiliza un estanque con microorganismos en suspensión. Este proceso, consiste en inyectar aire dentro del agua en forma de burbujas, requiere que el aire comprimido bombeado dentro del agua se distribuya uniformemente. De esta forma conseguiremos un tratamiento óptimo. Los microorganismos que actúan en el proceso de aeración degradan la materia orgánica del agua a tratar, para ello es necesario suministrar cantidades adecuadas de oxígeno que garanticen la supervivencia de los microorganismos para que crezcan y puedan consumir la materia orgánica.

Sin embargo el proceso de aeración se caracteriza por tener un elevado consumo energético que, suele situarse en el intervalo del 50-70% del consumo de energía

total de una planta tratadora, dependiendo del tipo de sistema de aeración y tamaño del mismo. Por otro lado, coste de inversión inicial representa únicamente una fracción que va del 15% al 25% del total.

La importancia de esto pone en evidencia, la necesidad de aplicar todas las técnicas y conocimientos disponibles para obtener una eficiencia máxima de los sistemas de aeración (Remtavares, 2009).

II.11.1 Eficiencia de los sistemas de aeración.

Cada uno de los diferentes sistemas de aeración presentan diferentes capacidades y eficiencias en la aeración, en la tabla 2 se muestran algunos de los sistemas más usados con sus valores en eficiencia estándar (en agua limpia) y bajo condiciones reales (en agua residual).

Tabla 2: Eficiencia de los sistemas de aeración (Metcalf y Eddy, 2002).

Sistema de aeración	Eficiencia de aeración kg O ₂ /kWh	
	Estándar	Condiciones reales
Sistemas de difusores		
Burbuja fina	1.2 - 2.0	0.7 - 1.4
Burbuja media	1.0 - 1.6	0.6 - 1.0
Burbuja grande	0.6 - 1.2	0.3 - 0.9
Sistema de turbina	1.2 - 1.4	0.7 - 1.0
Sistema de mezclador estático	1.2 - 1.6	0.7 - 0.9
Chorro	1.2 - 2.4	0.7 - 1.4
Sistema de oxígeno puro		
Aeración superficial y generación criogénica		1.4 - 1.8
Aeración superficial y generación por adsorción con presión alternativa		1.0 - 1.3
Turbina y generación criogénica		1.2 - 1.5
De superficie de baja velocidad	1.2 - 2.4	0.7 - 1.3
De superficie de baja velocidad con tubo de aspiración	1.2 - 2.4	0.7 - 1.4
Aireador flotante de alta velocidad	1.2 - 2.4	0.7 - 1.3
Aireador de rotor de cepillo	1.2 - 2.4	0.7 - 1.3

II.11.2 Eficiencia de aeración y su determinación.

Los aireadores se califican en función de la cantidad de oxígeno (kg o lb) que pueden transferir al líquido por cada kWh (o potencia) consumido, a esto se le llama "eficiencia de aeración", entre mayor sea este valor, mejor será la eficiencia del dispositivo. El rendimiento de un aireador deberá determinarse bajo las condiciones a las cuales fue diseñado el dispositivo. Sin embargo, debido a las variaciones que se presentaban en los resultados debido a la presencia de los microorganismos en aguas residuales, los sistemas se evalúan con agua limpia principalmente, además se siguen otras condiciones de funcionamiento

estandarizadas como la temperatura, el volumen de agua que se airea, las dimensiones de los dispositivos de aeración entre otras cosas.

Existe una amplia gama de eficiencias de aeración para los diferentes sistemas de aeración existentes, estas van desde los 0.13 a los 15 kg O₂/kWh, de acuerdo a diferentes investigaciones realizadas mediante pruebas en agua limpia, siguiendo el método estándar ASCE/EWRI 2-06 publicado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Sin embargo, la mejor estimación de la eficiencia de aeración de un aireador en particular, sólo puede obtenerse mediante la ejecución de sus propias pruebas mediante el siguiente procedimiento ASCE/EWRI 2-06.

Antes de realizar la prueba, el agua necesita ser desoxigenada mediante la adición de sulfito de sodio (150 mg/L) y cloruro de cobalto (1 mg/L). Una vez que el nivel de oxígeno disuelto (OD) en agua llega a cero, se inicia de aeración y el nivel de OD en el agua se registra a intervalos de 1 minuto hasta que se aproxima a la saturación. La prueba normalmente se repite tres veces y se obtienen los valores medios para todas las mediciones. Además de realizar la medición del oxígeno disuelto, la temperatura también deberá ser registrada mediante un termómetro.

Los métodos no estacionarias adoptadas por ASCE se emplean para determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno, $k_L a$. La variación de la concentración de oxígeno en el agua, como una función del tiempo, se da como sigue.

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_\infty - C) \quad (16)$$

Donde C es la concentración de oxígeno en el agua (mg/L); C_{∞} es el valor del punto de determinación de la concentración de DO constante cuando el tiempo tiende a infinito (mg/L); t es el tiempo (h); k_{La} es el coeficiente global de transferencia de masa (h^{-1}).

La integración de la ecuación entre los límites $C = C_0$ en el tiempo $t = 0$ y $C = C_t$ en $t = t$, k_{La} puede determinarse a partir de la pendiente de una gráfica semi-logarítmica del déficit de concentración ($C_{\infty} - C$) en función del tiempo de aeración. La relación de este modo se puede dar como:

$$(k_{La})_T = \frac{\ln(C_{\infty} - C_0) - \ln(C_{\infty} - C_t)}{t} \quad (17)$$

Donde \ln representa logaritmo natural de las variables dadas y la C_{∞} concentración, C_0 y C_t se expresan en mg/L.

El coeficiente de transferencia de masa, k_{La} , está en función de la temperatura. A fin de comparar los coeficientes para los resultados obtenidos bajo diferentes temperaturas, la siguiente ecuación se puede usar para ajustar los coeficientes obtenidos a la condición estándar ($T = 20^{\circ} C$).

$$(k_{La})_{20} = \frac{(k_{La})_T}{1.024^{(T-20)}} \quad (18)$$

Donde $(k_{La})_{20}$ es el coeficiente global de transferencia de masa a $T = 20^{\circ} C$ (h^{-1}); $(k_{La})_T$ es el coeficiente global de transferencia de masa en la temperatura del agua de prueba (h^{-1}); T es la temperatura del agua ($^{\circ} C$).

Una regresión no lineal se adopta para estimar k_{La} y C_{∞} . Estas estimaciones se ajustan a las condiciones estándar (20 ° C la temperatura del agua, la concentración de DO cero y una atmósfera) .La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados k_{La} , correspondiente a al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito. Y entonces el valor SOTR se divide por la potencia consumida para obtener la eficiencia de aeración estándar (SAE).

$$SOTR = k_L a (C_{\infty 20}) V \quad (19)$$

Cuando k_{La} es k_{La} ajustada a 20 ° C; $C_{\infty 20}$ es el estado estacionario de la concentración de oxígeno disuelto ajustado a 20 ° C y una presión barométrica estándar de 1 atmósfera; V es el volumen de agua en el tanque de prueba.

Por lo tanto:

$$SAE = \frac{SOTR}{\text{consumo de potencia}} \quad (20)$$

La eficiencia de aeración estándar (SAE) es la relación entre la cantidad de oxígeno transferida al agua y la cantidad de energía utilizada. Esta se expresa en kg O₂/kWh.

II.12.- Consumo de oxígeno microbiano

En las aguas residuales se ven involucradas diferentes tipos de masas tales como la masa orgánica, la biomasa, entre otras. Estos materiales constituyen solo una pequeña parte de las aguas residuales, pero pueden estar presentes en cantidades suficientes para provocar daños a la salud pública así como al medio ambiente. Esto es debido a que cualquier cosa que pueda ser desechado a través del inodoro, el drenaje, alcantarillado, o se pueda encontrar en las aguas residuales, ya sea industriales o domésticas, pueden presentar una gran cantidad de contaminantes. Los componentes de aguas residuales que son generalmente los de mayor preocupación son aquellos que tienen el potencial de causar enfermedad o efectos ambientales perjudiciales. Existen muchos tipos de organismos vivos en las aguas residuales, pero algunos de estos microorganismos presentes en el agua también contribuyen en el tratamiento de la misma (Chalasanani y Sun, 2007).

El principal papel que juegan los microorganismos en el proceso de lodos activados es el convertir la materia orgánica disuelta y particulada (medida como demanda bioquímica de oxígeno DBO) en masa celular, es decir degradar la materia. Por ejemplo en un proceso de lodos activados convencional, los microorganismos utilizan el oxígeno disuelto para descomponer los residuos, el cual utilizan como alimento para su crecimiento y supervivencia. Con el tiempo y conforme el agua residual se mueve a través del tanque de aeración, el sustrato (materia orgánica) disminuye a medida que los microorganismos lo utilizan en

presencia del oxígeno para su crecimiento y reproducción teniendo como resultado el crecimiento de la masa celular (concentración de SSVLM) (Wisconsin Department of Natural Resources, 2010).

Cuando un sistema de lodos activados se pone en marcha, en un inicio, el lodo activado es muy joven, los organismos que están operando que pueden verse bajo el microscopio son normalmente amebas y algunos flagelados. Durante la fase de crecimiento, como el licor mezclado de sólidos suspendidos (MLSS) se genera y la edad del lodo aumenta, ahora podremos ver organismos como flagelados y nadadores libres. Cuando los sólidos suspendidos del licor mezclado y el lodo alcanzan su nivel óptimo para el tratamiento, los organismos flagelados se reducen y nadadores libres ciliados así como los ciliados acechados se presentaran en mayor abundancia, conforme el lodo activado sea más viejo, será más común ver microorganismos tales como ciliados asechadores y rotíferos. Si el lodo es demasiado viejo, los rotíferos y nemátodos dominaran en presencia (Wisconsin Department of Natural Resources, 2010).

Para ver el comportamiento de los microorganismos presentes en el lodo activado se llevan a cabo pruebas para medir la Tasa de Captación de Oxígeno, con esto se puede medir la cantidad de oxígeno que se consume en un lapso determinado de tiempo.

La cuantificación de la dependencia de la tasa de consumo de oxígeno celular (OUR) sobre la presión parcial de oxígeno es útil para el diseño y prueba de dispositivos bioartificiales que utilizan células. En 1994 Foy y otros

desarrollaron un dispositivo para obtener la dependencia de OUR de la presión parcial de oxígeno para las células que requieren de anclaje, cultivadas en placas de cultivo estándar. Esta técnica permite predecir de las condiciones del biorreactor tales como: caudal, densidad celular, la distancia de la celda de flujo, y la fase gas oxígeno - presión parcial que puede conducir a limitaciones de oxígeno (Foy *et al*, 1994).

En el 2004 Eyer y colaboradores Investigaron diferentes métodos para determinar la tasa de consumo de oxígeno (OUR) en el cultivo de células animales, utilizando un espectrómetro de masas de alta calidad, con esto lograron desarrollar un nuevo método que permite mejorar el estudio de la cinética de cultivos de células animales, con ayuda de este método fue posible encontrar una correlación entre una rápida disminución entre la tasa de consumo de oxígeno (OUR) y la concentración de glutamina (Eyer *et al*, 2004).

CAPITULO III
METODOLOGÍA
EXPERIMENTAL

III.1 Introducción

El tipo de investigación que se llevó a cabo fue experimental, esta consistió en realizar una serie de pruebas de laboratorio, en las cuales se medirá el oxígeno disuelto en el agua, generado por un dispositivo basado en la caída de presión instalado en una planta piloto, tomando en consideración la energía consumida por la bomba de agua encargada de recircular el flujo en el sistema en tiempo de una hora.

Para apoyar la investigación experimental se llevó a cabo una revisión de la literatura sobre temas relacionados a la implementación de dispositivos basados en la caída de presión como sistemas de aeración, esto con la finalidad de tener presentes los conceptos básicos del tema.

III.2 Fundamentos de la Determinación del Oxígeno Disuelto

III.2.1 Métodos para la determinación de oxígeno disuelto

Hay dos métodos que se utilizan comúnmente para determinar la concentración de oxígeno disuelto en muestras de agua: la titulación de Winkler (método yodométrico) y la técnica de electrodos de membrana. Los detalles de cada uno de estos métodos se encuentran en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992) y en Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes (1979).

El método yodométrico es el más exacto de los dos. La concentración de oxígeno disuelto se determina a través de una serie de reacciones de oxidación-reducción. Sin embargo es un método muy laborioso y es necesario tener la capacitación adecuada para poder utilizar este método.

El método del electrodo de oxígeno ofrece varias ventajas sobre el método de titulación, porque es un método rápido, elimina o minimiza interferencias, permite el monitoreo continuo y la realización de mediciones in situ. Sin embargo, este método no es tan exacto como el método de titulación. Los electrodos modernos dependen de una membrana que es selectivamente permeable, dejando entrar oxígeno disuelto en la celda de medición, lo que permite eliminar la mayoría de las interferencias.

III.2.2 Sondas de oxígeno disuelto

Los sensores de oxígeno son dispositivos encargados de medir la concentración de oxígeno disuelto en el sistema en estudio. Las sondas de oxígeno disuelto presentan claras ventajas frente a métodos tradicionales como el de Winkler, en cuanto a rapidez en la obtención del resultado, sencillez operacional, robustez y movilidad que permiten el seguimiento en línea y en tiempo real de cualquier sistema o proceso.

Hoy en día existen diferentes tecnologías que permiten este tipo de medida, como son: los sensores electroquímicos, infrarrojos, de ultrasonidos y recientemente el laser.

III.2.3 Electrodo de Clark

El tipo de electrodo más ampliamente utilizado es la sonda de Clark, tiene una excelente sensibilidad, rapidez, y el rango necesario para medir con precisión el oxígeno disuelto (Wise *et al*, 1985). Patentado en 1959, por el Dr. Clark, supuso un gran avance respecto a las técnicas tradicionales (Crison, 2005).

Los electrodos de Clark se basan en la existencia de un ánodo y un cátodo sumergidos en un electrolito (figura III.1). El oxígeno llega al sensor mediante difusión a través de una membrana permeable que separa la muestra y el electrolito y es reducido en el cátodo, dando lugar a una corriente eléctrica

medible, que se relaciona con la concentración de oxígeno en el medio (Crison, 2005).

Se diferencian dos tipos principalmente:

- a) Sensor polarográfico, al que se le debe aplicar un potencial para efectuar la medida.
- b) Sensor galvánico, el cual genera un potencial relacionado con la concentración de oxígeno.

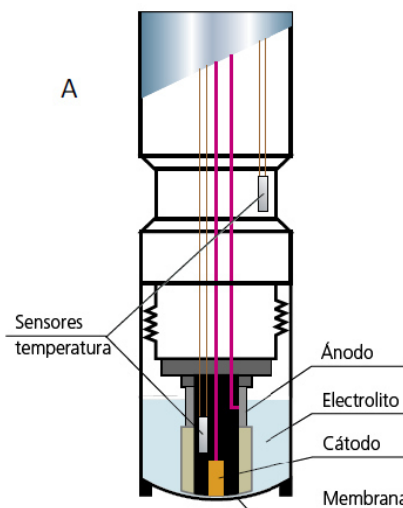


Figura III.1: Esquema básico de una sonda de oxígeno disuelto comercial del tipo sonda de Clark (Ibáñez, 2010).

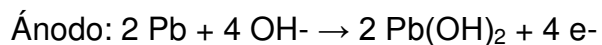
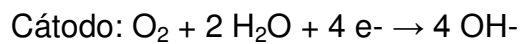
La reducción de oxígeno se produce en el cátodo, normalmente de oro (Au) o platino (Pt), que actúa tanto de cátodo como de catalizador de la reacción (Nei,

1995). El ánodo normalmente es de plomo y electrodo de referencia es de Ag/AgCl (Sciarra, 2004 y Suzuki *et al*, 1998).

El electrolito soporte proporciona la conductividad necesaria para la celda, siendo habitualmente una solución de KOH (Suzuki *et al*, 2000). La membrana es selectiva al oxígeno, de teflón FEP (fluoretileno-propileno) (Nei, 1995).

Los sensores de oxígeno disuelto disponen de un sensor de temperatura y ajustan la calibración del instrumento según las condiciones de medida.

Las reacciones que intervienen en el sistema son las siguientes (Nei, 1995):



La corriente producida por la reducción de oxígeno en el cátodo es proporcional a la concentración de oxígeno disuelto en la muestra.

III.3 Descripción del Sistema Experimental a Nivel Piloto

III.3.1 Características Generales

La parte experimental se realizó en un tanque cuyas dimensiones son de 158 cm de alto por 190 cm de ancho por 360 cm de largo, como se muestra en la figura III.2. El tanque capta un volumen máximo para el experimento de $7.4m^3$. Cuenta con un circuito de tuberías (585 cm de longitud y 5 cm de diámetro), donde se transporta el flujo de agua.

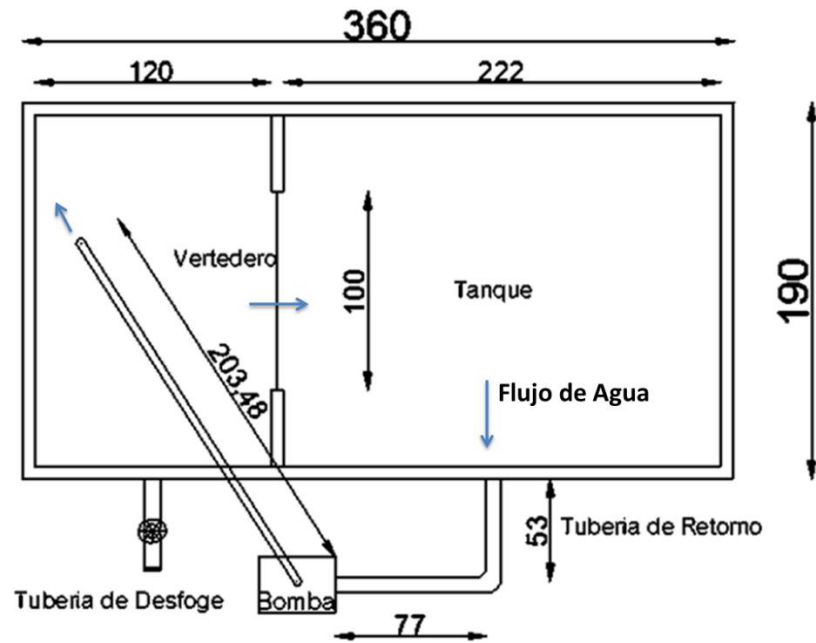


Figura III.2. Vista en planta de planta piloto (medidas en cm).

III.3.2 Descripción de dispositivo basado en la caída de presión.

Se acopló un dispositivo basado en la caída de presión en dicho circuito a 128 cm de la salida del ducto. En este punto se reduce su diámetro, esto genera un área donde la presión disminuye. En los puntos donde se presenta la caída de presión,

se colocaron 2 tubos piezométricos de 1 cm de diámetro. La colocación de estos tubos permite una entrada de aire debido al vacío obtenido por la disminución de presión como se muestra en la figura III.3 lo que da paso a la aeración del flujo de agua como se puede observar en la figura III.4.

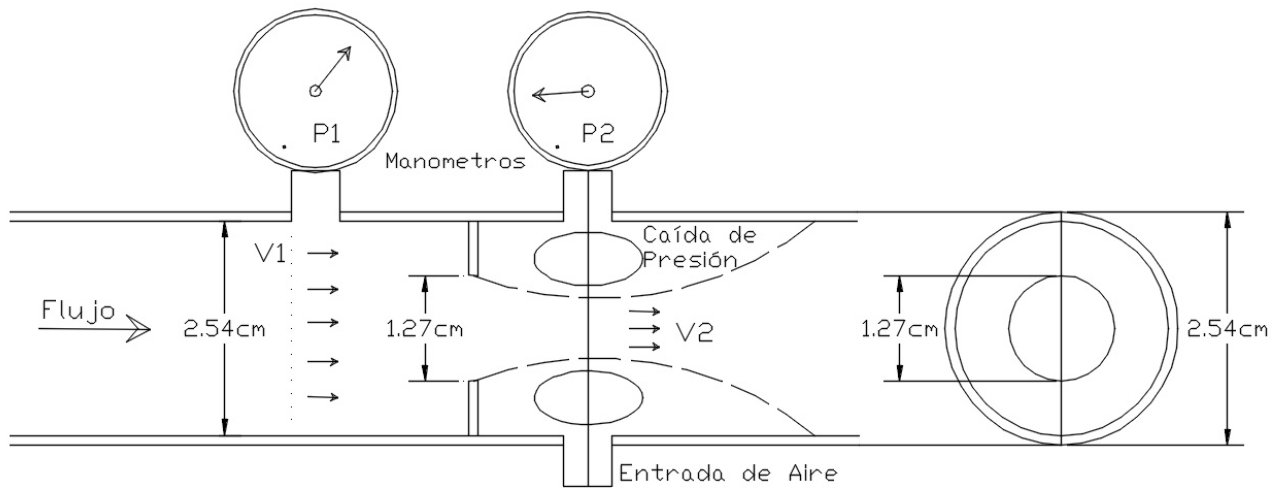


Figura III.3. Dispositivo de caída de presión implementado.



Figura III.4: fotografía de dispositivo basado en la caída de presión en proceso de aeración.

III.3.3 Descripción de línea de conducto del agua.

El flujo recircula en el sistema con la ayuda de una bomba de agua tipo centrifuga de 2 caballos de potencia como se puede observar en la figura III.5. El agua pasa de la bomba al conducto como se puede observar en la figura III.6, al llegar al dispositivo basado en la caída de presión el fluido es aireado mediante el proceso antes explicado. El fluido oxigenado sale a un tanque contenedor de 2.78 m^3 . Posteriormente, el agua al pasar una altura de 120 cm, vierte en otro tanque de mayor tamaño (4.6 m^3), a través de un vertedero de sección circular, para iniciar nuevamente el proceso.

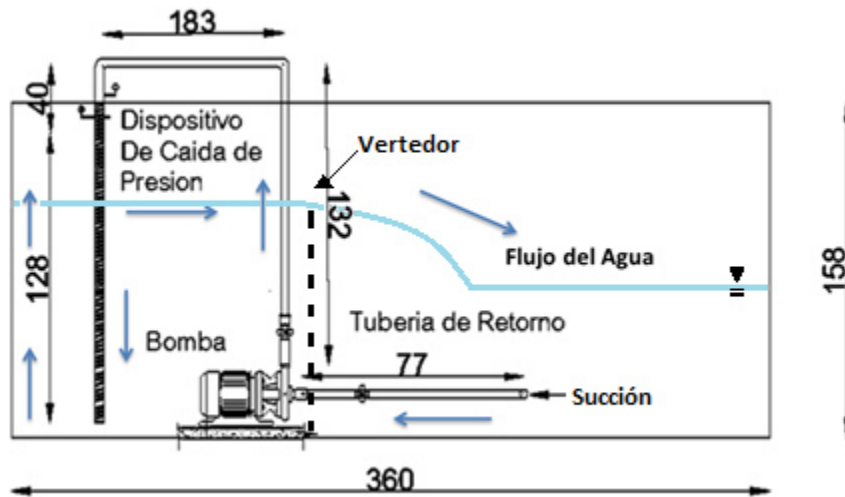


Figura III.5. Vista de perfil de planta piloto (medidas en cm).



Figura III.6: Fotografía de planta piloto.

III.3 Descripción de la sonda de análisis

La cantidad de oxígeno disuelto es medido mediante un dispositivo portátil denominado “Thermo Scientific Orion Star A329”.

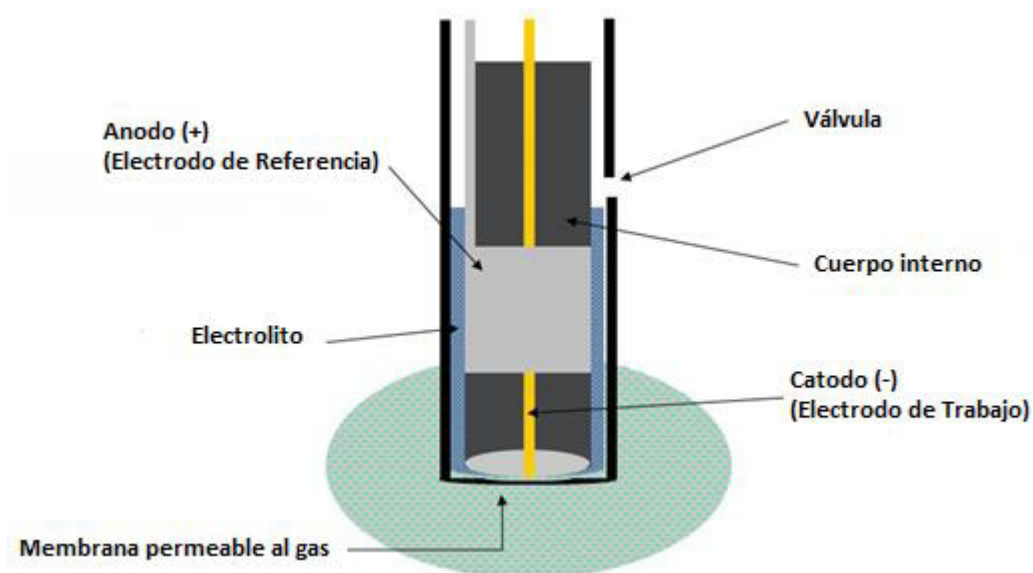


Figura III.7. Esquema básico de una sonda de oxígeno disuelto comercial del tipo sonda de Clark.

El principio del equipo se basa en el método electrométrico de membrana sensible, como se muestra en la figura III.7. Donde la reducción de oxígeno se produce en el cátodo, normalmente de oro, que actúa tanto de cátodo como de catalizador de la reacción, mientras que el ánodo es de plomo. En el interior de la sonda, se tiene un electrolito el cual proporciona la conductividad necesaria para la celda, siendo normalmente una solución de KOH. En la punta de la sonda se

encuentra una membrana de teflón FEP (fluoretileno-propileno) es selectiva al oxígeno (figura III.7).

Para medir el oxígeno disuelto con este dispositivo, se debe colocar la punta de la sonda en el agua, dentro de los botones con los que cuenta el aparato, se presiona el que dice “scan” (escanear en español), el proceso de escaneo iniciara y demorara alrededor de 1 minuto en arrojar los resultados del análisis. El resultado aparece en la ventana en unidades de mg/L o partes por millón (ppm), aunado a esto muestra la temperatura del agua que se está analizando.

El dispositivo portátil cuenta con las siguientes dimensiones 24cm x 10cm x 6.5cm. Cuenta con tres sondas como se puede observar en la figura III.8, la primera sonda permite medir el pH, la segunda sonda se puede utilizar para medir la salinidad, y la tercera sonda se implementa para medir el oxígeno disuelto. La sonda puede hacer mediciones en un rango de 0.00 mg/L a 50.0 mg/L con una precisión de ± 0.1 mg/L en medidas inferiores a los 8mg/L, de ± 0.2 mg/L en medidas que van de los 8 a 20mg/L y $\pm 10\%$ en lecturas que van de los 20mg/L a los 50mg/L. La sonda solo se requiere calibrar al cambiar la membrana permeable al oxígeno, esto se realiza una vez al año.



Figura III.8: Sonda comercial “thermo scientific orion star”.

III.4 Técnicas Instrumentales para Evaluación del Oxígeno Disuelto

III.4.1 Determinación de Oxígeno disuelto in-situ

La metodología se desarrolló en 2 etapas. En la primera etapa, se realizaron mediciones de la adsorción del oxígeno con respecto al tiempo de aeración. Para esta etapa del estudio se mantuvo aireando el sistema durante 3 horas con 30 minutos, durante este periodo de tiempo, se tomaron lecturas del oxígeno disuelto a cada 3 minutos en el puto (C8, F1) como se muestra en la figura III.9. Esto permitió determinar el tiempo en el que se obtiene la máxima oxigenación.

La segunda etapa consistió en la medición del oxígeno disuelto con respecto al espacio, es decir en todo el volumen en estudio, con la finalidad conocer la sensibilidad de las mediciones a 90 minutos. Para este propósito se trazó una malla en la superficie del tanque, se utilizó hilo de hilo de cáñamo blanco para la elaboración de la malla, se colocó un marco de madera en el perímetro de la planta piloto donde se clavaron tachuelas en los puntos discretizada para después colocar el hilo en cada uno de los puntos de extremo a extremo formando así la malla. La planta piloto está discretizada con una cuadrícula cuyas dimensiones constan de 18 cm de ancho por 23 cm de largo en cada uno de los casos, de esta manera se tiene 48 puntos donde se realizaron mediciones del oxígeno disuelto como se muestra en las figuras III.9 y III.10. Con respecto a la profundidad del tanque también se establecieron puntos de muestreo a cada 20 cm por lo cual se obtuvieron 5 niveles de profundidad (20, 40, 60, 80 y 100 cm).

Una vez establecidos los puntos de muestreo se realizaron las mediciones en un intervalo de tiempo de 90 minutos, en cada nivel de profundidad (48 puntos para cada nivel). En este punto es importante mencionar que, en ambas etapas se tomó el oxígeno disuelto contenido en el agua del tanque 2 y en el tanque 1 antes de iniciar el proceso de aeración, es decir el oxígeno disuelto inicial. Este fue tomado a 40 cm de profundidad.

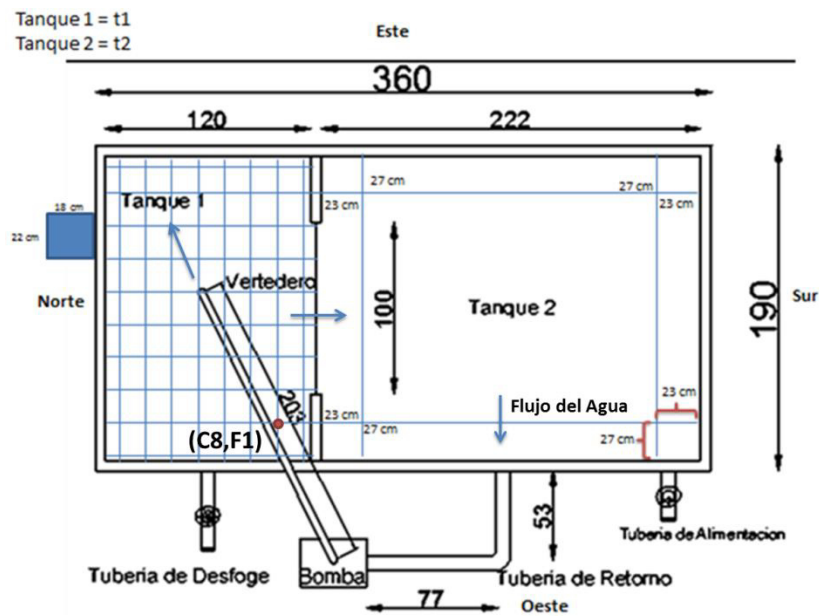


Figura III.9. Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto, Vista en planta de planta piloto, las medidas están en cm (elaboración propia).



Figura III.10: cuadrícula de referencia para puntos de medición.

III.5 Determinación de oxígeno disuelto inicial.

Antes de iniciar las pruebas se tomó el oxígeno disuelto contenido en el agua del tanque 1 y 2, es decir el oxígeno disuelto inicial. Este fue tomado a 40 cm de profundidad. También se midió la temperatura del agua en ese momento.

El oxígeno disuelto inicial para el tanque 1, fue tomado en 9 puntos diferentes. Los puntos laterales están ubicados a 23 cm y 27 cm de cada borde respectivamente y los puntos centrales a 95 cm y 60 cm del borde respectivamente como se muestra en la figura III.11.

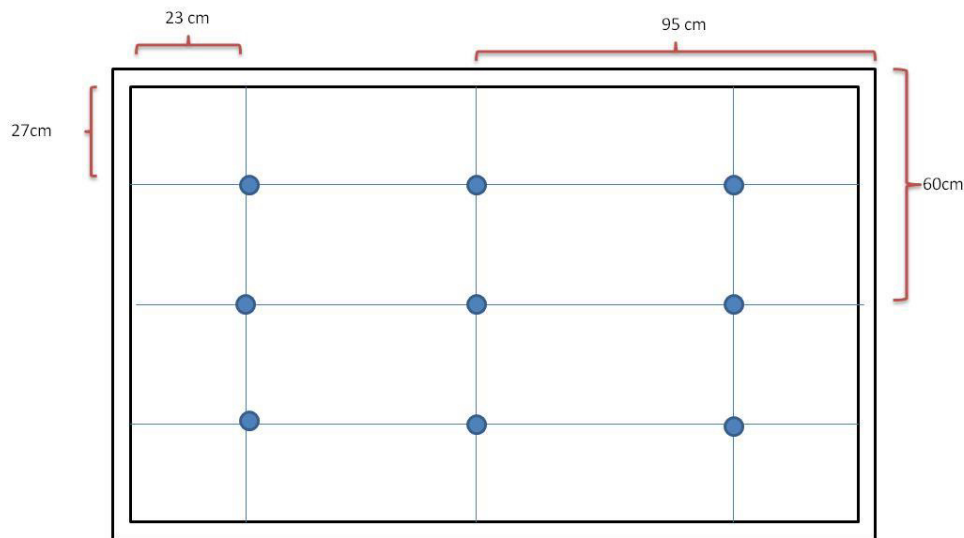


Figura III.11: Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto inicial en el tanque 1.

El oxígeno disuelto inicial para el tanque 2, fue de igual manera que para el tanque uno, se implementaron 9 puntos donde se tomaron las medidas. Los puntos laterales están ubicados a 23 cm y 27 cm de cada borde respectivamente y los

puntos centrales a 95 cm y 111 cm del borde respectivamente como se muestra en la figura III.12.

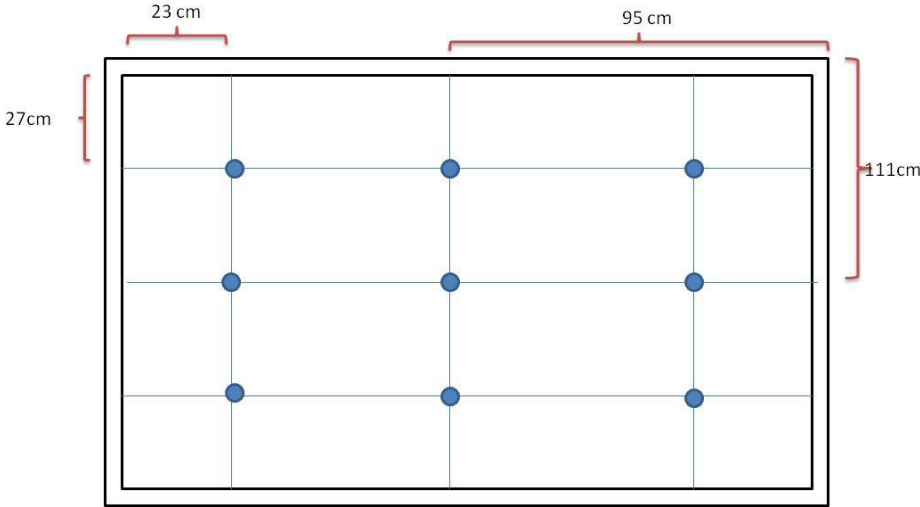


Figura III.12: Ubicación de puntos de medición de oxígeno disuelto inicial en el tanque 2.

III.6 Descripción de pruebas.

Se realizaron 18 pruebas en diferentes días; al terminar cada prueba, se dejaron pasar 14 días para la etapa 1, y 7 días para la etapa 2 antes de realizar otra prueba, esto con la finalidad de que el oxígeno disuelto en el agua de la planta piloto se liberara o consumiera y se procediera a oxigenarla nuevamente en la siguiente prueba.

III.6.1 Pruebas de la etapa uno

Prueba 1 y 2: Para la primera etapa del experimento, se midió el oxígeno disuelto aportado por el dispositivo de caída de presión en el agua, con respecto al tiempo, para esto se realizaron 3 pruebas, para la prueba 1 y 2 se realizó el proceso de aeración con el dispositivo durante 80 minutos, durante este tiempo se tomaron medidas del oxígeno disuelto cada 2 minutos.

Prueba 3: para la prueba 3 se mantuvo el proceso de aeración por un tiempo de 195 minutos, durante los cuales se tomaron las medidas del oxígeno disuelto aportadas por el dispositivo cada 3 minutos. La finalidad de realizar esta prueba por mayor tiempo, es para corroborar que, a pesar de mantener un prolongado tiempo de aeración, el agua al llega a su punto de saturación, alrededor de los 60 minutos, los niveles de oxígeno disuelto se mantienen estáticos a partir de este tiempo.

III.6.2 Pruebas de la etapa dos

Prueba 1: se realizó la medición del oxígeno disuelto en diferentes lapsos de tiempo de aeración, estos tiempos fueron de 5, 10, 20 y 40 minutos, entre cada lapso de tiempo se tardó una hora en realizar la toma del grado de oxígeno disuelto existente en los 48 puntos discreteados (figura III.13).

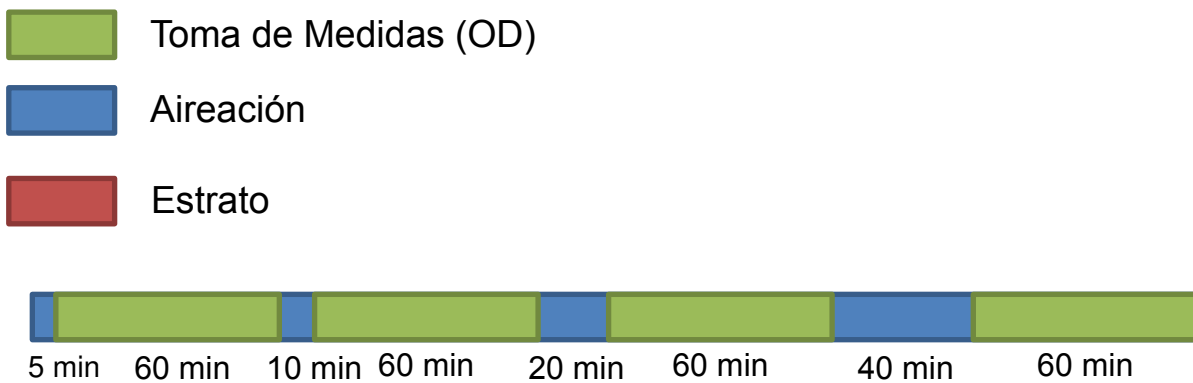


Figura III.13: representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 1.

Prueba 2: se realizó la medición del oxígeno disuelto en diferentes estratos de profundidad, estos estratos estaban a 20, 40, 60, 80 y 100 centímetros de profundidad, y se mantuvo una aeración en una sola iteración de tiempo que constó de 90 minutos. Entre cada estrato se tardó una hora aproximada en realizar la toma del grado de oxígeno disuelto existente en los 48 puntos discreteados contenidos en cada estrato, se llevó un total de 4.5 horas para medir todos los puntos (figura III.14).

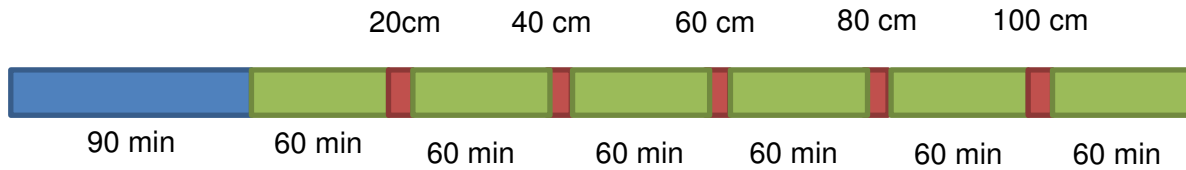


Figura III.14: representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 2.

Prueba 3: se realizó la medición del oxígeno disuelto en un solo estrato de 20 centímetros de profundidad, y se mantuvo una aeración en una sola iteración de tiempo que constó de 60 minutos (figura III.15).



Figura III.15: representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 3.

Prueba 4: se realizó la medición del oxígeno disuelto para un solo nivel de profundidad (40cm) en diferentes lapsos de tiempo de aeración, estos tiempos fueron de 5, 15 y 60 minutos, entre cada lapso de tiempo se tardó una hora en realizar la toma del grado de oxígeno disuelto existente en los 48 puntos discreteados (figura III.16).



Figura III.16: representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 4.

Prueba 5: se realizó la medición del oxígeno disuelto para todos los niveles de profundidad (20, 40, 60, 80, 100 cm). Se realizó una prueba por semana para medir el oxígeno disuelto de cada nivel. El tiempo de aeración implementado para esta prueba fue de 90 minutos, se llevaron 60 minutos de tiempo en la toma de las medidas de oxígeno disuelto de los 48 puntos para cada nivel. Esto se realizó con la finalidad de ver la variación que existía entre los datos obtenidos, al medir todos los niveles en una sola prueba llevada a cabo en un día y al medirlos un nivel cada 7 días, repitiendo todo el proceso de aeración para cada prueba (figura III.17).

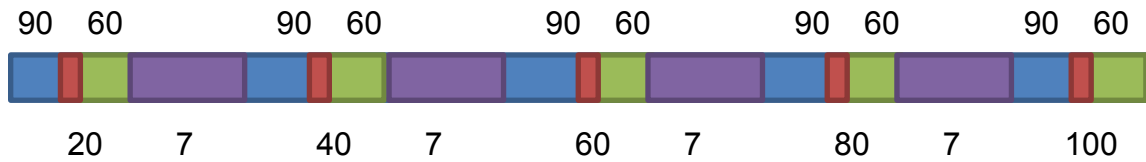


Figura III.17: representación gráfica de distribución de tiempos en las mediciones y tiempos de aeración de la prueba 5.

Posteriormente, se realizaron 3 pruebas más iguales a la prueba 2, por que se determinó qué era la que ofrecía mejor información para la investigación.

III.7 Caracterización Electroquímica

Para corroborar y respaldar los resultados obtenidos mediante el dispositivo portátil, se implementó un método electroquímico.

Los ensayos electroquímicos comprendieron las determinaciones de potencial a circuito abierto, y de barrido del agua común. Para tal efecto se instaló el siguiente experimento. En una alícuota de 100 mL se colocó en un matraz de 5 bocas donde se introdujo un termómetro, un medidor de pH y 3 electrodos (electrodo de trabajo de platino (Pt), paladio (Pd) o de oro (Au) de 1cm^2 de superficie, el electrodo de referencia (Ag/AgCl), y un contra electrodo de grafito) para tener un mejor control del experimento. Los electrodos fueron conectados a un potencióstato (μ AUTOLABIII- Compact Design).

La voltamperometría de barrido lineal es un método en el que se determina la corriente en el electrodo de trabajo mientras se hace un barrido lineal del potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. Este análisis se desarrolló en la misma celda descrita en el párrafo anterior y la técnica se basa en la reducción de la molécula de oxígeno en el cátodo de platino, siendo este el electrodo de trabajo.

III.7.1 Voltamperometría cíclica

Esta técnica se basa en la realización de un barrido triangular de potencial, iniciando en un potencial E_i hasta llegar a un potencial E_f y retornar de nuevo al potencial inicial, o bien a un segundo potencial diferente (Bontempelli y Toniolo, 2009).

Al aplicar el barrido triangular de potencial y registrar la variación de la intensidad respecto al voltaje aplicado, se obtuvo un voltamperograma como se muestra en la figura III.18, que será de gran utilidad para el análisis de procesos redox.

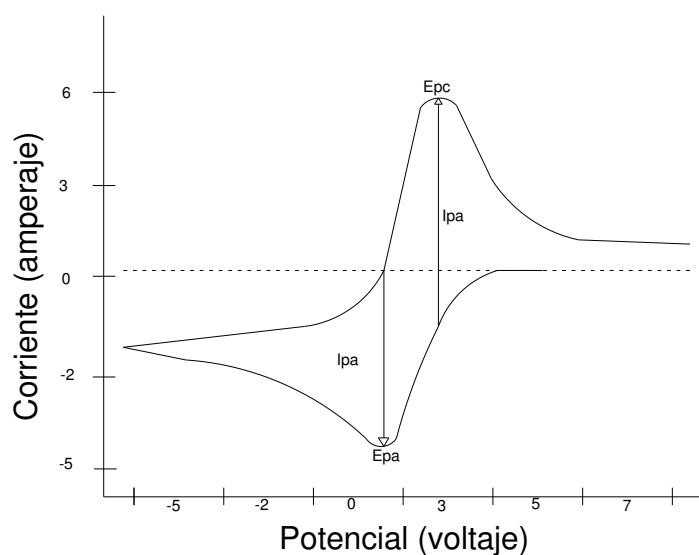


Figura III.18: Curva característica de un Voltamperograma (elaboración propia).

En el voltamperograma, en el supuesto de realizar el barrido inicialmente en sentido anódico, se observó que al alcanzar cierto potencial aumenta notablemente la intensidad, debido a la reacción de oxidación. Del mismo modo, al realizarse el barrido en sentido contrario se observó a un pico de intensidad al

producirse la reacción de reducción como se puede apreciar en la figura III.18 (Duan, 2013).

III.7.2 Linear Sweep

En la voltamperometría de barrido lineal, o “linear sweep”, se realizó un barrido de potencial desde un potencial E1 hasta un potencial E2, a velocidad de barrido constante, y se registró la corriente que circula a través del electrodo de trabajo, como se muestra en la figura III.19 (Bontempelli y Toniolo, 2009).

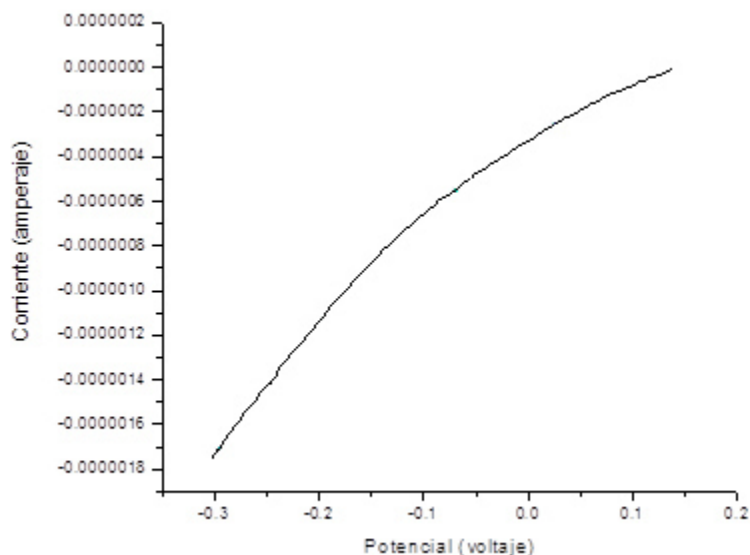


Figura III.19: Curva característica de barrido lineal. (Elaboración propia)

La forma característica de este tipo de voltamperogramas (Figura III.19) se explica de manera análoga a la de los voltamperogramas cíclicos. En el caso del voltamperograma anterior, al comenzar el barrido el potencial inicial no es suficiente para reducir las especies en el medio, al ir aumentando el potencial se observó un primer aumento de la intensidad, señal de que se produjo una reacción

de reducción del analito, esta intensidad aumentó hasta alcanzar un pico máximo, tras el que retorna a la línea base. Esto se explica debido a que en este punto la reacción se encuentra limitada por la difusión del analito, la cual no es suficiente para mantener la concentración de analito estable en la superficie del electrodo, dando lugar a una menor transferencia de electrones y en consecuencia una disminución de la intensidad registrada (Ananth,2009).

Esta técnica aporta mucha información cuantitativa de los analitos en solución, dado que la intensidad pico registrada en la reacción redox de la especie estudiada está relacionada con la concentración de ésta. Del mismo modo se puede obtener información cualitativa de las especies en solución, dado que cada especie tiene un potencial característico de oxidación/reducción (Ananth, 2009).

III.8 Elaboración de puente salino

Antes de iniciar cada prueba se tiene que preparar un puente salino para poder implementar el electrodo de referencia (Ag/AgCl). Para la elaboración de este puente se tiene que implementar un capilar de vidrio, 0.6 gramos de agar, 1.16gramos de KCl y 20 mL de agua (H₂O). Se vierte los 20 mL de agua en un matraz junto con los 1.16 gr de KCl, se coloca un agitador y se calienta a 100 °C. Se debe cuidar la agitación para que no se generen burbujas. Una vez que alcance la consistencia deseada se procede a verter el producto en el capilar de vidrio, este deberá tener un tapón de algodón en el extremo inferior, con la finalidad de retener el agar dentro del capilar.

III.9 Descripción de pruebas

III.9.1 Potencial a circuito abierto

Prueba 1: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto para lo cual se implementó una un matraz de 5 bocas con una capacidad volumétrica e 100 mL. Las bocas del matraz se implementaron para introducir un termómetro, un medidor de pH y 3 electrodos (electrodo de trabajo de paladio (Pd) de 1cm^2 de superficie, el electrodo de referencia (Ag/AgCl), y un contra electrodo de grafito). Dentro del matraz se colocó un agitador y se colocó adicional a esto una manguera que despedía oxígeno. Los electrodos fueron conectados a un potencióstato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potencióstato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este caso fue de 7200 segundos (120 min). Los primeros 500 segundos se dejó que se estabilizara la muestra, posterior a eso se comenzó a inyectar oxígeno. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 2 y 3: estas pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones que la prueba 1, pero se realizó durante un tiempo de 9300 segundos (155 min).

Prueba 4 y 5: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto, se implementaron los mismos materiales que en la primera prueba. En esta ocasión no se colocó el agitador y tampoco se utilizó la manguera que despedía oxígeno. De igual manera los electrodos fueron conectados a un potencióstato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora.

Se implementó el software del potenciostato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este caso fue de 3600 segundos (60 min). Durante todo este tiempo se estuvo midiendo el potencial sin inyectar ningún tipo de gas. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 6 y 7: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto, se implementaron los mismos materiales que en la primera prueba. En lugar de implementar el electrodo de trabajo paladio (Pd) se implementó un electrodo de platino (Pt). En esta ocasión no se colocó el agitador y tampoco se utilizó la manguera que despedía oxígeno. De igual manera los electrodos fueron conectados a un potenciostato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potenciostato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este caso fue de 4000 segundos (67 min). Durante todo este tiempo se estuvo midiendo el potencial sin inyectar ningún tipo de gas. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 8: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto, se implementaron los mismos materiales que en la primera prueba. En lugar de implementar el electrodo de trabajo paladio (Pd) se implementó un electrodo de platino (Pt). Dentro del matraz se colocó un agitador y se colocaron adicional a esto una manguera que despedía oxígeno y otra que inyectaba argón. De igual manera los electrodos fueron conectados a un potenciostato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del

potenciostato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este caso fue de 4000 segundos (67 min). Durante los primeros 600 segundos no se inyectó ningún tipo de gas, al pasar este tiempo se inició la inyección de argón por 800 segundos, después de esto se introdujo oxígeno por el tiempo restante. Durante todo el experimento se estuvo midiendo el potencial. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 9: esta prueba se realizó bajo las mismas condiciones de la prueba 8 pero el potencial a circuito abierto fue medido durante un tiempo mas prolongado. El tiempo que duró esta prueba fue de 8240 segundos (138 min). Durante los primeros 600 segundos no se inyectó ningún tipo de gas, al pasar este tiempo se inició la inyección de argón por un tiempo de 3900 segundos, después de esto se introdujo oxígeno por el tiempo restante (3740 segundos). Durante todo el experimento se estuvo midiendo el potencial. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 10 y 11: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto, se implementaron los mismos materiales que en la primera prueba. En lugar de implementar el electrodo de trabajo paladio (Pd) se implementó un electrodo de platino (Pt). Dentro del matraz se colocó un agitador y también fue colocada una manguera que inyectaba aire natural. De igual manera los electrodos fueron conectados a un potenciostato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potenciostato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este

caso fue de 5000 segundos (83 min). Durante todo este tiempo se estuvo inyectando aire y midiendo el potencial a su vez. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

Prueba 12 y 13: en esta prueba se midió el potencial a circuito abierto de muestras de agua aireada por el dispositivo basado en la caída de presión instalado en la planta piloto. Para obtener dichas muestras se implementaron 8 recipientes de plástico de 600 mL con tapa de rosca. Se tomó una muestra inicial antes de comenzar con el proceso de aeración y se midió el oxígeno disuelto contenido en la muestra con ayuda de una sonda comercial. Posteriormente se inició el proceso de aeración y se tomaron muestras a 3, 6, 14, 19, 29, 59 y 90 min de aeración para la prueba 12 y a los 3, 6, 9, 14, 19, y 90 min de aeración para la prueba 13. Las muestras siempre se tomaron en el cuadrante (C8, F1) del tanque 1 en la planta piloto. Posterior a esto se llevaron las muestras al laboratorio donde se localizaba el potencióstato y se colocó cada una de las muestras en un matraz de 5 bocas con una capacidad volumétrica e 100 mL. Las bocas del matraz se implementaron para introducir un termómetro, un medidor de pH y 3 electrodos (electrodo de trabajo de oro (Au) de 1cm^2 de superficie, el electrodo de referencia (Ag/AgCl), y un contra electrodo de grafito). Los electrodos fueron conectados a un potencióstato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potencióstato denominado GPES, para indicar el tiempo que duraría la prueba, que para este caso fue de 300 segundos (5 min) para cada muestra, es decir que se llevó un total de 2400 segundos (40 min). Durante toda la prueba se estuvo midiendo el potencial. Los

resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de tiempo sobre voltaje.

III.9.2 Barrido lineal

Prueba 1 y 2: en estas pruebas se aplicó un voltaje y se midió la corriente que se dio como respuesta. Para esta prueba se requirió un un matraz de 5 bocas con una capacidad volumétrica e 100 mL. Las bocas del matraz se implementaron para introducir un termómetro, un medidor de pH y 3 electrodos (electrodo de trabajo de platino (Pt) de 1cm^2 de superficie, el electrodo de referencia (Ag/AgCl), y un contra electrodo de grafito). Dentro del matraz se colocó un agitador y se colocaron adicional a esto una manguera que despedía oxígeno y otra que inyectaba argón. Los electrodos fueron conectados a un potencióstato (μ AUTOLABIII- Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potencióstato denominado GPES, para indicar el la ventana de potencial que fue de .15 v a -0.30 v y se especificó una velocidad de barrido de 5 mV/s. Se mantuvo la aeración durante 80 minutos, durante este periodo de tiempo se realizaron 6 barridos, a los 0, 2, 5, 10, 20, 40, y 80 minutos. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de voltaje sobre corriente.

Prueba 3 y 4: en esta prueba se realizó un barrido lineal de 8 muestras de agua aireada por el dispositivo basado en la caída de presión instalado en la planta piloto. Para obtener dichas muestras se implementaron 8 recipientes de plástico de 600 mL con tapa de rosca. Se tomó una muestra inicial antes de comenzar con

el proceso de aeración y se midió el oxígeno disuelto contenido en la muestra con ayuda de una sonda comercial. Posteriormente se inició el proceso de aeración y se tomaron muestras a 3, 6, 14, 19, 29, 59 y 90 min de aeración para la prueba 3 y a los 3, 6, 9, 14, 19, y 90 min de aeración para la prueba 4. Las muestras se tomaron en el cuadrante (C8, F1) del tanque 1 en la planta piloto. Posterior a esto se llevaron las muestras al laboratorio donde se localizaba el potenciostato y se colocó cada una de las muestras en un matraz de 5 bocas con una capacidad volumétrica e 100 mL. Las bocas del matraz se implementaron para introducir un termómetro, un medidor de pH y 3 electrodos (electrodo de trabajo de oro (Au) de 1cm^2 de superficie, el electrodo de referencia (Ag/AgCl), y un contra electrodo de grafito). Los electrodos fueron conectados a un potenciostato (μ AUTOLABIII-Compact Design) y este a su vez se conectó a una computadora. Se implementó el software del potenciostato denominado GPES, para indicar el la ventana de potencial que fue de 1.6 v a -0.2 v y se especificó una velocidad de barrido de 5 mV/s. se realizó un barrido para cada una de las muestras. Los resultados fueron registrados en la computadora en una gráfica de voltaje sobre corriente.

III.10 Eficiencia del dispositivo.

Para medir la energía consumida, se consideraron los watts usados en relación al tiempo que se implementó la bomba, y esto se relacionó al oxígeno aportado al agua por parte del dispositivo basado en la caída de presión. Los watts que consumen las bombas por lo general vienen especificados por parte del fabricante. En determinado caso que no sea así, se puede implementar una fórmula que consta de multiplicar el voltaje por la corriente eléctrica o amperaje y esto dará como resultado la potencia eléctrica, esto multiplicado por el tiempo dará como resultado la energía implementada. Al final, se reporta un valor en kilogramos de oxígeno sobre kilowatt hora ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$), unidad que nos sirvió como referencia para comparar el dispositivo con otros sistemas de aeración.

CAPITULO IV
ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN y
DISCUSIÓN DE LOS
RESULTADOS

IV.1 Etapa uno

Para la primera etapa del experimento, se midió el oxígeno disuelto aportado por el dispositivo de caída de presión en el agua, con respecto al tiempo, como se explicó en la sección III.6.1 de la metodología. En la primera prueba obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 1 a una temperatura ambiente de 34° C, mientras que el agua se encontraba a una temperatura de 25° C.

Tabla 3: Resultados de primera prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L
0	5.49	18	7.49	38	7.95
2	5.78	20	7.57	42	7.96
4	6.07	22	7.65	46	7.97
6	6.41	24	7.75	50	7.98
8	6.66	26	7.77	57	8
10	6.9	28	7.82	63	7.98
12	7.1	30	7.87	70	7.99
14	7.26	32	7.89	90	8
16	7.36	34	7.9		

Como se puede observar, en un principio el oxígeno disuelto asciende rápidamente en los primeros 26 minutos, logrando un 90.83% de su saturación, el 9.17% restante es adquirido en los 56 minutos siguientes de aeración. Esto se aprecia mejor en la figura IV.1 donde se observa el rápido incremento del oxígeno disuelto en un lapso corto de tiempo (26 minutos) para después disminuir este incremento paulatinamente. Al final se logró un incremento del 45.72% del oxígeno inicial.

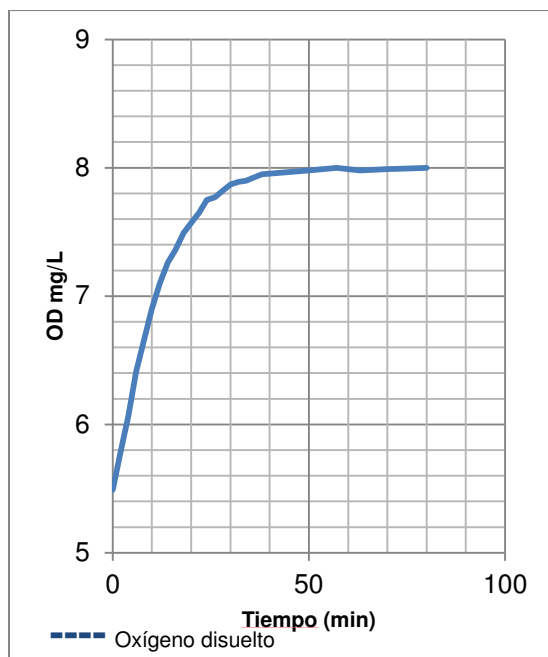


Figura IV.1: Resultados de la primera prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

En la segunda prueba de la primera etapa se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2 a una temperatura ambiente de 23° C, mientras que el agua se encontraba a una temperatura de 24° C.

Tabla 4: Resultados de segunda prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L
0	5.41	18	7.47	38	8
2	5.75	20	7.53	41	8.01
4	6.01	22	7.64	44	8.02

6	6.39	24	7.73	47	8.03
8	6.63	26	7.81	57	8.02
10	6.89	28	7.88	65	8.02
12	7.11	30	7.93	75	8.03
14	7.24	32	7.95	90	8.03
16	7.35	35	7.98		

Se pudo observar, que de igual manera que en la primera prueba de la etapa uno, el oxígeno disuelto asciende rápidamente en los primeros 26 minutos, en este caso se logra un 91.95% de su saturación, y el 8.05% restante es adquirido en los 56 minutos próximos de aeración. Esto se puede apreciar mejor en la figura IV.2 donde se observa el rápido incremento del oxígeno disuelto en un lapso corto de tiempo para después ir reduciendo este incremento paulatinamente. Al final se logró un incremento del 48.42% del oxígeno inicial.

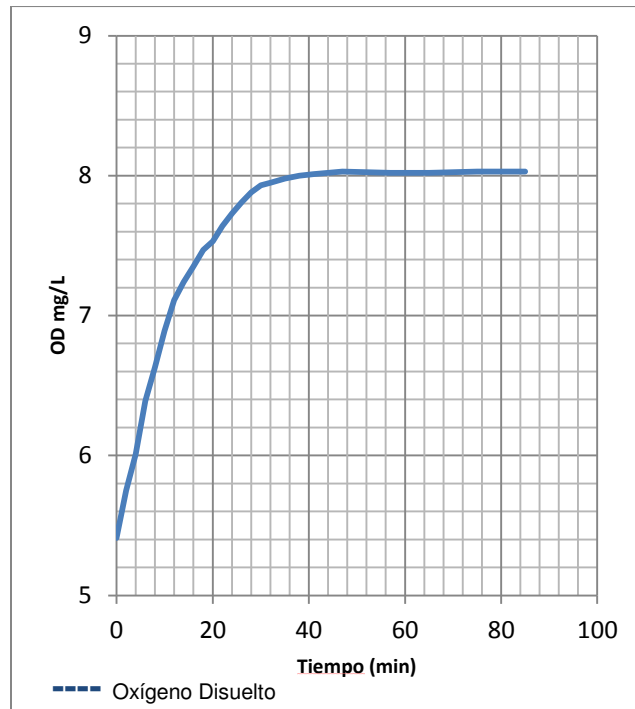


Figura IV.2: Resultados de la segunda prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

En una tercera prueba, de la primera etapa, se obtuvieron resultados muy similares a las pruebas anteriores. A una temperatura ambiente de 37° C, y una temperatura de 28° C en el agua, se obtuvieron los resultados siguientes.

Tabla 5: Resultados de segunda prueba de la etapa uno de mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

Tiempo (min)	OD (mg/L)	Tiempo (min)	OD (mg/L)
0	5.25	29	7.6
2	5.72	34	7.67
5	6.14	39	7.7
7	6.44	45	7.73
10	6.75	52	7.75
13	7.02	64	7.78
16	7.24	80	7.74
20	7.37	90	7.72
23	7.45	195	7.71

En la tercera prueba de la primera etapa, de igual manera que en las pruebas anteriores, el oxígeno disuelto asciende rápidamente en los primeros 26 minutos, en este caso se logra un 93% de su saturación, y el 7% restante es adquirido en los 56 minutos próximos de aeración. Esto se puede apreciar mejor en la figura IV.3. Al final se logró un incremento del 46.85% del oxígeno inicial.

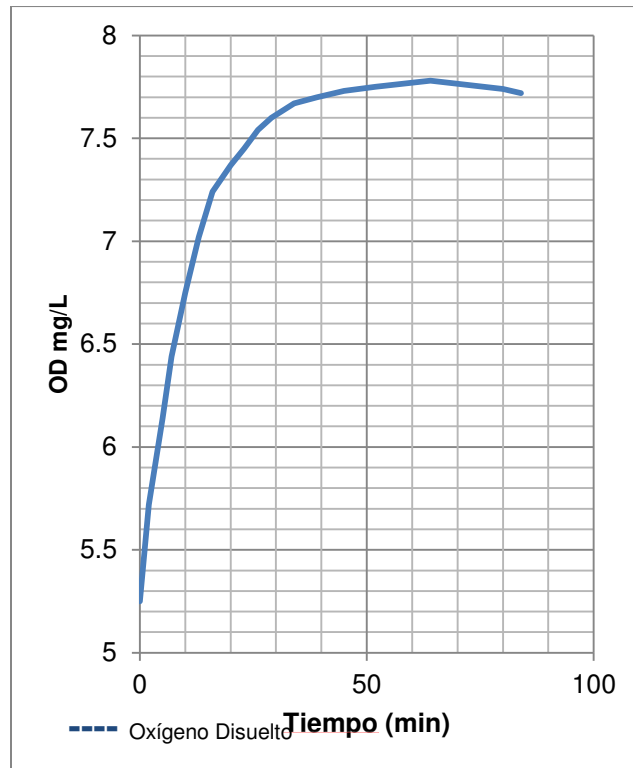


Figura IV.3: Resultados de la segunda prueba de la etapa uno de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

En el 2006 Sanikarn Tunsutapanich realizó un estudio donde comparaba 3 módulos de aeración donde implementaba un sistema de aeración mecánico superficial de escobillas o paleas con diferentes configuraciones. En el experimento midió el oxígeno disuelto obtenido de dichos dispositivos con respecto al tiempo de aeración, de lo cual obtuvo los resultados que se muestran en la figura IV.4 (Tunsutapanich *et al*, 2006).

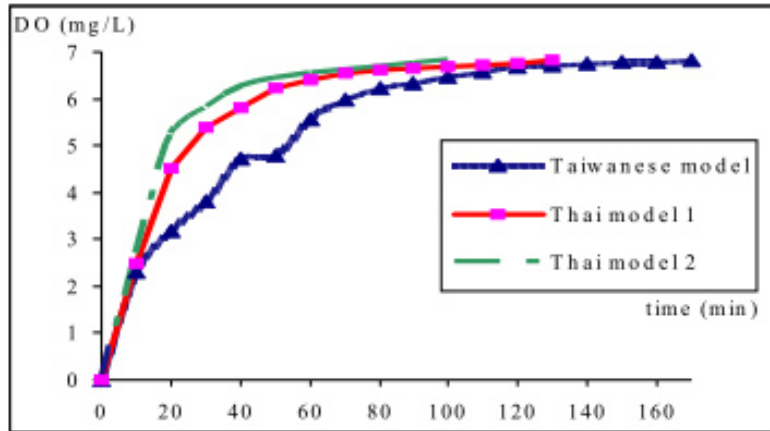


Figura IV.4. Resultados de oxígeno disuelto de 3 módulos de aeración (Tunsutapanich *et al*, 2006).

En estos resultados se observa que el nivel de oxígeno aumentó bruscamente en los primeros 20 minutos de aeración, posteriormente el incremento de oxígeno disuelto fue paulatino hasta alcanzar el punto de saturación. Este comportamiento es similar al obtenido en los resultados de los experimentos con el dispositivo basado en la caída de presión que se está estudiando.

En otro estudio realizado por el Profesor T. J. Casey en el 2009 donde realizó una prueba en agua limpia para determinar la Eficiencia Estándar de Aeración (SAE) de los sistemas de aeración por difusión, para lo que diseñó, construyó y evaluó dicho sistema en el cual obtuvo los resultados que se muestran en la figura IV.5. (Casey, 2009).

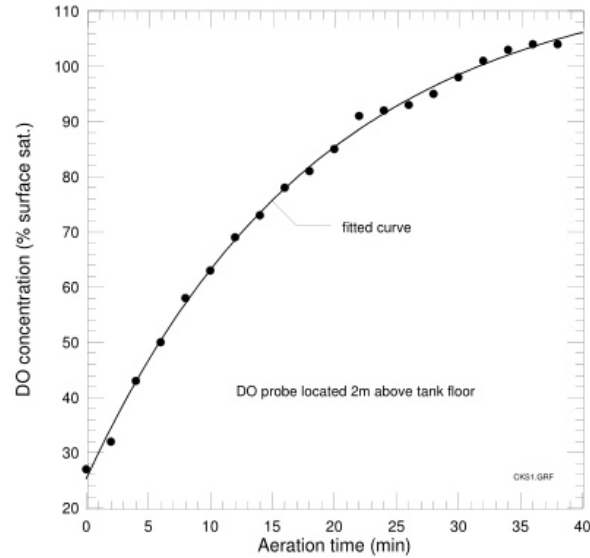


Figura IV.5. Resultados de oxígeno disuelto de sistema de aeración por difusión (Casey, 2009).

En estos resultados se pudo observar que el comportamiento del oxígeno disuelto es muy similar al caso antemencionado y a los resultados obtenidos en nuestras pruebas experimentales, donde se obtiene un rápido incremento del oxígeno disuelto en los primeros minutos de aeración para después ir aumentando dicha concentración poco a poco.

Con la finalidad de poder observar mejor la distribución del oxígeno disuelto con respecto al tiempo en el área de estudio, se presenta una gráfica de colores en 3 dimensiones del oxígeno disuelto obtenido en una de las pruebas realizadas con el dispositivo de aeración basado en la caída de presión (Figura IV.6).

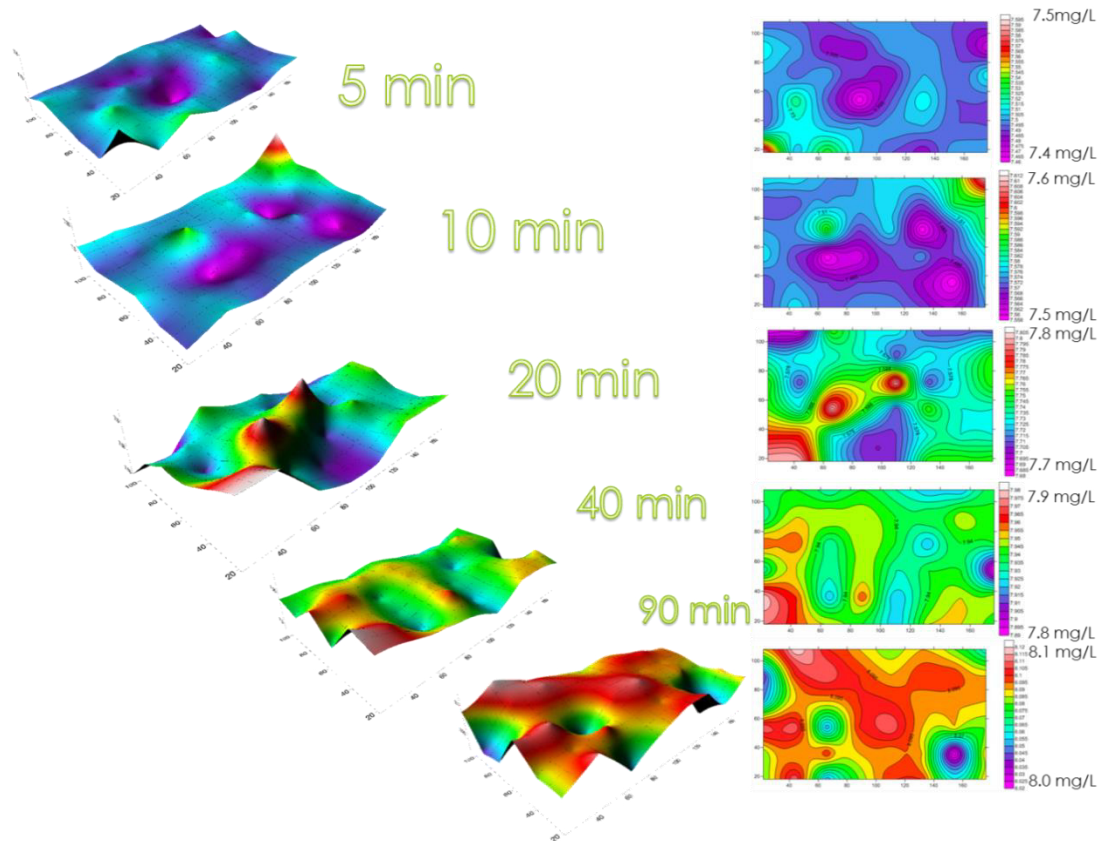


Figura IV.6: Gráfica de colores en 3 dimensiones del incremento de oxígeno disuelto con respecto al tiempo.

En esta gráfica se observa como el oxígeno disuelto se va distribuyendo a lo largo del área de estudio con forme transcurre el tiempo de aleación, hasta llegar al punto de saturación donde se encuentra mayormente homogenizada la distribución del mismo.

IV.2 Etapa Dos

En la segunda etapa del experimento se realizó la medida del oxígeno disuelto con respecto al espacio como se explicó en la sección III.6.2 de la metodología.

Con la finalidad de conocer las condiciones iniciales en los tanques de almacenamiento, se presentan los resultados de la medición del oxígeno disuelto contenido en el agua del tanque 2 y en el tanque 1 antes de iniciar el proceso de aeración a 40 cm de profundidad (figura IV.7 y IV.8).

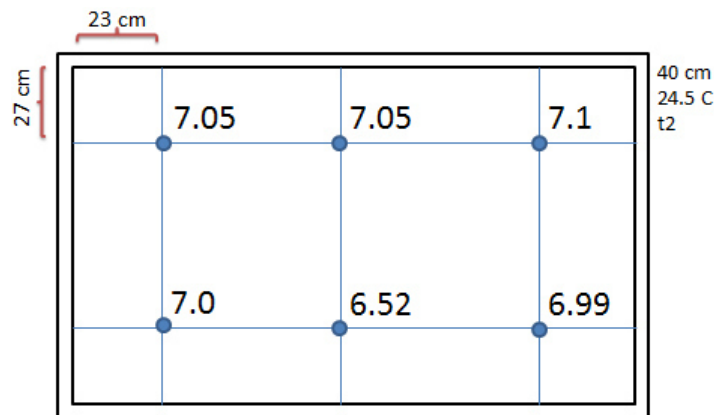


Figura IV.7 Oxígeno disuelto inicial en el tanque 2 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos (unidades en puntos en mg/L).

En promedio para el tanque 2, se obtuvo que el agua contenía 6.59 mg/L de oxígeno disuelto a una temperatura de 24.5° C antes de iniciar la aeración (figura IV.7).

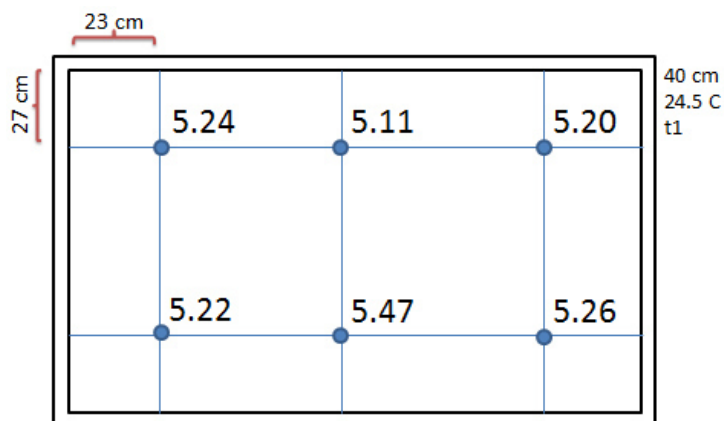


Figura IV.8. Oxígeno disuelto inicial en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos (unidades en puntos en mg/L).

En promedio para el tanque 1, se obtuvo que el agua contenía 5.25 mg/L de oxígeno disuelto a una temperatura de 24.5° C antes de iniciar la aeración (figura IV.9).

A los 90 minutos de aeración, se detuvo el proceso de aeración y se comenzó a realizar la toma de medidas de oxígeno disuelto en cada uno de los 48 puntos ubicados en el tanque 1 donde es recibida el agua aireada. Las mediciones se realizaron a 20, 40, 60, 80 y 100 centímetros de profundidad, obteniendo los resultados como se indica en la figura IV.9 para los 48 puntos a una profundidad de 20 cm.

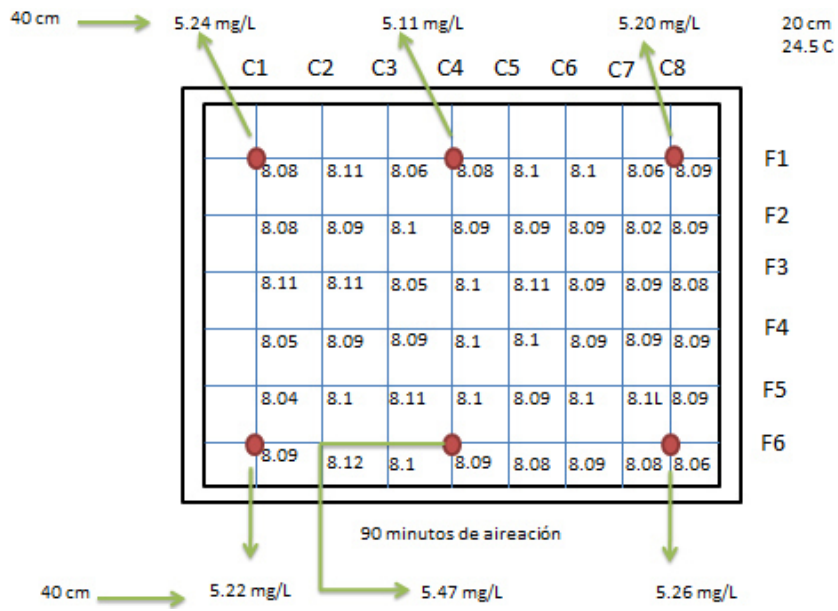


Figura IV.9. Oxígeno disuelto a 20 cm de profundidad después de aeración en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos (unidades en puntos en mg/L).

En la figura IV.9 se presentan los resultados de oxígeno disuelto a una profundidad de 20 cm a 90 minutos de aeración. De acuerdo con los resultados podemos observar que entre los extremos del tanque no existe diferencias mayores a 1% en cambio se observa un incremento superior al 50% de la concentración con respecto al oxígeno inicial.

En la figura IV.10 se presentan la gráfica de la concentración de oxígeno disuelto, y el comportamiento del oxígeno disuelto a lo largo de toda el área del tanque 1.

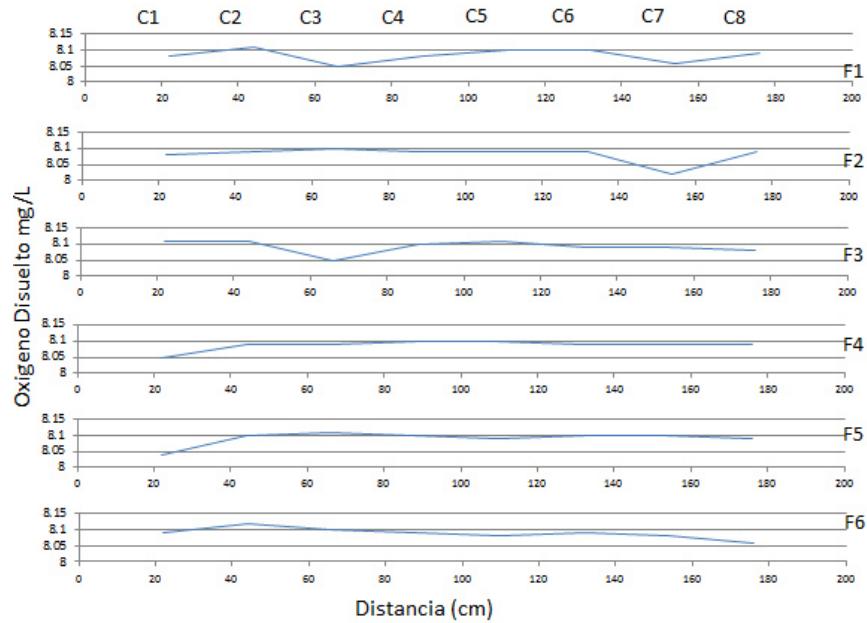


Figura IV.10. Oxígeno disuelto a 20 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.

A continuación se muestra otros ejemplos de los resultados obtenidos en la prueba antes mencionada, a una profundidad de 40 cm, (figura IV.11) y la representación gráfica de dichos valores pudiéndolos observar en la figura IV.12.

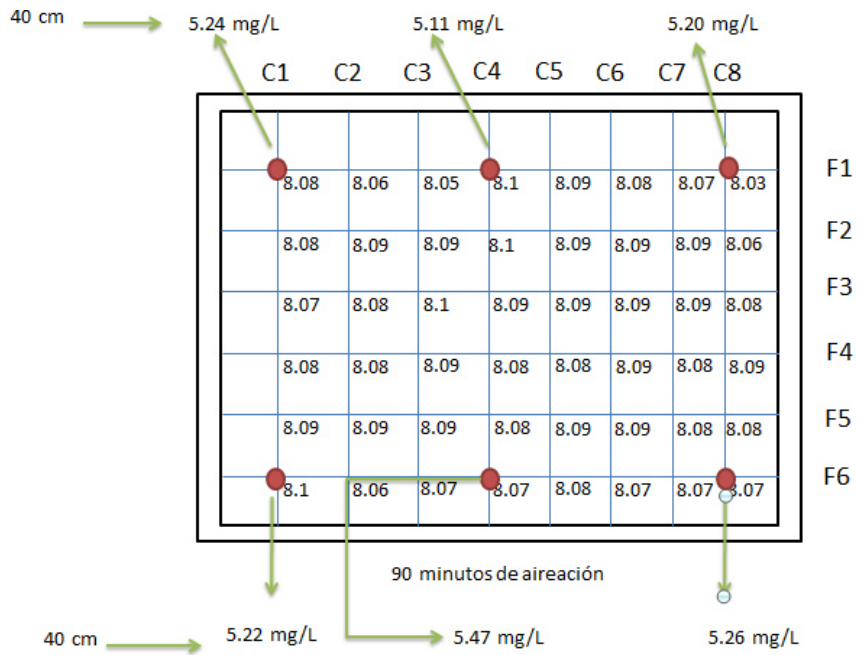


Figura IV.11. Oxígeno disuelto a 40 cm de profundidad después de aeración en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos (unidades en puntos en mg/L).

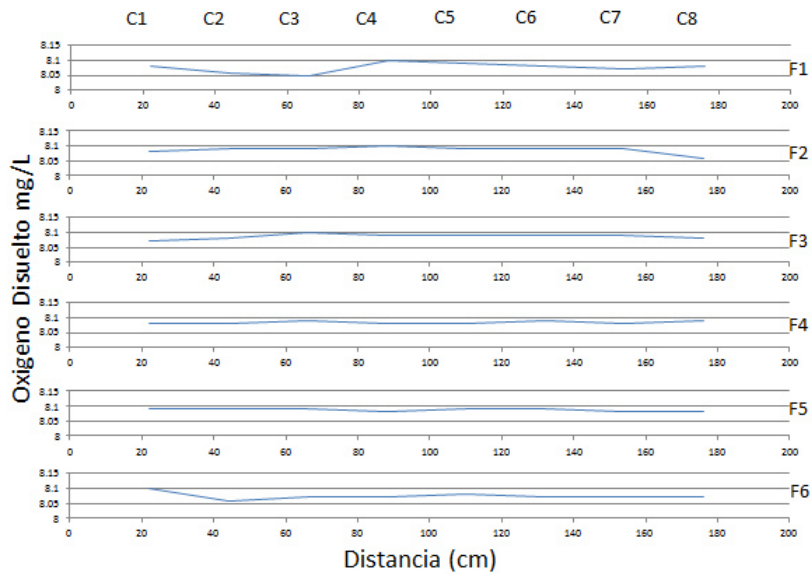


Figura IV.12. Oxígeno disuelto a 40 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.

También se muestran los resultados en la medición realizada a 80 cm de profundidad (figura IV.13) y la representación gráfica de sus valores (figura IV.14).

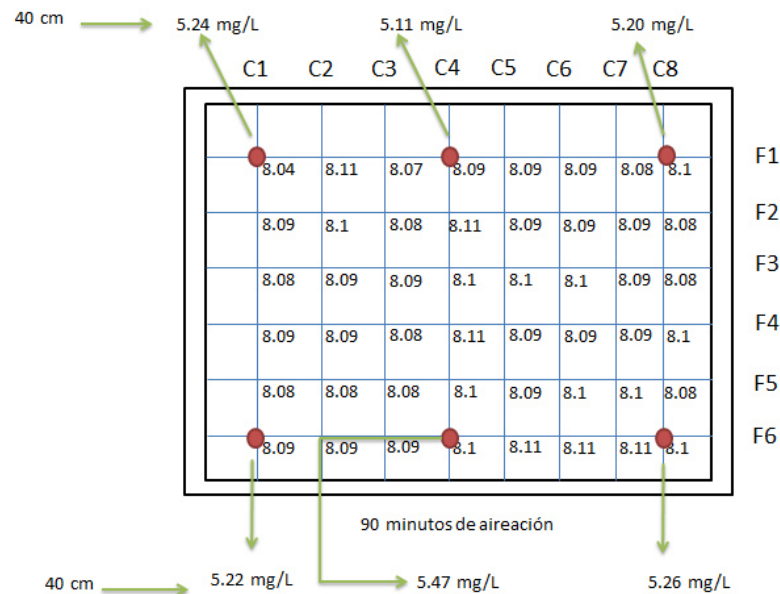


Figura IV.13. Oxígeno disuelto a 80 cm de profundidad después de aireación en el tanque 1 de la planta piloto de la primera prueba, etapa dos (unidades en puntos en mg/L).

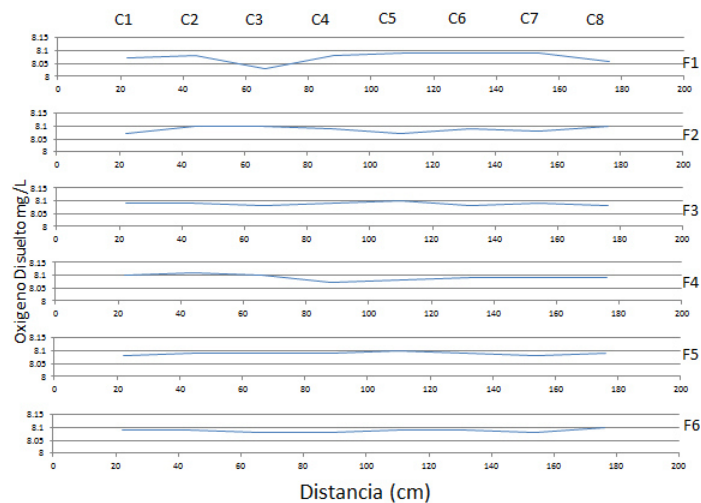


Figura IV.14: Oxígeno disuelto a 80 cm de profundidad en cada uno de los 48 puntos.

En las figuras IV.11 y IV.13 se presentan los resultados de la oxigenación del agua por 90 minutos, medida la concentración de oxígeno disuelto a una profundidad de 40 y 80 cm. El nivel de oxígeno disuelto está alrededor de 8.10 mg/L y el valor es muy cercano al observado a la profundidad de 20 cm. Lo que nos permite evidenciar que no hay cambios importantes en la concentración del oxígeno disuelto de la planta piloto. En todas las mediciones de los diferentes niveles restantes (60 y 100 cm) se obtuvieron valores muy similares. La distribución del oxígeno disuelto por parte del dispositivo de caída de presión como sistema de aeración, resulta muy homogénea.

En el resto de las pruebas (presentadas en anexos) realizadas para esta etapa, se obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos en la primera y segunda prueba. De esta manera podemos evidenciar que la distribución del oxígeno disuelto que aporta el dispositivo basado en la caída de presión, resulta homogénea.

Con la finalidad de observar mejor los valores obtenidos del oxígeno disuelto así como su distribución en el espacio se presenta una gráfica donde se muestra la concentración del oxígeno disuelto en todo el espacio de estudio a cada uno de los 5 niveles de profundidad donde se tomaron muestras (figura IV.15).

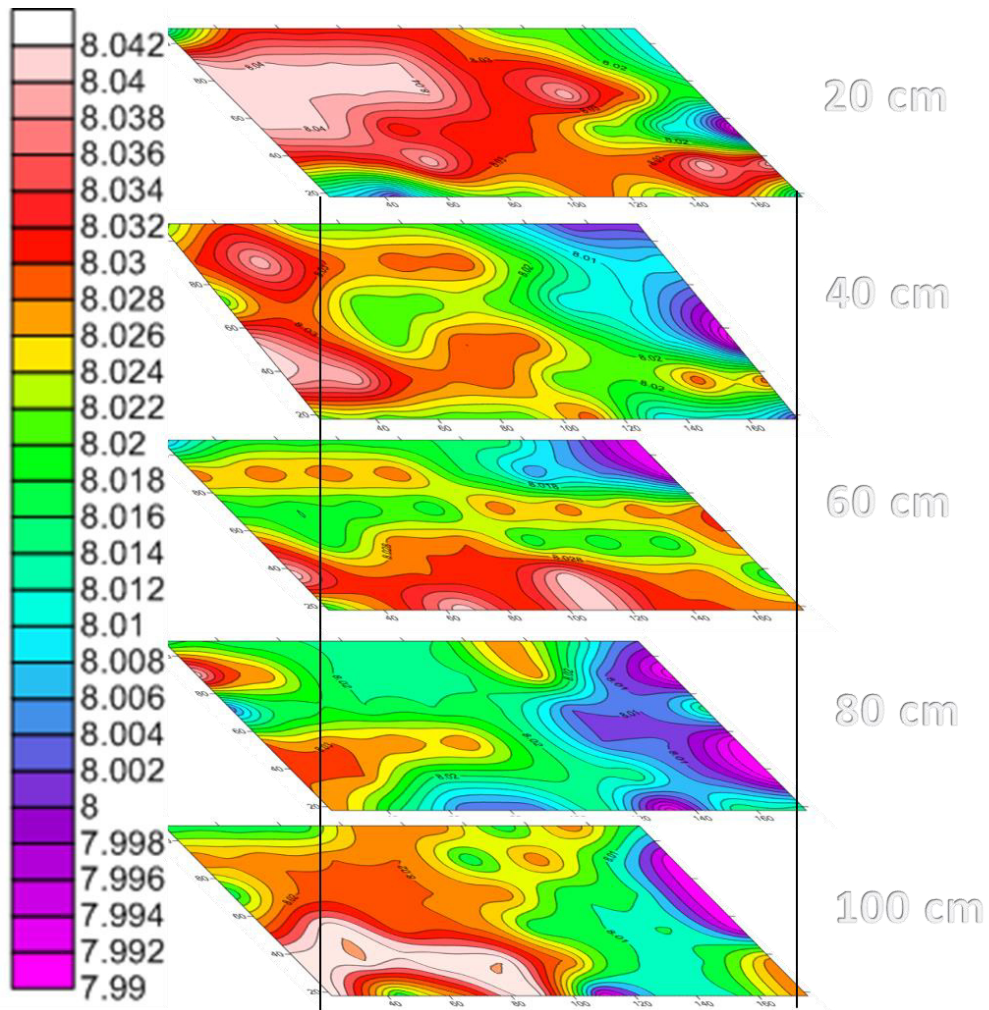


Figura IV.15: Gráfica de colores de la distribución del oxígeno disuelto en la zona de estudio.

De igual manera se muestra un perfil en tres dimensiones del comportamiento del oxígeno disuelto con respecto a su distribución en el área de estudio (Figura IV.15).

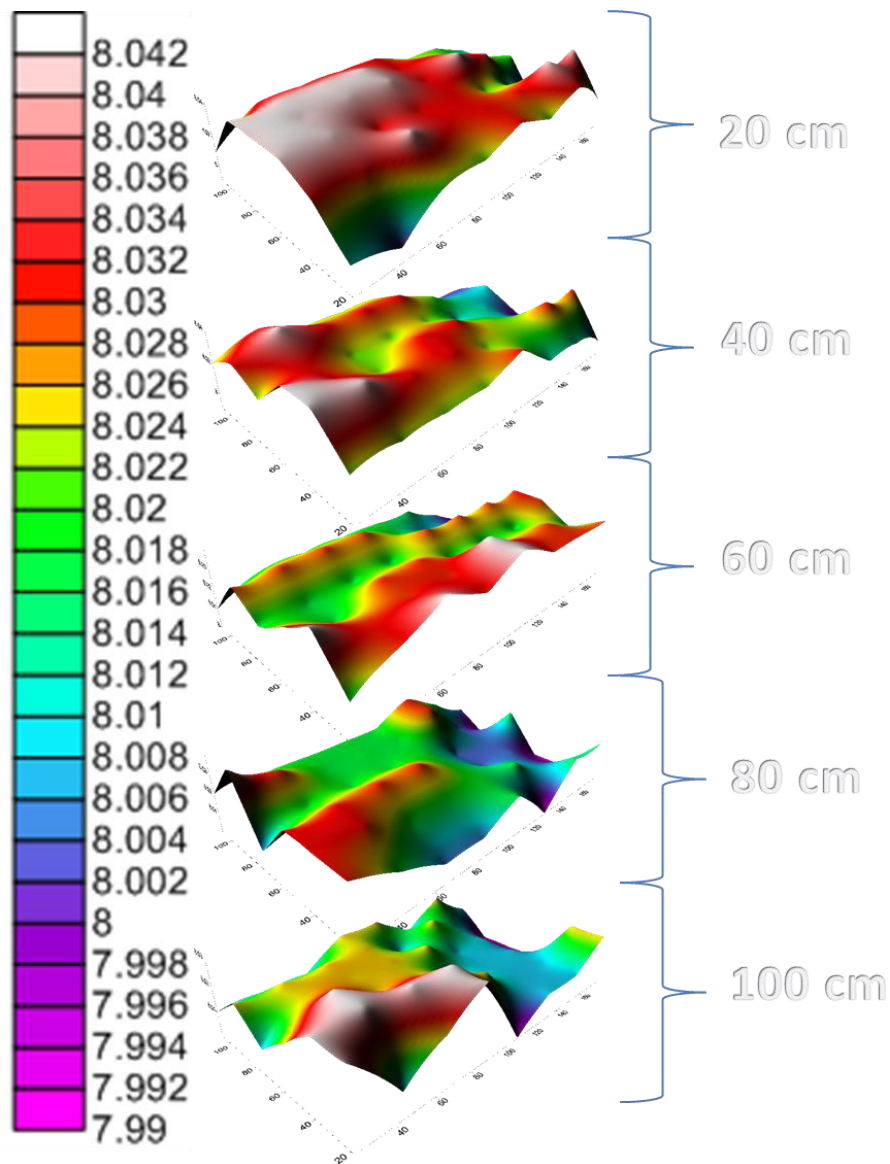


Figura IV.16: Gráfica de colores en 3 dimensiones de la distribución del oxígeno disuelto en la zona de estudio.

De esta forma podemos observar que entre las pequeñas variaciones de oxígeno disuelto que hay de un punto a otro, existen 2 zonas donde se presentó una denotación más presente de grados elevados de oxígeno disuelto con respecto al promedio de los valores obtenidos. En la zona más cercana a

la superficie, es decir a los 20 cm y en la zona más profunda referente a los 100 cm, fueron los lugares donde se presentó la concentración más elevada de oxígeno disuelto para este experimento. Esto se debe a que en la parte superior se encuentra en mayor contacto con el oxígeno presente en la atmosfera, siendo la zona marcada con rosa de la gráfica de colores donde se genera mayor turbulencia por ser el área donde las burbujas producidas por nuestro dispositivo se liberan a la atmosfera. En referencia a la zona con mayor concentración de oxígeno disuelto, perteneciente a la zona más profunda del tanque (100 cm) es el resultado de tener la salida de flujo del dispositivo basado en la caída de presión, por lo que en ese punto se genera una gran cantidad de turbulencia e interacción entre el líquido y las burbujas de aire,

IV.3 Método electroquímico

IV.3.1 Potencial a circuito abierto.

Otra metodología para dar seguimiento al O_2 disuelto es por medio de métodos electroquímicos. En este trabajo se realizaron experimentos donde se midió el potencial a circuito abierto y el comportamiento del agua en ausencia y presencia del oxígeno disuelto y a su vez poder caracterizar los electrodos implementados (figura IV.17).

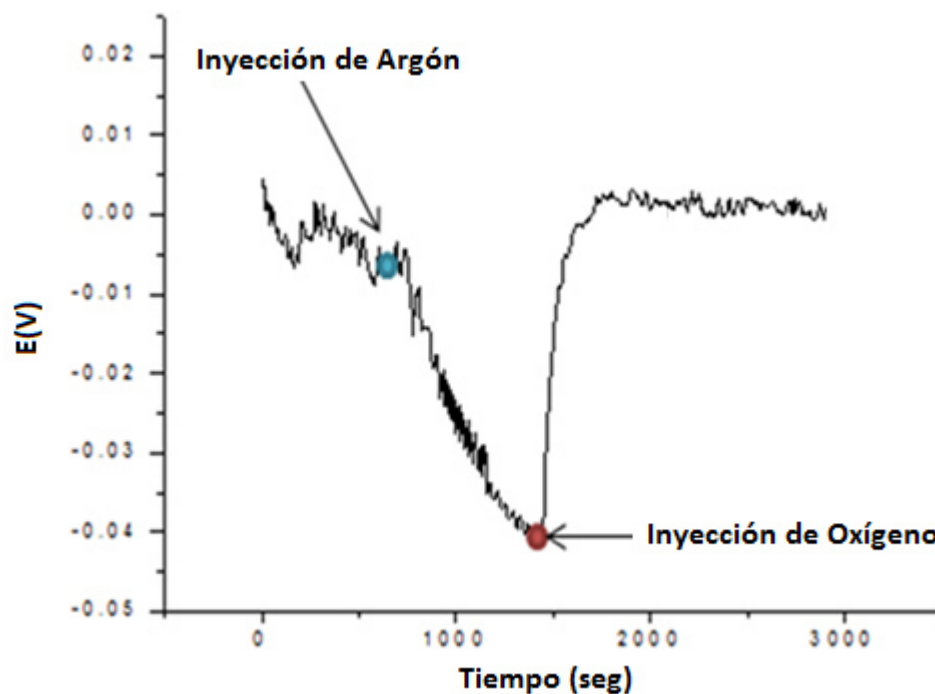


Figura IV.17. Potencial a circuito abierto en ausencia de oxígeno y saturado de oxígeno.

En la figura IV.17 se observa los resultados del experimento 1, donde se puede notar que el potencial se mantiene relativamente constante, hasta antes de 500 segundos. Posteriormente comenzó a descender el valor del potencial, esto

debido a que el medio fue purgado con argón ocasionando la ausencia de oxígeno, al tiempo 1400 segundos se comenzó nuevamente a aerar la muestra y se pudo notar que el potencial comenzó a ascender hasta el punto de saturación en el que se encontraba al inicio del experimento.

De las pruebas de potencial a circuito abierto realizados en un intervalo de 2500 segundo en una muestra de agua común de grifo, podemos evidenciar como existe una disminución del potencial en una muestra purgada con argón (Ar), y un incremento en el potencial al estar saturado el medio líquido con oxígeno disuelto.

Posteriormente se realizaron 3 pruebas electroquímicas, en estas se midió el potencial a circuito abierto de 8 muestras de agua tomada de la plata piloto, donde se llevan a cabo las pruebas experimentales, con el dispositivo basado en la caída de presión implementado como sistema de aeración. Las muestras fueron tomadas a diferentes tiempos durante el proceso de aeración con el dispositivo. El procedimiento llevado a cabo para cada prueba fue igual para los 3 experimentos, la temperatura del agua fue la única variable que se presentó en el experimento (figuras IV.18 y IV.19).

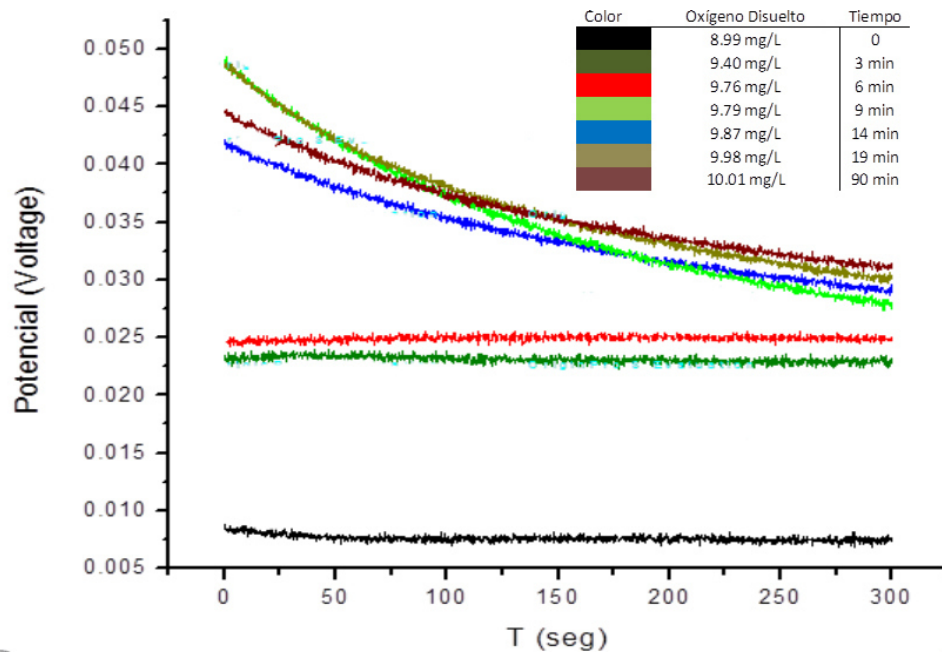


Figura IV.18. Potencial a circuito abierto de 7 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 17 °C, Ambiente 14 °C.

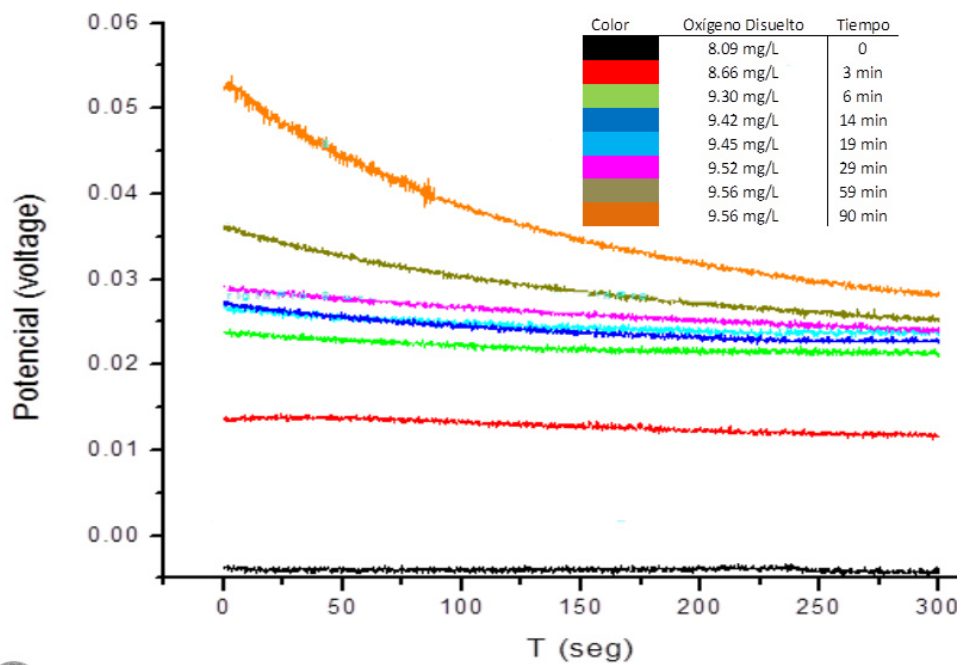


Figura IV.19. Potencial a circuito abierto de 8 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 18° C, Ambiente 22° C.

Con el fin de analizar el comportamiento del medio acuoso en presencia del aire que genera el dispositivo basado en la caída de presión implementado como sistema de aeración en la planta piloto, fueron llevado a cabo estudios de potencial a circuito abierto y de barrido lineal. De las pruebas de potencial a circuito abierto realizadas en 300s es posible observar que el potencial aumenta en función del tiempo de saturación con oxígeno, es decir a mayor concentración de oxígeno en el agua, mayor el potencial registrado. Para este experimento el potencial en la muestra uno (antes del proceso de aeración) es de -.005 volts, con una concentración de oxígeno disuelto de 8.09 mg/L, y para la última muestra tomada al transcurrir 90 minutos de aeración con el dispositivo basado en la caída de presión, se tiene un potencial de .029 volts, con una concentración de oxígeno disuelto de 9.56 mg/L. Por lo tanto, la interacción electrodo – electrolito – oxígeno se verificó con las mediciones a circuito abierto. En 1995 Lembit Nei hizo pruebas con una celda galvánica de tipo Clark para medir el oxígeno disuelto mediante el potencial a circuito abierto, donde presentaba un potencial a un grado de saturación máxima, y ese iba disminuyendo conforme se purgaba la muestra, obteniendo así resultados similares a los presentados en las figuras IV.18 y IV.19 (Nei, 1995).

IV.3.1 Barrido Lineal

También se realizaron algunas pruebas de barrido lineal en las cuales se presentaba una muestra purgada de oxígeno, posterior mente se realizó un barrido lineal en diferentes tiempos de aeración, que fueron de 2, 5, 10, 20, 40

y 80 minutos, obteniendo los resultados que se muestran en la figura 4.26. De esta manera logramos apreciar el comportamiento del agua en ausencia y presencia del oxígeno disuelto (figura IV.20).

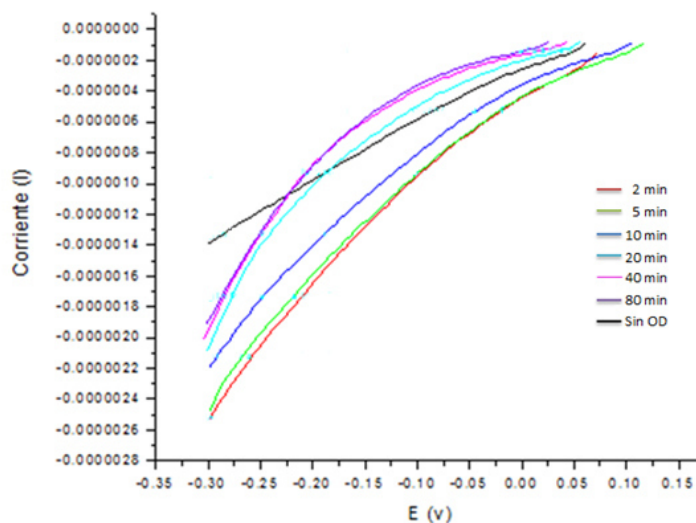


Figura IV.20. Barrido lineal de ausencia de oxígeno y aeración en diferentes tiempos.

En la figura IV.20 se observa que la corriente va aumentando conforme la concentración de oxígeno disuelto sea mayor hasta llegar a su saturación, esto se debió a que en la reacción de reducción de oxígeno, donde 4 electrones son producidos en proporción al oxígeno consumido.

Se realizaron estudios de barrido lineal a diferentes tiempos de saturación de oxígeno (2, 5, 10, 20, 40 y 80 min) en un intervalo de potencial entre 0.15 y -0.30 fueron llevados a cabo, (figura IV.20). Estos perfiles muestran que la corriente aumenta en función de la concentración de oxígeno disuelto hasta llegar a un punto de saturación (9.1 mg/L a 20 °C). Los perfiles corriente –

potencial mostrados en la figura IV.20 corresponden a la reducción del oxígeno disuelto durante la polarización catódica a 5 mv/s, en el medio electrolítico a pH cercano a 7. Bajo este contexto, es posible verificar que la interacción O_2 – electrodo es muy alta, sobre todo si se compara con la solución libre de oxígeno (curva, sin OD, en figura IV.20). La concentración de oxígeno disuelto en el agua es por lo tanto, proporcional a la transferencia de carga en la interfaz de oxígeno – electrodo – electrolito.

Seguido de esto, se realizaron 3 pruebas de barrido lineal en 8 muestras de agua tomada de la plata piloto, donde se llevan a cabo las pruebas experimentales, con el dispositivo basado en la caída de presión implementado como sistema de aeración, al igual que en las pruebas de medición del potencial a circuito abierto. Las muestras fueron tomadas a diferentes tiempos durante el proceso de aeración con el dispositivo. El procedimiento llevado a cabo para cada prueba fue igual para los 3 experimentos, la temperatura del agua fue la única variable que se presentó en el experimento.

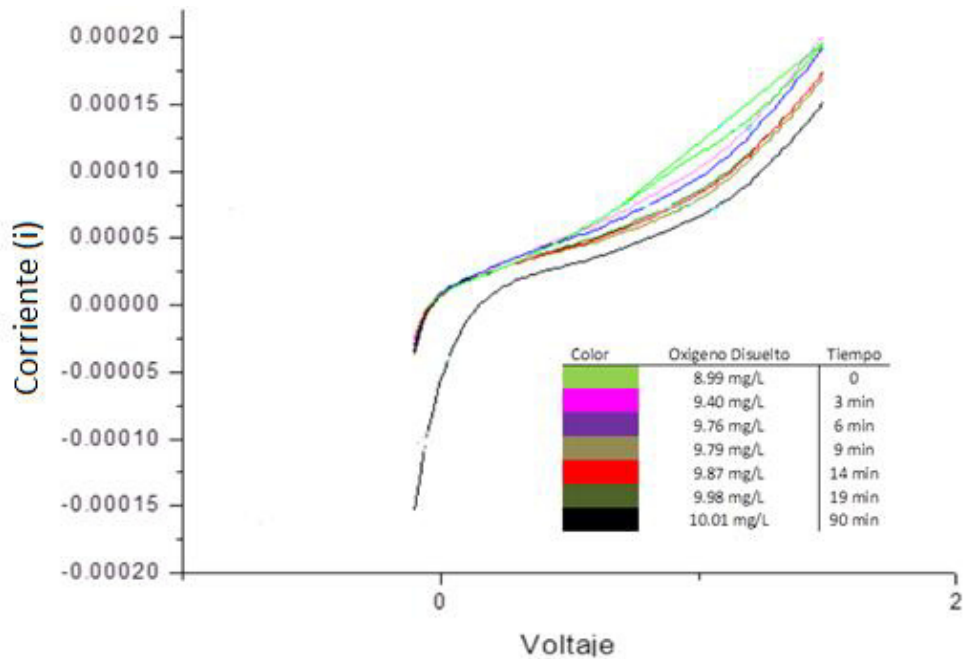


Figura IV.21. Barrido lineal de 7 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 17 °C, Ambiente 14 °C.

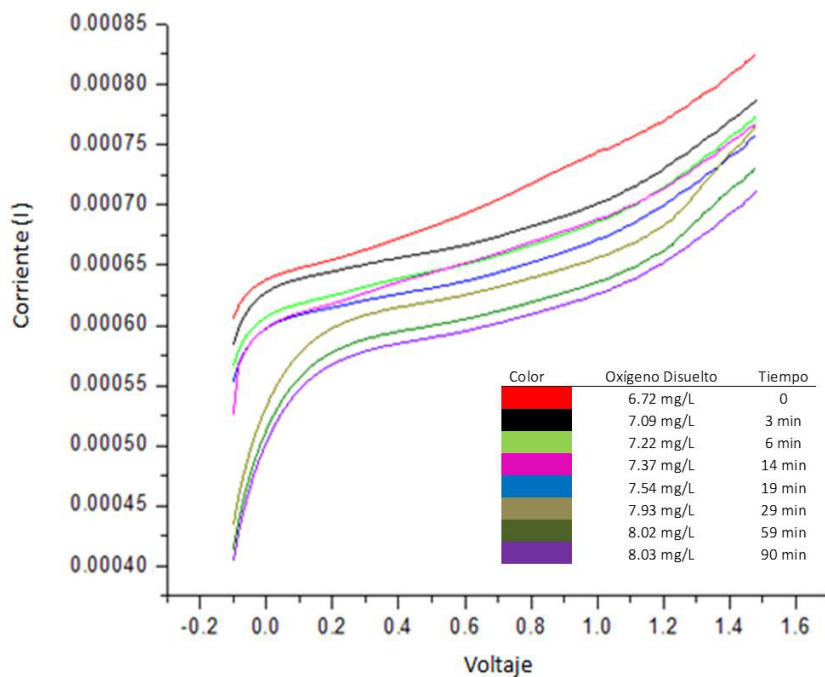


Figura IV.22. Barrido lineal de 8 muestras de agua aireada con dispositivo de caída de presión. Temperatura del agua: 24 °C, Ambiente 27 °C.

Se realizaron pruebas de barrido lineal, con la finalidad de ver el comportamiento de la corriente eléctrica en relación a la presencia de oxígeno en el agua, estas pruebas se realizaron en una ventana de potencial entre 1.5 volts a – 0.1 volts (Figura IV.21 y IV.22), en ambas pruebas se obtuvieron valores muy similares. En este experimento se pudo observar que la corriente disminuye conforme el agua presente mayor concentración de oxígeno disuelto hasta llegar a su saturación (9.56 mg/L a 18 °C). En el 2010, Javier Ibáñez obtuvo resultados similares, donde el comportamiento de la corriente en el barrido lineal era tal que a mayor saturación de oxígeno disuelto, esta descendía, formando curvas tales como las mostradas en las figuras IV.21 y IV.22 (Ibáñez, 2010).

La concentración de oxígeno se verifica mediante una sonda comercial. Con la finalidad de correlacionar la señal obtenida y la concentración de oxígeno, se representaron los valores obtenidos experimentalmente, mostrados en la figura IV.19. Como se puede observar en la figura IV.23, la evolución de la respuesta respecto a la concentración se ajusta a un modelo de regresión lineal, en que el potencial es directamente proporcional a la concentración del oxígeno disuelto.

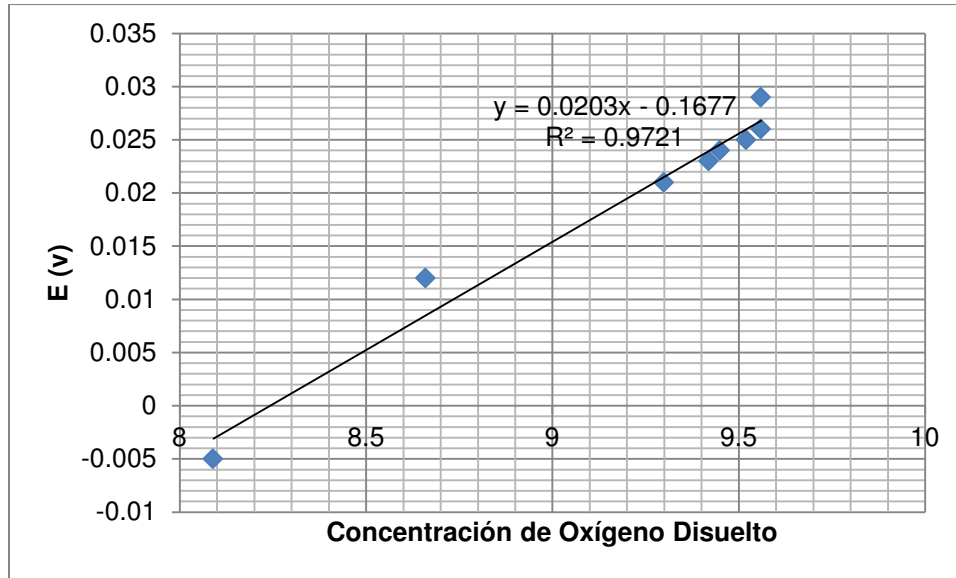


Figura IV.23. Relación oxígeno disuelto – potencial de resultados mostrados en figura IV.25

Se observa una clara correlación entre señal y concentración del oxígeno disuelto, con un coeficiente de determinación superior a 0.93, y pudiendo obtener la ecuación (21) que expresa el comportamiento de la relación entre el oxígeno disuelto y el potencial.

$$y = .0174x - .1411 \quad (21)$$

Con el mismo propósito de relacionar los valores obtenidos en las pruebas de barrido lineal entre la corriente y la concentración de oxígeno, se representaron los valores obtenidos experimentalmente, como se muestran en la figura IV.28. Como se puede observar en la figura IV.24.

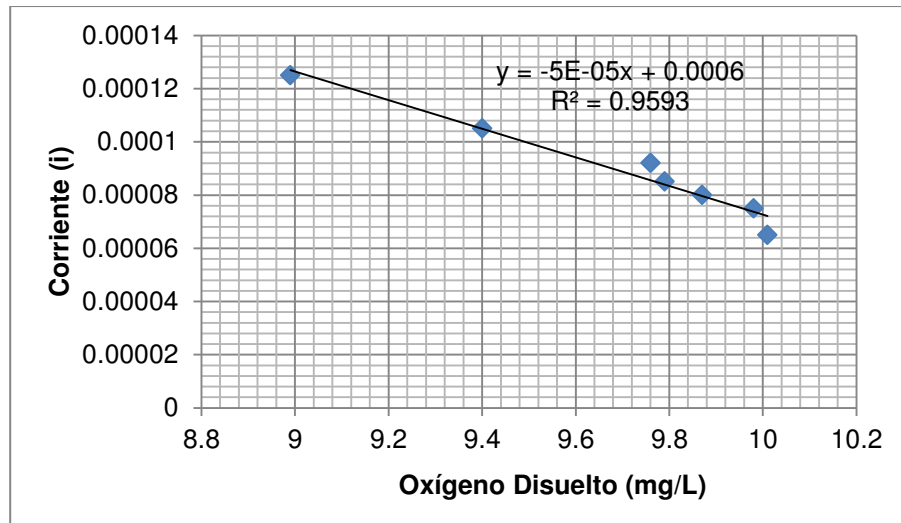


Figura IV.24. Relación corriente – oxígeno disuelto de resultados mostrados en figura IV.28.

Es evidente que existe una correlación entre la corriente y la concentración de oxígeno disuelto, dado que se obtuvo un coeficiente de determinación igual a 0.95. La ecuación (22) que describe el comportamiento de esta correlación se expresa de la siguiente manera.

$$y = -5E^{-05}x + 0.00006 \quad (22)$$

IV.4. Eficiencia de aeración

Con una estimación del límite de saturación del oxígeno disuelto en el agua para estas condiciones de prueba (8 mg/L), se puede obtener el déficit de aeración para cada punto de muestreo que es el resultado de restar el oxígeno disuelto obtenido para cada punto de muestra (C_s) al valor de saturación del oxígeno disuelto en el agua (C_∞) (tabla 7) y con esto poder obtener la gráfica semi-log mostrada en la figura IV.25.

Tabla 6: Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración en planta piloto, prueba 1.

Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L
1	5.49	16	7.36
2	5.78	18	7.49
4	6.07	20	7.57
6	6.41	22	7.65
8	6.66	24	7.75
10	6.9	26	7.77
12	7.1	28	7.82
14	7.26	30	7.87

Tabla 7: Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 1.

Tiempo (min)	OD mg/L	Tiempo (min)	OD mg/L
1	2.51	18	0.51
2	2.22	20	0.43
4	1.93	22	0.35
6	1.59	24	0.25
8	1.34	26	0.23
10	1.1	28	0.18
12	0.9	30	0.13
14	0.74	32	0.11
16	0.64	34	0.1

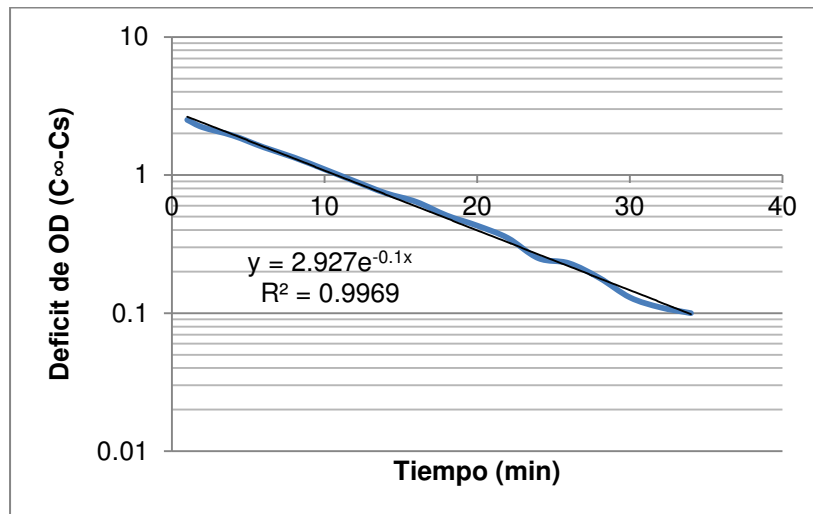


Figura IV.25: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_{\infty} - C_s$) de la prueba uno contra el tiempo.

Con esta gráfica se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa (k_{La}) el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit del oxígeno disuelto y el tiempo de aeración, dando como resultado un valor de k_{La} igual a 0.1/min.

El coeficiente de transferencia de masa, k_{La} , está en función de la temperatura. A fin de comparar los coeficientes para los resultados obtenidos bajo diferentes temperaturas, la siguiente ecuación se puede usar para ajustar los coeficientes obtenidos a la condición estándar ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

$$(k_L a)_{20} = \frac{(k_L a)_T}{1.024^{(T-20)}} \quad (23)$$

$$(k_L a)_{20} = \frac{0.1}{1.024^{(25-20)}} = .0888$$

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados de k_{La} , correspondiente al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito. Y entonces el valor SOTR se divide por la potencia consumida para obtener la eficiencia de aeración estándar (SAE).

$$SOTR = k_L a (C_{\infty 20}) V \quad (24)$$

$$SOTR = \left(\frac{.0888}{\text{min}}\right) \left(8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (7408 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 315,758.59 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .315 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

Por lo tanto:

$$SAE = \frac{SOTR}{\text{consumo de potencia}} \quad (25)$$

$$SAE = \frac{.315 \frac{kgO_2}{h}}{.192 kw} = 1.64 \frac{kgO_2}{kw * h}$$

De esta manera se obtuvo una eficiencia de $1.64 \frac{kgO_2}{kw * h}$, valor aceptable al ser comparado con los valores mostrados en la tabla 2 presentada en la sección II.11.1 del marco teórico, donde muestra las eficiencias de aeración de diferentes dispositivos.

Para la prueba dos de la primera etapa tenemos lo siguiente, en cuestión de la obtención de la eficiencia estándar de aeración.

Tabla 8: Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración, prueba 2.

Tiempo	OD (mg/L)	Tiempo	OD (mg/L)
0	5.41	16	7.35
2	5.75	18	7.47
4	6.01	20	7.53
6	6.39	22	7.64
8	6.63	24	7.73
10	6.89	26	7.81
12	7.11	28	7.88
14	7.24	30	7.93

Con los datos en la Tabla 7, se determinó un gráfico que muestra los cambios de oxígeno disuelto durante el período de aeración (figura IV.2). Con una estimación del límite de saturación de oxígeno disuelto en el agua para estas condiciones de prueba (8 mg/L), se puede obtener el déficit de aeración para cada punto de

muestreo que es el resultado de restar el oxígeno disuelto obtenido para cada punto de muestra (C_s) al valor de saturación de oxígeno disuelto en el agua (C_∞) (tabla 8) y con esto poder obtener la gráfica semi-log mostrada en la figura IV.26.

Tabla 9: Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 2.

Tiempo	OD (mg/L)	Tiempo	OD (mg/L)
0	2.59	16	0.65
2	2.25	18	0.53
4	1.99	20	0.47
6	1.61	22	0.36
8	1.37	24	0.27
10	1.11	26	0.19
12	0.89	28	0.12
14	0.76	30	0.07

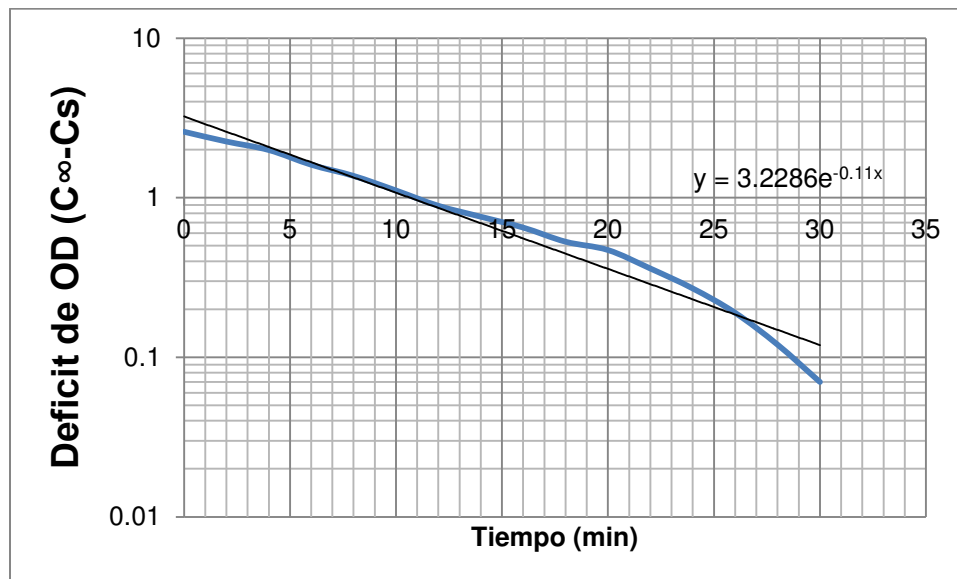


Figura IV.26: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_\infty - C_s$) de la prueba dos contra el tiempo.

Con esta gráfica se determinó el valor de k_{La} el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de oxígeno disuelto y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.11/min.

Como se había mencionado anteriormente el coeficiente de transferencia de masa, k_{La} , depende de la temperatura. Aunque los experimentos se realizaron a temperatura ambiente, es complicado con controlar este gradiente a nivel planta piloto Por lo tanto, se debe realizar un ajuste de los coeficientes obtenidos, a una condición estándar ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), para lo cual se utiliza la siguiente ecuación (ASCE, 2007).

$$(k_{La})_{20} = \frac{(k_{La})_T}{1.024^{(T-20)}} \quad (26)$$

$$(k_{La})_{20} = \frac{0.11}{1.024^{(24-20)}} = .100$$

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados de k_{La} , correspondiente al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito. Y entonces el valor SOTR se divide por la potencia consumida para obtener la eficiencia de aeración estándar (SAE).

$$SOTR = k_{La}(C_{\infty 20})V \quad (27)$$

$$SOTR = \left(\frac{.100}{\text{min}}\right) \left(8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (7408 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 355,584.59 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .355 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

Por lo tanto:

$$SAE = \frac{SOTR}{\text{consumo de potencia}} \quad (28)$$

$$SAE = \frac{.355 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}}{.192 \text{ kw}} = 1.85 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kw} * \text{h}}$$

De esta manera se pudo obtener una eficiencia de $1.84 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kw} * \text{h}}$, valor aceptable comparado con los valores de la tabla 2 presentada en el marco teórico, donde se muestra las eficiencias de aeración de diferentes dispositivos.

Para la prueba tres de la primera etapa se tienen los siguientes resultados, con respecto a la obtención de la eficiencia estándar de aeración.

Tabla 10: Oxígeno disuelto medido a diferentes tiempos de aeración, prueba 3.

Tiempo (min)	OD (mg/L)	Tiempo (min)	OD (mg/L)
0	5.25	16	7.24
2	5.72	20	7.37
5	6.14	23	7.45
7	6.44	26	7.54
10	6.75	29	7.6
13	7.02	34	7.67

Con los datos en la Tabla 9, se determinó un gráfico que muestra los cambios de oxígeno disuelto durante el período de aeración (Figura IV.3). Con una estimación del límite de saturación de oxígeno disuelto en el agua para estas condiciones de prueba (8 mg/L), se puede obtener el déficit de aeración para cada punto de muestreo que es el resultado de restar el oxígeno disuelto obtenido para cada punto de muestra (C_s) al valor de saturación de oxígeno disuelto en el agua (C^∞) (tabla 10) y con esto poder obtener la gráfica semi-log mostrada en la figura IV.27.

Tabla 11: Déficit de oxígeno disuelto para los diferentes puntos de muestra de la prueba 3.

Tiempo	OD (mg/L)	Tiempo	OD (mg/L)
0	2.59	16	0.65
2	2.25	18	0.53
4	1.99	20	0.47
6	1.61	22	0.36
8	1.37	24	0.27
10	1.11	26	0.19
12	0.89	28	0.12
14	0.76	30	0.07

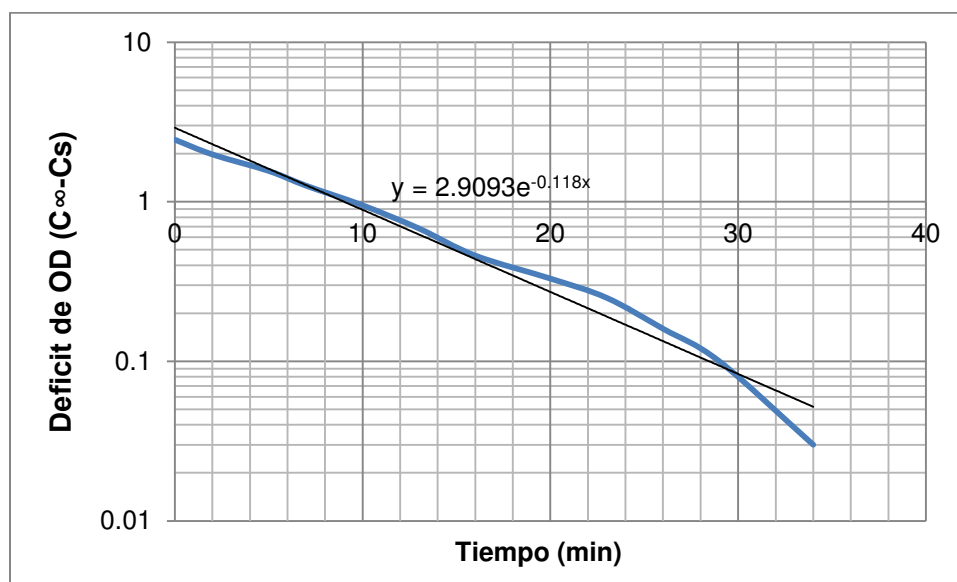


Figura IV.27: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^\infty - C_s$) de la prueba tres contra el tiempo.

Con esta gráfica se puede determinar el valor de k_{La} el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de oxígeno disuelto y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.064/min.

El coeficiente de transferencia de masa, k_{La} , está en función de la temperatura. A fin de comparar los coeficientes para los resultados obtenidos bajo diferentes temperaturas, la siguiente ecuación se puede usar para ajustar los coeficientes obtenidos a la condición estándar ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

$$(k_L a)_{20} = \frac{(k_L a)_T}{1.024^{(T-20)}} = \frac{0.118}{1.024^{(28-20)}} = .0976$$

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados k_{La} , correspondiente al valor ajustado de C_∞ y al volumen del depósito. Y entonces el valor SOTR se divide por la potencia consumida para obtener la eficiencia de aeración estándar (SAE).

$$SOTR = k_L a (C_{\infty 20}) V \quad (29)$$

$$SOTR = \left(\frac{.0976}{\text{min}}\right) \left(8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (7408 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 347,075.98 \frac{\text{mg}O_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .347 \frac{\text{kg}O_2}{\text{h}}$$

Por lo tanto:

$$SAE = \frac{SOTR}{\text{consumo de potencia}} \quad (30)$$

$$SAE = \frac{.355 \frac{kgO_2}{h}}{.192 \text{ kw}} = 1.80 \frac{kgO_2}{kw * h}$$

De esta manera se obtuvo una eficiencia de $1.80 \frac{kgO_2}{kw * h}$, valor aceptable comparado con la tabla 2 presentada en el marco teórico que muestra las eficiencias de aeración de diferentes dispositivos.

Tunsutapanich en el 2006 al realizar la prueba de 3 módulos de aeración mecánica superficial de escobillas, obtuvo una Eficiencia Estándar de Aeración (SAE) .6, 1.1, y 1.6 respectivamente como se muestra en la Tabla (Tunsutapanich *et al*, 2006) .

Tabla 12. Resultados de SEA (Tunsutapanich *et al*, 2006).

Tipo de Aireador	Velocidad (rpm)	SAE (kgO ₂ /kWh)
Modelo taiwanés	80-100	0.6
Modelo 1	80-100	1.1
Modelo 2	100-120	1.6

Con base en las ecuaciones descritas anteriormente, Tunsutapanich calculó los valores de SEA y los resultados mostraron que el modelo 2 obtuvo el mayor SAE es decir la mayor eficiencia de aeración, lo que significa que en una hora de

funcionamiento puede proporcionar 1,6 kg de oxígeno mediante el uso de sólo 1 kWh de energía. Comparando este resultado de 1.6 kgO₂/kWh con el que se obtuvo de 1.76 kgO₂/kWh podemos afirmar que nuestro dispositivo en estudio presentó un 10% de eficiencia mayor que los sistemas mecánicos superficiales de paletas estudiados por Tunsutapanich (Tunsutapanich, 2006).

En el 2005 Robert L. Jones y otros, presentaron una publicación de una patente, donde muestran un sistema de aeración basado en un difusor de burbujas dentro de una cámara de mezcla la cual permite una mejor distribución de las burbujas en el tanque contenedor del líquido. Una vez realizadas las pruebas pertinentes así como el análisis correspondiente, Robert L. Jones obtuvo los siguientes resultados para la Eficiencia Estándar de Aeración (SAE), 0.91 kg O₂/kWh, 0.94 kg O₂/kWh y 0.95 kg O₂/kWh (Jones *et al*, 2005). Si comparamos estos resultados con los obtenidos en las pruebas experimentales realizadas, se obtiene que el dispositivo en estudio presenta un 89% de eficiencia superior al sistema de difusión de burbujas dentro de una cámara de mezclado estudiada por Robert L. Jones (Jones *et al*, 2005).

En el estudio realizado por el Profesor T. J. Casey en el 2009 donde realizó una prueba en agua limpia para determinar la Eficiencia Estándar de Aeración (SAE) de los sistemas de aeración por difusión de burbuja fina, menciona que el valor SAE para sistemas de aire de burbujas finas difusa típicamente cae dentro de la gama de 3 - 4 kg O₂/kWh. (Casey, 2009). Comparando el promedio de estos valores que menciona el Profesor T. J. Casey con el promedio del valor de la

Eficiencia Estándar de Aeración obtenido del dispositivo de aeración basado en la caída de presión, podemos determinar que estos sistemas de difusión presentan una eficiencia 98% superior en su proceso de aeración. Sin embargo estos resultados muestran una discrepancia notable con los presentados por Metcalf & Eddy los cuales mencionan que los dispositivos de aeración por difusión de burbuja fina, presentan un SAE que caen dentro del rango de 1.2 a 2.0 kg O₂/kWh, por lo que hay una variación del doble entre una afeveración y otra (Metcalf y Eddy, 2002).

IV.5.- Resumen de resultados

Con la finalidad de poder apreciar mejor los resultados obtenidos en las pruebas se elaboró una tabla donde se muestra un resumen de los promedios de datos obtenidos en las pruebas experimentales.

En la tabla se observa que en la mayoría de las pruebas la adsorción de oxígeno disuelto con respecto al oxígeno disuelto inicial es superior al 50%, exceptuando las pruebas 1 y 2, donde el oxígeno disuelto inicial estaba próximo a la saturación por lo que el porcentaje de adquisición de oxígeno fue poco. La distribución del oxígeno disuelto resulto homogénea en todas las pruebas, dado que no existía una variación significativa entre los resultados obtenido de un nivel de profundidad a otro como se puede observar en la tabla 13.

Tabla 13: Resumen de Resultados de la etapa dos con respecto al espacio.

	OD	Tiempo	Profundidad	OD Inicial	Temperatura
	(mg/L)	(Min)	(cm)	(mg/L)	°C
P1	7.5	5	20	7.4	24
	7.58	10	20		
	7.716	20	20		
	7.941	40	20		
P2	8.087	90	20	7.7	24
	8.082		40		
	8.086		60		
	8.086		80		
	8.08		100		
P3	7.87	60	20	7.1	25
P4	6.523	5	40	5.95	27
	7.181	15	40		
	7.703	60	40		
P5	7.77	90	20	5.1	27
P6	7.65	90	40	5.2	27
P7	7.85	90	60	5.4	26
P8	7.78	90	80	5.4	27
P9	7.9	90	100	5.6	28
P10	8.03	90	20	6.2	25
	8.03		40		
	8.03		60		
	8.03		80		
	8.03		100		
P11	8.1	90	20	6.2	24
	8.1		40		
	8.1		60		
	8.09		80		
	8.09		100		

En la figura IV.28 se presenta una gráfica donde se muestra el oxígeno disuelto en el agua durante un lapso de tiempo, referentes a las pruebas experimentales de la etapa uno con respecto al tiempo. En esta gráfica se observa que el comportamiento del oxígeno disuelto es muy similar en los 3 casos, este haciendo

de forma acelerada en los primero 30 minutos logrando llegar a una saturación superior al 95% del total para los 3 casos lo que demuestra la eficiencia del sistema de aeración. Al final se logró un incremento aproximado para los 3 casos del 50% con respecto al oxígeno disuelto inicial.

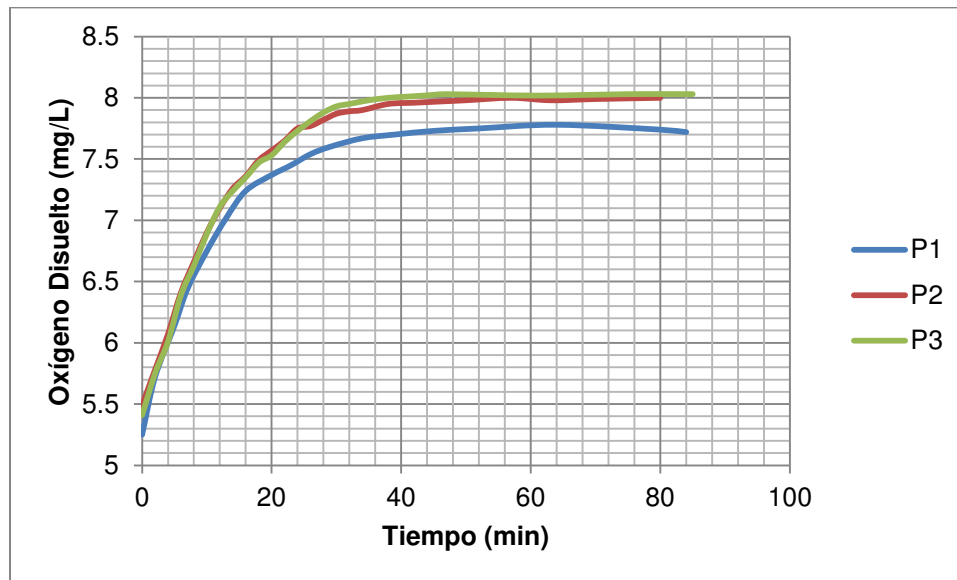


Figura IV.28: oxígeno disuelto durante un lapso de tiempo, referente a la etapa uno experimental.

En la tabla 14 se muestran los valores obtenidos de las pruebas experimentales de la etapa uno, en esta se observa que como ya se ha mencionado anteriormente, no existe una variación significativa en los resultados obtenidos entre las 3 pruebas. En promedio tenemos una eficiencia de aeración estándar de $1.76 \text{ kgO}_2/\text{Kw}\cdot\text{h}$ y una velocidad de transferencia de oxígeno estándar promedio de $0.339 \text{ kgO}_2/\text{h}$.

Tabla 14: Resumen de Resultados de la etapa uno con respecto al tiempo.

	OD (mg/L)	Tiempo (Min)	Profundidad (cm)	OD Inicial (mg/L)	Temperatura °C	k_{La} 1/min	SOTR kgO ₂ /h	SAE kgO ₂ /Kw*h
P1	7.71	84	40	5.25	26	0.097	0.347	1.8
P2	8	80	40	5.49	24	0.0888	0.315	1.64
P3	8.03	85	40	5.41	28	0.1	0.355	1.85

IV.6.- Pruebas a nivel de banco

Adicionalmente a las pruebas llevadas a cabo en la planta piloto, se realizaron una serie de experimentos en los laboratorios de UNESCO-IHE ubicados en Delf – Holanda. Estas pruebas se realizaron bajo condiciones estándar en agua limpia y con lodo activado.

IV.6.1.- Determinación de aeración natural

En la fase experimental se llevó a cabo en un sistema que consta de un tanque de 20 Litros, y un mezclador IKA modelo RW20, a este mezclador se le acopló una paleta de mezclado cuya longitud es de 50 cm y alcanza un ancho de 10 cm. Al iniciar el experimento se desoxigenó el agua, para ello se agregan dos sustancias químicas, sulfito de sodio NaOS en una proporción de 8 mg/L por cada 1 mg/L de oxígeno disuelto, y cloruro de cobalto CoCl_2 en una proporción de 1.5 mg/L. Una vez agregadas estas sustancias, se inicia el mezclado hasta que se diluyan por completo y se tome una lectora de oxígeno disuelto igual o cercana a cero. Hecho esto se detiene el mezclado y se deja reposando el líquido. Este se monitorea por 24 horas para determinar la magnitud de la adquisición de oxígeno disuelto por efecto de la presión atmosférica (figuras IV.29 y IV.30).

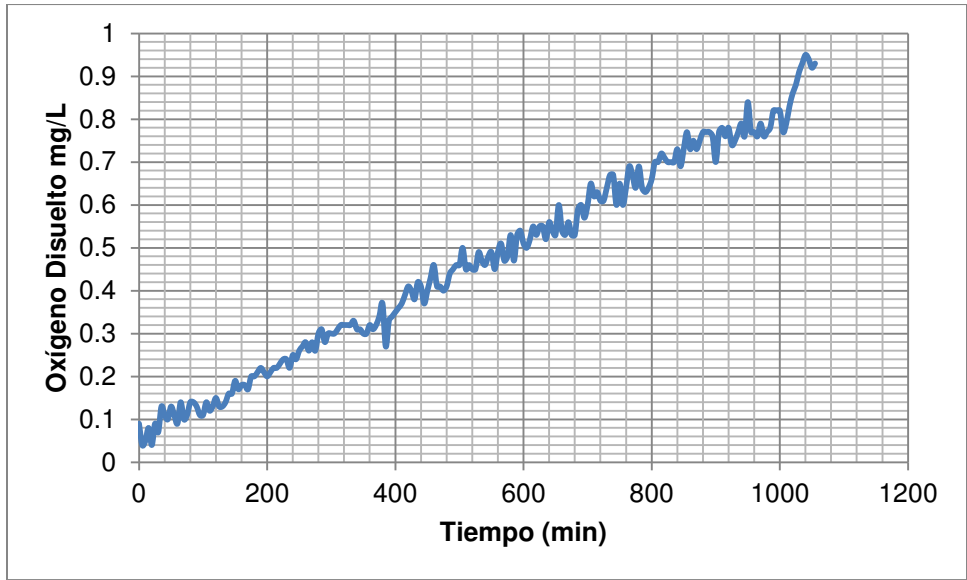


Figura IV.29: Gráfica de aeración natural Oxígeno disuelto contra tiempo.

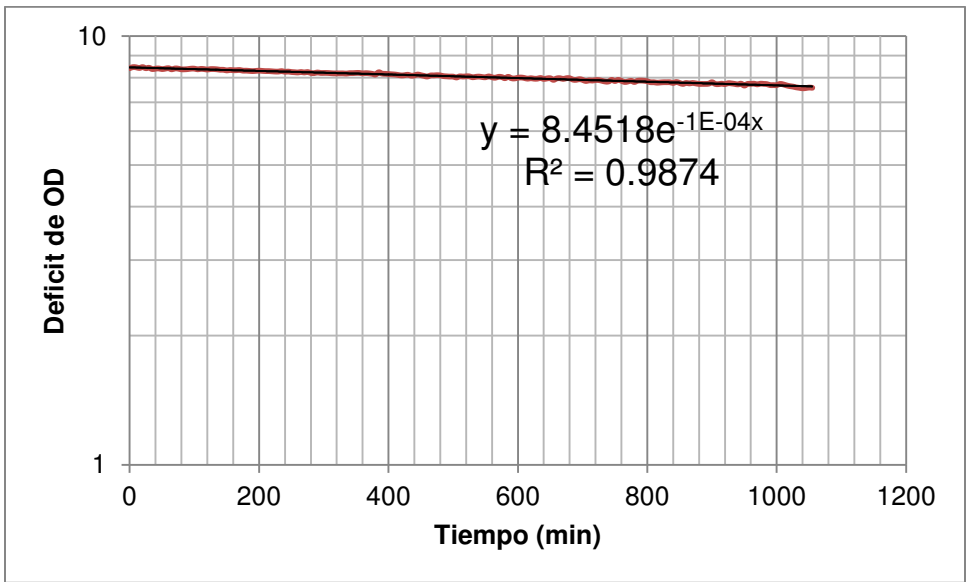


Figura IV.30: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto en la aeración natural contra tiempo.

Con esta gráfica se puede determinar el valor de k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de OD y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.0001/min.

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno), correspondiente al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito.

$$SOTR = k_{La}(C_{\infty 20})V \quad (31)$$

$$SOTR = \left(\frac{.0001}{\text{min}}\right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (20 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 1.02 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .000001 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

IV.6.2.- Determinación de aeración natural más mezclado.

El experimento se llevó a cabo bajo las mismas condiciones del anterior, sin embargo el mezclador continuó trabajando durante 4 horas para verificar el grado de saturación obtenido con el mezclado, para comprobar esto se utiliza una sonda para medir el oxígeno disuelto en el medio líquido. Una vez alcanzado el grado de saturación a las 4 horas, se procederá a calcular el K_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) en base a los datos obtenidos (figuras IV.31 y IV.32).

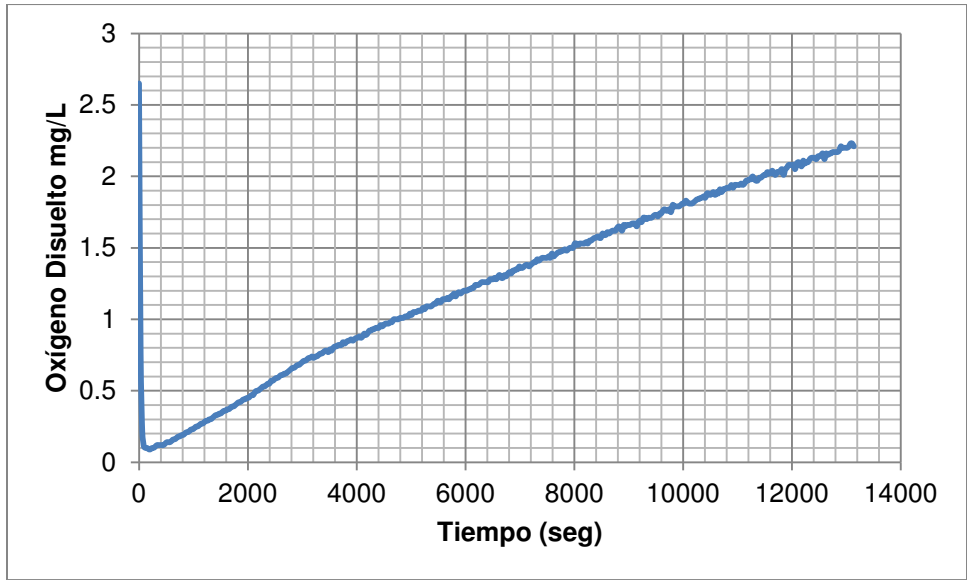


Figura IV.31: Gráfica de concentración de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de mezclado.

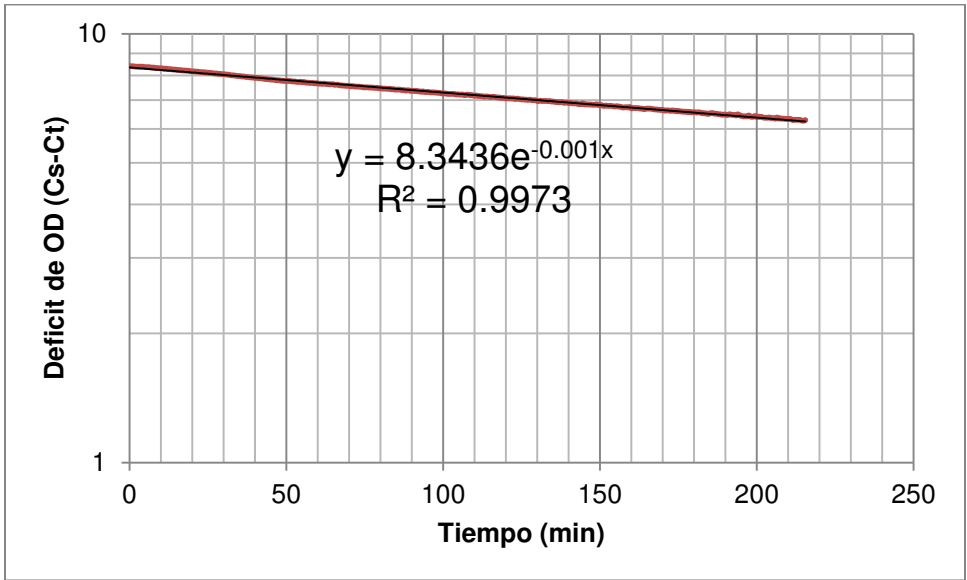


Figura IV.32: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^\infty - C_t$) de la prueba uno con respecto al tiempo de mezclado.

Con esta gráfica se puede determinar el valor de k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de OD y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.001/min.

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno), correspondiente al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito.

$$SOTR = k_L a (C_{\infty 20}) V \quad (32)$$

$$SOTR = \left(\frac{.001}{\text{min}} \right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) (20 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \right) = 10.2 \frac{\text{mg} O_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .00001 \frac{\text{kg} O_2}{\text{h}}$$

IV.6.3.- Determinación de aeración del dispositivo basado en la caída de presión.

Al igual que en los experimentos anteriores la prueba se llevó a cabo en un sistema que consta de un tanque de 20 Litros, el cual está conectado a un sistema de conductos o tuberías de PVC con un diámetro interno de 12 mm y un diámetro externo de 16 mm y un mezclador IKA modelo RW20, a este mezclador se le acoplo una paleta de mezclado cuya longitud es de 50 cm y alcanza un ancho de 10 cm. El flujo recircula en el sistema con ayuda de una bomba peristáltica Waston

Marlow modelo 603S de 200 vatios. Además se acopló en el circuito un dispositivo de aeración basado en la caída de presión. Al igual que en los experimentos anteriores se debe desoxygenar el agua con el método antes explicado. Una vez desoxygenada el agua se detiene el mezclador y se pone en marcha la bomba, lo que permite que el flujo pase por el dispositivo de aeración y este a su vez es oxigenado. El oxígeno disuelto se mide en intervalos de 30 segundos hasta alcanzar la saturación del medio líquido, esto se logra con ayuda de una sonda de membrana sensible al oxígeno, denominada Oxi 3310. Una vez hecho esto se analizan los datos resultantes y se calcula el K_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) para el dispositivo de aeración (figura IV.33 y IV.34).

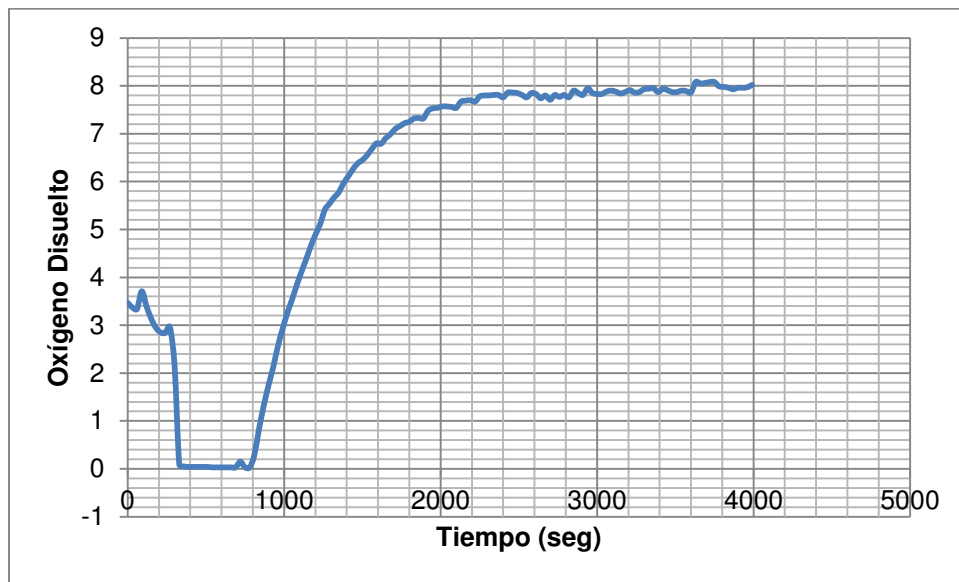


Figura IV.33: Gráfica de concentración de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de aeración.

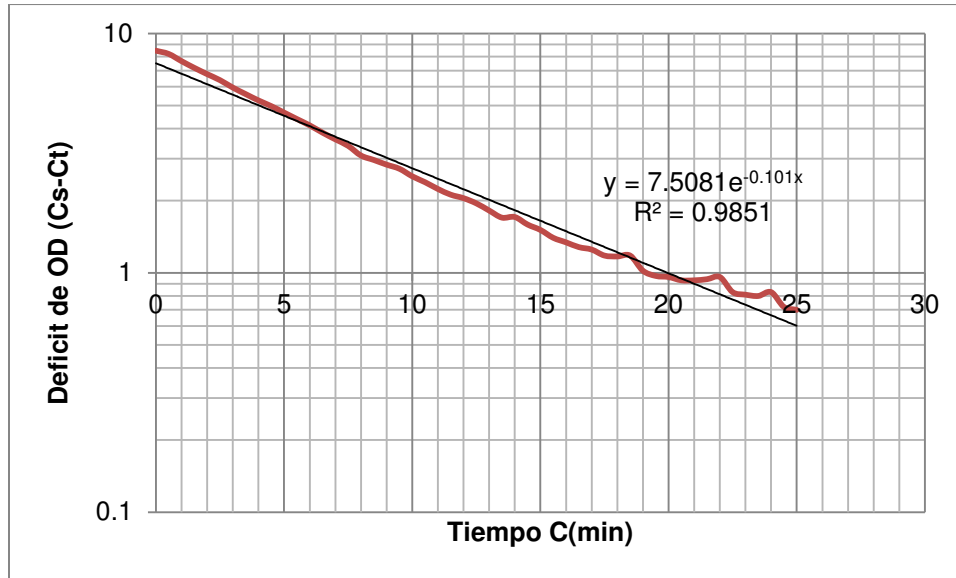


Figura IV.34: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C^\infty - C_t$) de la prueba dos con respecto al tiempo tiempo de aeración.

Con esta gráfica se puede determinar el valor de k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de OD y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.101/min.

El coeficiente de transferencia de masa, k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno), está en función de la temperatura. A fin de comparar los coeficientes para los resultados obtenidos bajo diferentes temperaturas, la siguiente ecuación se puede usar para ajustar los coeficientes obtenidos a la condición estándar ($T = 20^\circ \text{C}$).

$$(k_L a)_{20} = \frac{(k_L a)_T}{1.024^{(T-20)}} \quad (33)$$

$$(k_L a)_{20} = \frac{0.101}{1.024^{(22-20)}} = .094$$

La velocidad de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) se obtiene como el promedio de los productos de los valores ajustados k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno), correspondiente al valor ajustado de C_{∞} y al volumen del depósito.

$$SOTR = k_{La}(C_{\infty 20})V \quad (34)$$

$$SOTR = \left(\frac{.094}{\text{min}}\right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 479.4 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$SOTR = .000479 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

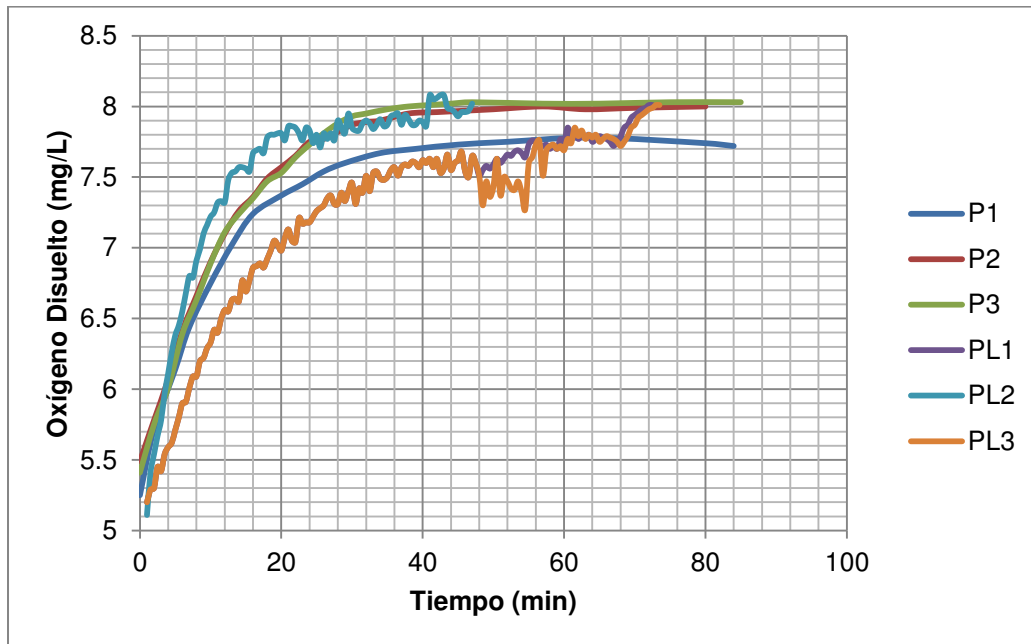


Figura IV.35. Gráfica de oxígeno disuelto con respecto al tiempo de las pruebas a nivel planta piloto y en reactor de 20 L.

En la figura IV.35 se observa la aportación de oxígeno disuelto a consecuencia de la aeración generada por el dispositivo basado en la caída de presión, tanto a nivel planta piloto, donde se manejaba un volumen aproximado de 7,400 litros, referentes a las líneas P1, P2 y P3, como el nivel de tanque, donde se manejaba un volumen de 20 litros, representado por las líneas PL1, PL2 y PL3. La grafica muestra que existe un comportamiento muy similar en todas las pruebas realizadas, sin embargo las condiciones en las que se realizaron las pruebas tuvieron variaciones significativas, principalmente en el volumen manejado y el flujo de agua, lo que dio origen a los resultados obtenidos, dado que si los flujos de agua implementados hubiesen sido iguales, el tiempo de aeración en el tanque de 20 L hubiese sido mucho menor. Dado que a mayor flujo de agua, mayor es, la caída de presión que provoca la aeración en el dispositivo.

IV.6.4.- Determinación de consumo de oxígeno de organismos en lodo

El experimento se llevó a cabo en un sistema que consta de un tanque de 10 litros, bajo las mismas condiciones del experimento anterior. Para iniciar el experimento se llenó el contenedor con lodo de retorno, obtenido de una planta tratadora de aguas residuales. Una vez llenado el tanque con lodo, se inicia el proceso de aeración durante una hora. Hecho esto se detiene la bomba y se deja reposando el líquido. Este es monitoreado por 1 hora para determinar la magnitud del consumo de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos, este proceso se repetirá en 2 ocasiones en una misma prueba (figura IV.36, IV.37 y IV.38).

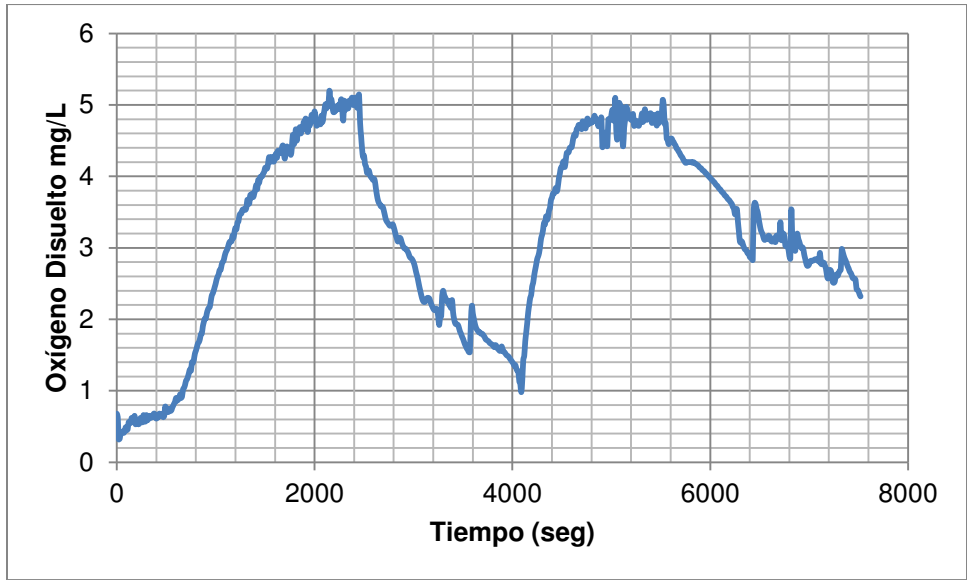


Figura IV.36: Gráfica de consumo de oxígeno disuelto de microorganismos en lodo, prueba 1.

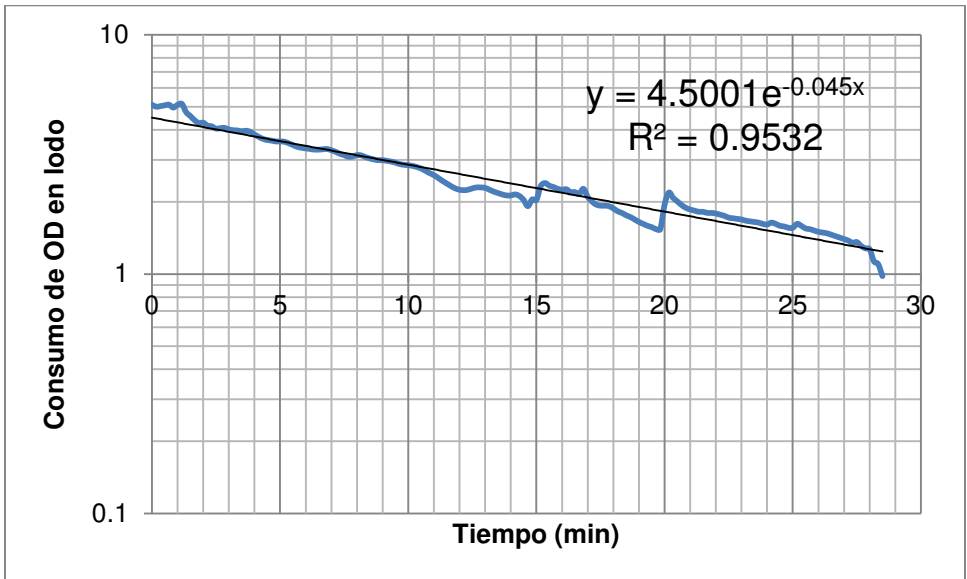


Figura IV.37: Gráfica de semi-log de consumo de OD de microorganismos en lodo, prueba 1 parte 2.

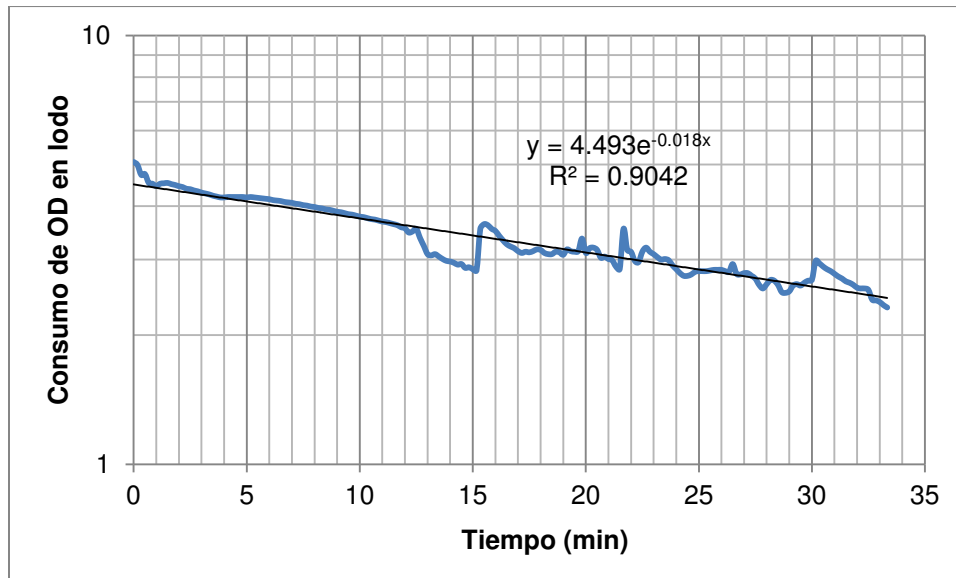


Figura IV.38: Gráfica de semi-log de consumo de OD de microorganismos en lodo, prueba 1 parte 2.

En las dos gráficas anteriores se pudo determinar el valor de k_{La} (coeficiente de transferencia de oxígeno) correspondiente al consumo de oxígeno disuelto de parte de los microorganismos contenidos en en el lodo el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de OD y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.045/min para la primera parte y 0.018/min para la segunda.

La velocidad de captación de oxígeno (OUR) se obtiene como el producto de los valores k_{La} , C_{∞} y al volumen del depósito.

$$OUR = k_L a (C_{\infty} - C_{crit}) V \quad (35)$$

$$OUR = \left(\frac{.045}{\text{min}}\right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 2.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 175.5 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$OUR = .000175 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

La velocidad de captación de oxígeno (OUR) se obtiene como el producto de los valores k_{La} , C_{∞} y al volumen del depósito.

$$OUR = k_{La}(C_{\infty} - C_{crit})V \quad (36)$$

$$OUR = \left(\frac{.018}{\text{min}}\right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 2.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 70.2 \frac{\text{mgO}_2}{\text{h}}$$

$$OUR = .00007 \frac{\text{kgO}_2}{\text{h}}$$

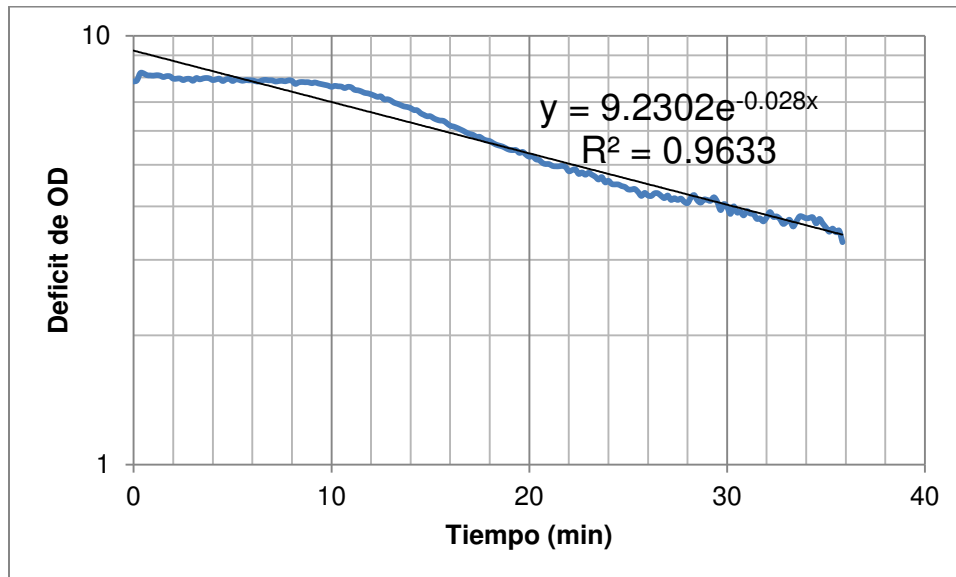


Figura IV.39: Gráfica semi-logarítmica del déficit de oxígeno disuelto ($C_{\infty} - C_t$) de la prueba 4 con respecto al tiempo de aeración.

Con esta gráfica se puede determinar el valor de k_{La} el cual corresponde a la pendiente de la gráfica semi-log entre el déficit de OD y el tiempo de aeración, dando como resultado un k_{La} de 0.028/min.

La velocidad de transferencia de oxígeno (OTR_{max}) se obtiene como los productos de los valores k_{La} , C^∞ y al volumen del depósito.

$$OTR_{max} = k_L a (C_\infty) V \quad (37)$$

$$OTR_{max} = \left(\frac{.028}{\text{min}}\right) \left(8.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (10 \text{ L}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}\right) = 142.8 \frac{\text{mg}O_2}{\text{h}}$$

$$OTR_{max} = .000142 \frac{\text{kg}O_2}{\text{h}}$$

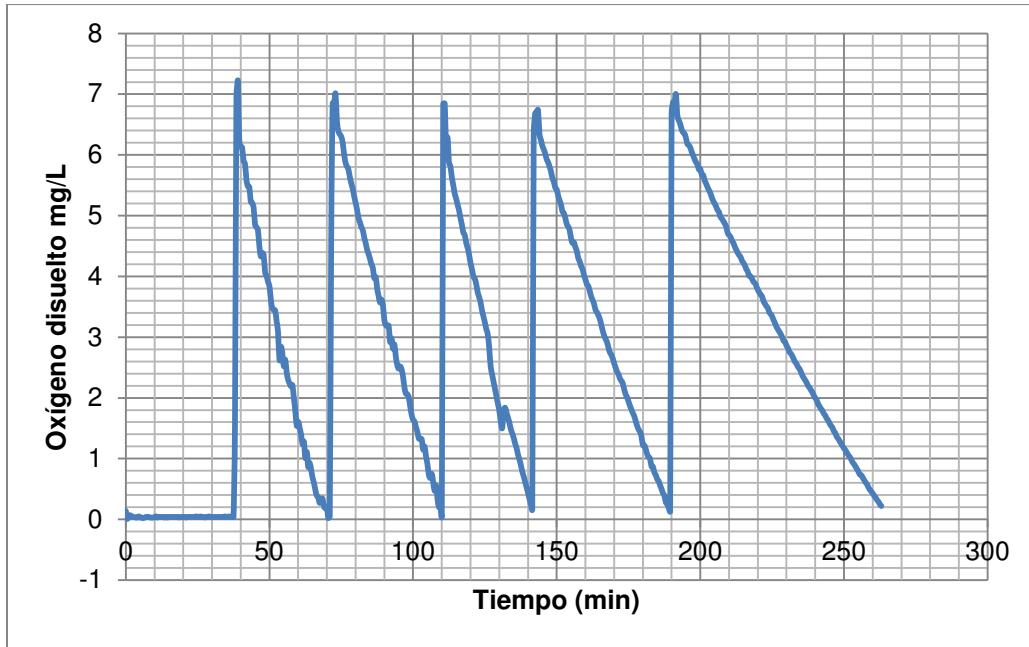


Figura IV.40: Gráfica referente al consumo de oxígeno de microorganismos en lodo.

Prueba 4-2

Esta prueba permite medir la actividad de los microorganismos a través de la cantidad de oxígeno que consumen. La prueba “Tasa de Captación de Oxígeno” (Oxygen Uptake Rate) es la cantidad de oxígeno consumido en una muestra de lodos activados y se expresa en $\text{mgO}_2/\text{L}\cdot\text{hr}$. La “tasa de respiración” (Respiration Rate) relaciona los resultados de la prueba con la concentración de organismos en la muestra de lodos activados. Nuestros resultados se usan para calcular la RR. Los resultados son por lo general graficados. Se toma la parte lineal del gráfico en descenso para determinar el consumo de oxígeno en un intervalo de tiempo. El OUR es más alto, al inicio del proceso de aeración y va decreciendo conforme pasa el tiempo.

OUR (O₂mg/L/hr)

$$= \left(\frac{\text{Concentración de OD inicial (mg/L)} - \text{Concentración de OD final (mg/L)}}{\text{Tiempo (min)}} \right) 60 \text{ min/hr}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{6.14 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 1.01 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{22.5 \text{ min}} \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right) = 13.68 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{6.01 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 1.15 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{27.5 \text{ min}} \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right) = 10.6 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{6.15 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 1.22 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{35 \text{ min}} \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right) = 8.45 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{5.67 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 1.17 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{50 \text{ min}} * \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right) = 5.4 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) \text{ Promedio} = \frac{13.68 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr} + 10.6 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr} + 8.45 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr} + 5.4 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}}{4}$$

$$\text{OUR} \left(\frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \right) \text{ Promedio} = 9.53 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se tiene

una Tasa de Captación de Oxígeno promedio de $9.53 \frac{\text{O}_2\text{mg}}{\text{L}} \text{ hr}$.

IV.6.4.1.-Determinación de sólidos en lodo.

Solidos Totales

$$ST = \frac{(G1 - G)}{V} \quad (38)$$

ST: son los sólidos totales, en mg/L;

G1: es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

G: es el peso de la cápsula vacía, en mg a peso constante.

V: es el volumen de muestra.

$$ST = \frac{(2190mg - 2080mg)}{.05L} = 2,200 \text{ mg/L}$$

Solidos Volátiles Totales

$$SVT = \frac{(G1 - G2)}{V} \quad (39)$$

SVT es la materia orgánica total, en mg/L;

G1: es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

G2 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en mg,

V es el volumen de muestra, en mL.

$$SVT = \frac{(2190mg - 2130mg)}{.05L} = 1200 \text{ mg/L}$$

Solidos Suspendidos Totales

$$SST = \frac{G3-G}{V} \quad (40)$$

SST: son los sólidos suspendidos totales, en mg/L;

G: es el peso del crisol con el disco a peso constante, en mg;

G3: es el peso del crisol con el disco y el residuo seco, en mg,

V: es el volumen de muestra, en mL.

$$SST = \frac{2250mg - 2160mg}{.05L} = 1,800 \text{ mg/L}$$

Solidos Suspendidos Volátiles Totales

$$SSVT = \frac{G4-G}{V} \quad (41)$$

SST: son los sólidos suspendidos totales, en mg/L;

G: es el peso del crisol con el disco a peso constante, en mg;

G4: es el peso del crisol con el residuo, después de la calcinación, en mg,

V: es el volumen de muestra, en mL.

$$SSVT = \frac{2190mg - 2160mg}{.05L} = 600 \text{ mg/L}$$

$$Svt = 900 \text{ mg/L}$$

Con los datos obtenidos hasta el momento es posible calcular la frecuencia respiratoria de los microorganismos presentes en el lodo, para ellos se utiliza la siguiente formula.

$$RR (O_2mg/gr/hr VSS) = \frac{OUR (O_2mg/L/hr)}{MLVSS (gr/L)} \quad (42)$$

$$RR (O_2mg/gr/hr VSS) = \frac{9.53 \frac{O_2mg}{L \cdot hr}}{1.2 \text{ gr/L}}$$

$$RR = 7.94 \text{ O}_2\text{mg/gr/hr VSS}$$

Por lo tanto tenemos una frecuencia de respiración por parte de los microorganismos de 7.94 miligramos de oxígeno por cada gramo de materia orgánica en una hora.

En el siguiente experimento se utilizaron 2 reactores el principal consta de 10 litros donde se lleva a cabo la aeración del lodo activado, en el segundo reactor consta de una capsula de 20 mL donde cada 6 minutos se recircula el lodo para medir la velocidad de consumo de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos. En el reactor primario se le agregó un sustrato (Acetato de Sodio Trihidratado $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) en una concentración de 43.2% en 100mL de agua destilada. En la figura IV.48 se puede observar el comportamiento que tienen los microorganismos ante la presencia de un sustrato (alimento), se puede notar la demanda de oxígeno aumenta por lo que empieza a decaer los niveles de oxígeno disuelto en el reactor, una vez consumido todo el sustrato, los niveles de oxígeno disuelto comienza a subir nuevamente (figura IV.41).

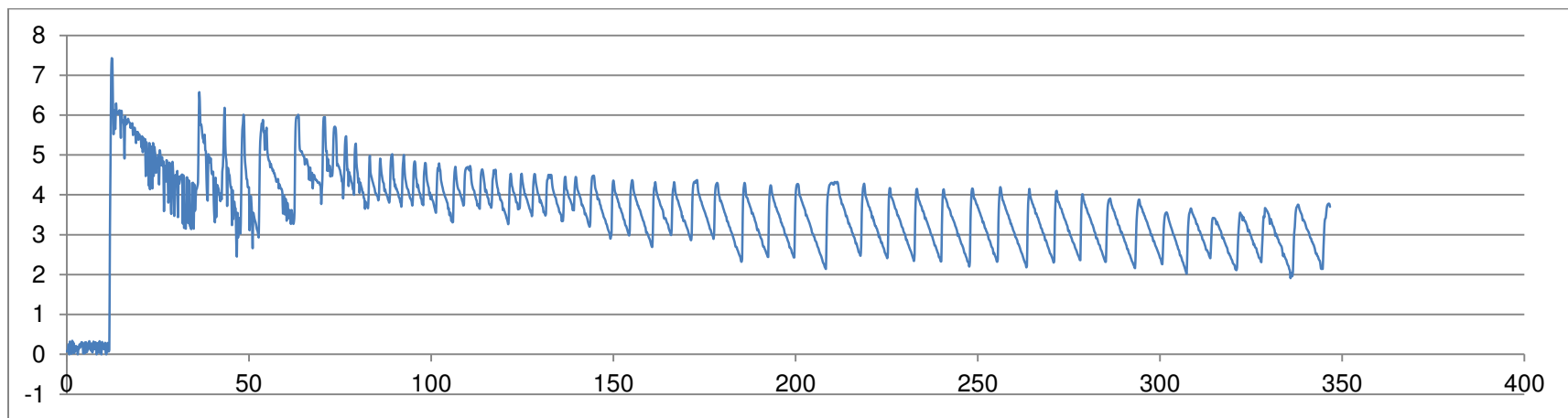


Figura IV.41: Gráfica de consumo de oxígeno de microorganismos al consumir sustrato.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la experimentación y análisis de información, pudimos determinar las siguientes conclusiones.

- El dispositivo basado en la caída de presión ha demostrado proporcionar oxígeno disuelto de manera homogénea en todo el volumen en estudio (cada uno de los 48 puntos así como en los 5 niveles diferentes de profundidad).
- Las pruebas realizadas permitieron determinar que el dispositivo puede lograr la saturación de oxígeno disuelto en el agua en un tiempo máximo de 1 hora a temperatura ambiente.
- En las pruebas con la celda electroquímica, se confirma que existe un cambio en el diferencial de potencial y la corriente del agua en función del grado de saturación de oxígeno disuelto presente, lo que demuestra que la implementación de una sonda de membrana sensible al oxígeno, es un método viable para la determinación de oxígeno disuelto en el agua.
- La eficiencia de aeración del dispositivo basado en la caída de presión es directamente proporcional al flujo que se está produciendo mediante la bomba de agua, a mayor flujo se producirá una mejor aeración.
- El dispositivo cuenta con muchas ventajas en su implementación, dadas sus características físicas, resulta muy fácil su manejo, elaboración y mantenimiento.

- La elaboración del dispositivo es económica, dada su sencillez y el tipo de materiales que se implementan.
- El dispositivo muestra una eficiencia de aeración estándar de $1.76 \frac{kgO_2}{kW*h}$. Este valor comparado con la eficiencia de otros dispositivos que muestra Environmental Dynamics International en su documento “Guía de eficiencia de aeración”, tales como los sistemas mecánicos que presentan una eficiencia $1.5 - 2.0 \frac{kgO_2}{kW*h}$ o los sistemas de difusión de burbuja fina que tienen una eficiencia de $3.0 - 4.0 \frac{kgO_2}{kW*h}$, por lo que podemos concluir que los sistemas de aeración basados en la caída de presión muestran una eficiencia de aeración aceptable.

Bibliografía

AHMET BAYLAR, FAHRI OZKAN, MEHMET UNSAL, 2007, *On the Use of Venturi Tubes in Aeration*, CLEAN – Soil, Air, Water V 35, Is 2, p 183–185.

AHMET BAYLAR, FAHRI OZKAN, 2005, *Applications of Venturi Principle to Water Aeration Systems*, Environmental Fluid Mechanics 6: 341–357 Waterways, Proc. Inst. Civil Eng. Water, Mar. Energy 112(March), 20–30.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2007, *Measurement of oxygen transfer in clean water*, Standards ASCE/EWRI 2-06, 42 p.

ANDREU P., et al., 2009, *Limpieza con ácido fórmico de los difusores de membrana para la aeración en un proceso de fangos activos*, Tecnología del Agua, 311: p. 209.

APHA, 1998, *Standards Methods for the examination of water and waste waters*, 20 th. American Public Health, Association Washington. DC. USA.

APHA, 1992, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, 18th Edition.

BAYLAR, A., 2003, *An investigation on the use of venturi weirs as an aerator*, Water Qual. Res. J. Can. 38(4), p 753–767.

BAYLAR, A. UNSAL, M.; OZKAN, F., 2007, *Determination of the optimal location of the air hole in Venturi aerators*. Clean, v.35, n.3, p.246-249.

BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F., 2009, *Hydraulic structures in water aeration processes*. Water, Air and Soil Pollution, v.203, p.1-14.

BISCHOF, F., HÖFKEN, M., AND DURST, F., 1996, *Design and construction of aeration systems for optimum operation of large wastewater treatment plants*. Water Science and Technology, 33(12): p. 189-198.

BONTEMPELLI G., R. TONIOLO, 2009, Measurement Methods | Electrochemical: Linear Sweep and Cyclic Voltammetry Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, p 643–654

CHANSON, H., 1995, *Predicting oxygen content downstream of weirs, spillways and waterways*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering, V 112 Is 1, p. 20-30

COLLADO, S., SIMÓN, P., LARDÍN, C., ABELLAN, M., POLO, M., RANCAÑO, A., LACA, A., DÍAZ, M. 2009., *Transferencia de oxígeno en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales: I.- Necesidades energéticas y suministro de oxígeno*. CADAGUA. C/ Daniel Balaciart, p 4-17. 46020. Valencia.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), 2009, *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Edición 2009, México, SEMARNAT, p 167.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), “*Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*”, Edición 2013.

CRISON, 2005, *Aguas – Industria (en línea)*. Consultada 16 de Agosto 2014, catalogo primera edición.

DAUGHERTY, R. L., FRANZINI, J. B., AND FINNEMORE, E. J., 1985, *Fluid mechanics with engineering applications*, McGraw-Hill, Inc., New York.

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, 13 de diciembre de 1989., *nmx-aa-012-scfi-2001, análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*.

DIEGO ROSSO, LORY E. LARSON AND MICHAEL K. 2008, *Stenstrom, Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art*, Water Science and Technology; 973-978. doi: 10.2166/wst.2008.218.

DONG, C., ZHU J., MILLER, C.F., 2009, *Evaluation of six aerator modules built on venturi air injectors using clean water test*, Water Science & Technology—WST | 60.5.

DU, H., LIN, J., ZUERCHER, C., 2012, *Higher efficiency of CO₂ injection into seawater by a venture than a conventional diffuser system*, Bioresource Technology v 107 p 131–134.

ENVIRONMENTAL DYNAMICS INTERNATIONAL, 2011, *Aeration Efficiency Guide*, 5601 Paris Road Columbia, MO 65202 USA, pp 11.

FAHRIÖZKAN, AHMETBAYLAR, CIHANAYDIN, MEHMET Ü., 2008, *CFD analysis to predict optimal air inlet hole diameter of venture tube in terms of air injection*, e-Journal of New World Sciences Academy 2008, V: 3, N: 2 IS:1306-3111 Article N: A0065.

FOY BD, ROTEM A, TONER M, TOMPKINS RG, YARMUSH ML, 1994, *A device to measure the oxygen uptake rate of attached cells: importance in bioartificial organ design.*, Massachusetts General Hospital, Department of Surgery, Harvard Medical School, Boston, MA. Cell Transplantation 3(6):515-527.

GALLI O., 2007, *Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC (Santa Ana- Corrientes).

GARY ROGERS, 2009, *Speece Cones Saturate Water With Oxygen*, Ozone, Aquatic Eco-Systems, Inc. 2395 Apopka Boulevard Apopka, Florida 32703 USA.

GAUTAM CHALASANI Y WEIMIN SUN, 2007, *Measurement of Temperature Effects on Oxygen Uptake Rate in Activated Sludge Treatment*, Michigan State University College of Engineering , ENE 806 Spring.

GHASSEMI, H., HAMIDREZA, F.F., 2011. *Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter*. Flow Meas. Instrum. 22, p 406–412.

GONÇALVES, M. A. B. 1999, *Estudo de transferência de oxigênio em reatores Air-Lift utilizando Venturi e peças cisalhantes*. Campinas: UNICAMP, p 144. Tese Doutorado.

GREENPEACE, 2007, *The state of water resources in the Philippines*, Greenpeace Southeast Asia.

GULLIVER, J.S., WILHELMS, S.C. AND PARKHILL, K.L.: 1998, *Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulics structures*, J. Hydraul. Eng. ASCE 124(7), p 664–671.

HIROAKI SUZUKI, HIROSHI OZAWA, SATOSHI SASAKI, ISAO KARUBE, 1998, *A novel thin-film Ag/AgCl anode structure for microfabricated Clark-type oxygen electrodes*, Sensors and Actuators B 53 p 140–146.

HIROAKI SUZUKI, TAISHI HIRAKAWA, IKUTOMÓ WATANABE, YUJI KIKUCHI, 2000, *Determination of blood pO_2 using a micromachined Clark-type oxygen electrode*, Analytica Chimica Acta 431p 249–259.

IMTA, 2001, *Tubos venture, dall y tobera*, Comisión Nacional del Agua insurgentes Sur # 2140 Col. Ermita San Angel, C.P. 01070 México, D. F.

JEFERSON S. PICCIN; ALESSANDER L. RISSINI; JEFERSON J. FREDDI; MARLO M. KOCH; VANDRÉ B. BRIÃO; MARCELO HEMKEMEIER, 2010, *Optimization of auto-aspiration aeration system type Venturi for the treatment of ferruginous water*, Rev. bras. eng. agríc. ambient. v.14 no.5 Campina Grande.

K. EYER, A. OEGGERLI Y E. HEINZLE, 2004, *On-line gas analysis in animal cell cultivation: II. Methods for oxygen uptake rate estimation and its application to controlled feeding of glutamine*, Biotechnology and Bioengineering V 45 P. 54–62.

KONGSKILDE, 2014, *Efficient systems for conveying of light materials in the paper and plastic induct*, Kongskilde Industries A/S Skælskørvej 64 DK-4180 Sorø • Denmark.

LEMBIT NEI, RICHARD G. COMPTON, 1995, *An improved Clark-type galvanic sensor for dissolved oxygen*, Sensors and Actuators B 30 (1996) p 83-87.

LOIRE STUAIRE. 2002, *La dynamique de la vie, Cahier indicaterus*, No 1. Janvier.

M.V. ANANTHA, V.V. GIRIDHARB, K. RENUGAC, 2009, *Linear sweep voltametry studies on oxygen reduction of some oxides in alkaline electrolytes*, International Journal of Hydrogen Energy V 34, Is 2, January 2009, P 658–664.

MANTILLA MORALES GABRIELA, 2008, *Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México*, AIDIS, en San Juan, PR In. AIDIS. Forjando el Ambiente que Compartimos. San Juan, AIDIS, p.1-8, Ilus.Monografía em Espanhol, Espanhol | REPIDISCA | ID: rep-20954.

MANGA, J., SERRALTA, J., SECO, A., FERRER, J., 2001. *Desarrollo de un sistema de control basado en lógica difusa para la aeración en un proceso de fangos activados*. Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte 9: 35-56.

MARIANA ROMERO-AGUILAR, ARTURO COLÍN-CRUZ, ENRIQUE SÁNCHEZ-SALINAS, MA. LAURA ORTIZ-HERNÁNDE, 2009, *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica*, Revista internacional de contaminación ambiental, v 25, n 3.

MARTELO, J., LARA, J.A., 2012, *Micrófitos flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte*, Ingeniería y Ciencia, ing. cienc. ISSN 1794–9165 V 8, n 15, p 221–243.

MARTÍNEZ, A., 2003, *Análisis comparativo de criterios de diseños de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas*, Instituto Politécnico Nacional. Pp. 244.

METCALF & EDDY.1996, *Ingeniería de Aguas Residuales*. P. 316.

MILACRON MARKETING CO., 2004, *Por qué es importante el Oxígeno Disuelto?*, Cimcool Technical Report, Queretaro - México.

LAHERA RAMÓN V., 2010, *Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales*. Quivera, 12 p 58-69. ISSN:1405-8626.

OVEZEA, A., 2009, *Saving energy: Using fine bubble diffusers*. Filtration & Separation, 46(1): p. 24-27.

OZKAN, F.; OZTURK, M.; BAYLAR, A., 2006, *Experimental investigations of air and liquid injection by Venturi tubes*. Water and Environment Journal, v.20, p.114-122.

PAOLA SCIARRA GATTI, 2004, *Electrodos para medir Glucosa*, XIII Seminario De Ing. Biomédica - Facultades De Medicina E Ingeniería - Univ. De La República Oriental 1 Del Uruguay.

POPEL H. J., 1976, *Aeration and Gas Transfer*, Delft University of technology.

R. S. RAMALHO, 2003, *Tratamiento de aguas residuales*, Reverte S. A., p. 223-252.

REMTAVARES, 2009, *Eficiencia Energética en los sistemas de aeración de procesos de Fangos Activados*, Madrid, Consultado el 15/4/2015 en <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/12/18/130276>.

ROBERT L. JONES; GLEN ALLEN; ROLAND SCHMIDT; MACON., 2005, *Aerator apparatus and method of use.*, Patent Application Publication, United States, US 2005/0167858 A1.

ROBERT R. WISE, AUBREY W. NAYLOR, 1985, *Calibration and use of a Clark-type oxygen electrode from 5 to 45°C*, Analytical Biochemistry V 146, Is 1, P 260–264.

RODRÍGUEZ, G., DORADO, D., BONSFILLS A., 2012. *Optimization of oxygen transfer through venturi-based systems applied to the biological sweetening of biogas*, Journal Of Chemical Technology And Biotechnology V: 87 Is: 6 Special.

RODRIGUEZA, G., DORADO, D., FORTUNY, M., GABRIEL, D., 2013. *Biotrickling filters for biogas sweetening: Oxygen transfer improvement for a reliable operation*, PSEP-346; P 8.

ROGELIO MAYARÍ NAVARRO, MA. DEL C. ESPINOSA LLORÉNS, JACQUELINE GUTIÉRREZ MARCELINA RUIZ, 2005, *Validación de La Determinación de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas y Aguas Residuales*, Revista CENIC. Ciencias Químicas, v. 36, Centro Nacional de Investigaciones Científicas Cuba.

ROMINA FERNANDEZ SIERRA, 2013, *Hacia un Aptaensayo Electroquímico Para la Detección de Gluten*, Tesis de Maestría en Ciencias Analíticas y Bioanalíticas, Universidad de Oviedo.

RUBÉN ALCIDES FRANCO IBARS, TARLEI ARRIEL BOTREL, SÉRGIO NASCIMENTO DUARTE, 2004, *Desarrollo y evaluación de tubos venturi para medición de caudal*, Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”(ESALQ) de la Universidad de Sao Paulo (USP), Brasil.

S. E. MANAHAN, 2007, *Introducción a la Química Ambiental*, Editorial Reverté, 90.

SANIKARN TUNSUTAPANICH, RATTANAWAN MUNGKUNG AND SHABBIR H. GHEEWALA., 2006, *Energy Performance Evaluation of Aerators for Shrimp Farming*. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment.

STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Sit). 2014, *Dissolved Oxygen*. (en línea). Consultada 14 de Agosto 2014. Disponible en: <http://ciese.org/curriculum/waterproj/oxygen> Center for Innovation in Engineering and Science Education (CIESE), Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey.

T J CASEY, 2009, *Diffused air aeration systems for the activated sludge process, design performance testing*. Aquavarra Research Publications Water Engineering Papers.

TEJERO J., ESTEBAN-GARCÍA, LOREDANA F., DÍEZ R., GARCÍA L., RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, 2012, *Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales: veinticinco años de investigación del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria*, Ingeniería Civil 168.

THALASSO, F., NAVEAU, H., NYNS, E.J., 1995. *Design and performance of a bioreactor equipped with a venturi injector for gas transfer rates*. Chem. Eng. J. 57, B1–B5.

USEPA, March 1979, *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*, Publication #600/4-79-020.

VON SPERLING, M. 2007, *Wastewater characteristics, treatment and disposal*, Londres, IWA Publishing.

WILHELMS, S.C., GULLIVER, J.S. AND PARKHILL, K.: 1993, *Reaeration at Low-Head Hydraulic Structures*, Technical Report, No. W-93–2, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.

WINKLER, M 2000. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Departamento de Ingeniería, Universidad de Survey. Ed. Limusa S.A.

WISCONSIN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES, 2010, *Advanced Activated Sludge Study Guide*, Bureau of Science Services, Operator Certification Program P.O. Box 7921, Madison, WI 53707 <http://dnr.wi.gov>.