

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con agua residual industrial - Lima

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Yanet Viviana Álvarez Bautista

Asesor:

PhD Noé Benjamín Pampa Quispe

Lima, 11 de marzo de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUDITORÍA DEL INFORME DE TESIS

Yo, Ph.D. Noé Benjamín Pampa Quispe,

DECLARO:

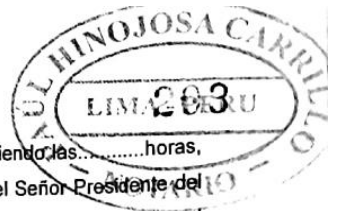
Que el presente informe de investigación titulado: **“GENERACION DE BIOELECTRICIDAD Y BIODEGRADACION DE LA MATERIA ORGANICA EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (CCM) CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL – LIMA”** constituye la memoria que presenta **la Bachiller Yanet Viviana Alvarez Bautista** para aspirar al título de profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los tres días de 11 de marzo del 2020



Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Naña, Villa Unión, a 10 05 día(s) del mes de marzo del año 2020 siendo las 10:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Mg. Milda Amparo Gonz Huananga, el secretario: Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio y los demás miembros: Dr. Alex Rubén Huaman De la Cruz; Mg. Joel Hugo Hernández Rojas y el asesor: Dr. Noé Benjamín Pampa Quirope.

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con agua residual industrial - Lima.

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Yaneth Viriana Alvarez Bautista b) - conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en -

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yaneth Viriana Alvarez Bautista

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>18</u>	<u>A -</u>	<u>Muy bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Candidato (b): -

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final, y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente

[Firma]
Secretario

[Firma]
Miembro

[Firma]
Miembro

Asesor
Dr. Noé Pampa Quirope
Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza, salud, sabiduría y sobre todo iluminarme en este proceso y conseguir los objetivos trazados. A mis padres Santos Álvarez y Nicolasa Bautista, por su esfuerzo y apoyo. A mis hermanos por sus consejos y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, salud, economía, sabiduría y la fortaleza espiritual. A mis padres, por su esfuerzo, paciencia, comprensión y apoyo incondicional. A mis hermanos por su apoyo, cariño y palabras de aliento.

Así mismo agradezco a mi asesor de tesis PhD Noé Benjamín Pampa Quispe, por la disponibilidad de tiempo, paciencia, enseñanza y orientación en cada etapa del desarrollo de la presente investigación. De igual forma agradezco al Mg. Joel Hugo Fernández Rojas por haberme brindado su apoyo incondicional, enseñanza y disponibilidad de tiempo.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos y compañeros en especial a Gustavo Zamata Torres por su consejo y apoyo incondicional durante la etapa de la investigación.

INDICE

SIMBOLOS/NOMENCLATURA	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPITULO I.....	1
EL PROBLEMA.....	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.2. Justificación de la investigación.....	3
1.3. Presuposición filosófico.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
CAPITULO II	5
REVISION DE LA LITERATURA	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales	5
2.1.2. Antecedentes Nacionales	8
2.1.3. Antecedentes Locales	9
2.2. Marco teórico	10
2.2.1. Aguas residuales.....	10
2.2.2. Tipos de agua residuales.....	10
2.2.2.1. Aguas residuales domesticas	10

2.2.2.2.	Aguas residuales municipales	10
2.2.2.3.	Aguas residuales agrícolas	10
2.2.2.4.	Aguas residuales industriales	11
2.2.2.5.	Aguas residuales hospitalario	11
2.3.	Composición típica de las aguas residuales.....	11
2.4.	Características de las aguas residuales.....	13
2.5.	Características de las aguas residuales industriales	15
2.5.1.	Características físicas	16
2.5.2.	Características químicas.....	16
2.5.3.	Características biológicas.....	16
2.6.	Componentes de aguas residuales industriales	16
2.7.	Tratamiento de aguas residuales	17
2.7.1.	Tratamiento físico	18
2.7.2.	Tratamiento químico.....	18
2.7.3.	Tratamiento Biológico.....	19
2.7.4.	Sistemas Bioelectroquímicos	20
2.8.	Celdas de combustible microbiano	20
2.8.1.	Principio de funcionamiento de las celdas de combustible microbiano.	21
2.9.	Configuración y diseño de una CCM	22
2.9.1.	Sistemas de un solo compartimiento.....	22
2.9.2.	Sistemas de doble compartimiento	23
2.9.3.	Sistemas de múltiples compartimiento	25

2.10.	Estructura de una celda de Combustible Microbiano (CCM)	25
2.10.1.	Electrodos	25
2.10.2.	Ánodo.....	27
2.10.3.	Cátodo	27
2.10.4.	Sustrato:	28
2.10.5.	Membrana de intercambio de protones.....	28
2.10.6.	Conductor externo	29
2.11.	Desempeño eléctrico de las CCM.....	29
2.12.	Condiciones de operación de una CCM.....	31
2.13.	Mecanismos de transferencia de electrones	32
2.13.1.	Transferencia directa de electrones.....	32
2.13.2.	Transferencia de electrones a través de mediadores	33
2.13.3.	Transferencia de electrones a través de nanocables	33
2.14.	Microorganismos empleados en las celdas de Combustible Microbiano	33
2.14.1.	Crecimiento y reproducción del Género <i>Geobacter</i>	34
2.14.2.	Metabolismo y nutrición de los microorganismos en una CCM.....	35
2.14.3.	Digestión anaerobia.....	36
2.14.3.1.	<i>Hidrolisis</i>	36
2.14.3.2.	<i>Acidogénesis</i>	37
2.14.3.3.	<i>Acetogénesis</i>	37
2.14.3.4.	<i>Metanogénesis</i>	37
2.15.	Inoculo de microorganismos	37

2.16.	Biopelículas.....	38
2.17.	Etapas de formación de las biopelículas.....	38
2.17.1.	Nutrición de las biopelículas.....	40
2.17.2.	Protones en la biopelícula	40
CAPITULO III		41
MATERIALES Y METODOS		41
3.1.	Lugar de ejecución	41
3.1.1.	Planta de industria unión	42
3.2.	Materiales y Equipos	42
3.3.	Metodología	44
3.3.1.	construcción de la celda de combustible Microbiano a escala laboratorio	44
3.3.1.1.	Área superficial de los electrodos	46
3.3.1.2.	Puente de intercambio protónico.....	46
3.3.1.3.	Limpieza de electrodos de grafito	48
3.3.1.4.	Prueba de las CCMs	50
3.3.2.	Recolección de la muestra y obtención del inculo.....	51
3.3.2.1.	Recolección de la muestra de agua residual industrial.....	51
3.3.2.2.	Obtención del inculo (microorganismos).....	52
3.3.3.	Caracterización del agua residual industrial	53
3.3.4.	Formación de biopelícula de microorganismos electrogénicos en los electrodos (ánodo).....	55
3.3.5.	Operación de la celda de combustible microbiano (CCM) a escala laboratOri.....	55

3.3.6.	Caracterización eléctrica de la celda de combustible microbiano (post análisis).	57
3.3.6.1.	Voltaje (V).	57
3.3.6.2.	Intensidad de Corriente Eléctrica (A).	57
3.3.6.3.	Potencia (P).	58
3.3.6.4.	Densidad de potencia (DP).	58
3.3.7.	Análisis de la biodegradación de la materia orgánica.....	59
3.3.7.1.	Cálculo de eficiencia de remoción de DQO y DBO ₅	59
3.7.	Variables de estudio	59
3.8.	Diseño estadístico.....	60
3.8.1.	diseño estadístico para la generación de bioelectricidad ¡Error! Marcador no definido.	
CAPITULO IV		62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
4.1.	Caracterización del Agua Residual industrial.....	62
4.2.	Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos.....	63
4.2.1.	Remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	64
4.2.1.1	Análisis estadístico de la DQO	65
4.2.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	68
4.2.2.1.	Análisis estadísticos de la DBO ₅	69
4.2.3.	Factores intervinientes en la eficiencia de las Celdas de Combustible Microbiano.	72

4.2.3.1.	Potencial de Hidrogeno (pH)	72
4.2.3.2.	Temperatura del agua	73
4.2.3.3.	Conductividad del agua.....	73
4.2.4.	Comparación de los parámetros DQO y DBO post tratamiento con la normativa.....	74
4.3.	Desempeño Electroquímico de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	75
4.3.1.	Generación de bioelectricidad en la fase de operación (voltaje).....	75
4.3.2.	Caracterización electroquímica de la Celda de combustible microbiano.....	79
4.4.	Relación de la bioelectricidad con la eficiencia de remoción de la materia Orgánica	84
CAPITULO V		86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
5.1.	Conclusiones	86
5.2.	Recomendaciones	88
CAPITULO VI.....		89
REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS.....		
CAPITULO VII.....		96
ANEXOS.....		96

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Composición típica de las aguas residuales.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2. Características fisicoquímicas.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Características microbiológicas.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 4. Componentes de algunas aguas residuales de la industria alimentaria.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5. Componentes Básicos de una Celda de Combustibles Microbiano.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6. Materiales empleados para el desarrollo de la investigación.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7. Equipos empleados en el desarrollo de la investigación.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 8. Insumos empleados en la investigación.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9. Configuración de las 4 Celdas de combustible Microbiano.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 10. Variables del diseño experimental.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 11. Diseño factorial variable codificada y no codificada para la obtención de los resultados.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12. Caracterización de las Aguas Residuales Industriales.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 13. Análisis Fisicoquímico Pre y Post tratamiento mediante el sistema de CCM.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 14. Eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la DQO.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de la Resistencia externa (Ω) y A_{ST} Grafito en la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO).....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 16. Remoción de la materia Orgánica en función de la Demanda Biológica de Oxígeno.....</i>	<i>68</i>

<i>Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de la Resistencia externa (Ω) y A_{ST} Grafito en la eficiencia de remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)</i>	69
<i>Tabla 18. Valore pre y post tratamiento del pH.....</i>	72
<i>Tabla 19. Valores de la temperatura del agua.....</i>	73
<i>Tabla 20. Valores de la conductividad pre y pos tratamiento.....</i>	74
<i>Tabla 21. Comparación de los parámetros Fisicoquímicos post tratamiento con la normativa (DS. N° 021-2009-VIVIENDA)</i>	75
<i>Tabla 22. Análisis de Varianza (ANOVA) para la Resistencia externa y Area superficial total del electrodo de Grafito sobre el Voltaje.....</i>	76
<i>Tabla 23. Valores de Voltaje, Intensidad de Corriente, Potencia y Densidad de Potencia</i>	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principio de funcionamiento de una CCM de doble compartimiento.....	22
Figura 2. Celda de combustible microbiano de un solo compartimiento (Mohan et al., 2014)	23
Figura 3. Celda de combustible microbiano de doble compartimiento (Du et al, 2007)	24
Figura 4. Principales materiales utilizados como electrodos en las CCM: (A) tela de carbón; (B) fieltro de grafito; (C) fibra de carbón; (D) placa de grafito; (E) barra de grafito; (F) grafito granular o carbón activado granular; (G) carbón activado en polvo; (H) carbón vítreo reticulado (Cheng, Liu & Logan, 2006).	27
Figura 5. Mecanismos de transferencia de electrones. A) Transferencia con ayuda de mediadores externos. B) Transferencia directa con la participación de citocromos. C) Transferencia por medio de nanocables bacterianos o pili.	32
Figura 6. Proceso de formación de biopelícula en un gráfico cíclico (American Scientist, 2006)	39
Figura 7. Vista Panorámica del Laboratorio de la Universidad Peruana Union, de Google Earth, 2019.	41
Figura 8. Diagrama de flujo de la investigación.....	44
Figura 9. Celda de combustible microbiano a escala laboratorio	45
Figura 10. Las cuatro celdas a escala laboratorio	45
Figura 11. Electrodo de grafito para el ánodo y cátodo de las CCMs	46
Figura 12. Puente de intercambio protónico.....	47
Figura 13. Preparación de la solución del puente salino de intercambio de protones	47
Figura 14. Vaciado de la solución salina en el puente de intercambio de protones.....	48
Figura 15. Limpieza de los electros de grafito	50
Figura 16. Muestreo de agua residual de la industria Union.....	52
Figura 17. Toma de muestra de lodos (inoculo) del reactor UASB.....	53

Figura 18. Toma de muestra de agua residual pre tratamiento	54
Figura 19. Toma de muestra post tratamiento de DQO y DBO ₅	54
Figura 20. Análisis de los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, conductividad y pH) 54	
Figura 21. Acondicionamiento para formación de los electrodos anódico	55
Figura 22. Puesta en marcha de las 4 celdas (CCM1, CCM2, CCM3 y CCM4)	56
Figura 23. Configuración completa de la CCM para medir la bioelectricidad generada en términos de voltaje.....	57
Figura 24. Eficiencia de remoción de la DQO	65
Figura 25. Significancia de los efectos principales Resistencia y A _{ST} Grafito (cm ²) en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	66
Figura 26. Curva de contorno para la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	67
Figura 27. Diagrama de superficie para la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO).....	67
Figura 28. Eficiencia de remoción de la DQO	69
Figura 29. Significancia de los efectos principales Resistencia y A _{ST} Grafito (cm ²) en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	70
Figura 30. Curva de contorno para la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅).....	71
Figura 31. Diagrama de superficie para la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	71
Figura 32. Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A _{ST} -Grafito (cm ²) en la Generación de bioelectricidad (mV).....	77
Figura 33. Curva de contorno para la generación de Bioelectricidad	78
Figura 34. Diagrama de Superficie para la generación de Bioelectricidad.....	78

SIMBOLOS/NOMENCLATURA

VMA	: Valor Máximo Admisible
CCM	: Celda de Combustible Microbiano
DQO	: Demanda química de oxígeno
DBO₅	: Demanda Biológica de Oxígeno
pH	: Potencial de Hidrógeno
MO	: Materia Orgánica
T°	: Temperatura
NaCl	: Cloruro de Sodio
NaOH	: Hidróxido de Sodio
HCl	: Ácido Clorhídrico
Dc	: Densidad de Corriente Eléctrica
Dp	: Densidad de Potencia
P	: Potencia
V	: Voltaje
Ω	: Ohm
mV	: Mili Voltios
PA	: potencia por Unidad de Area de Electrodo
PV	: Potencia por Unidad de Volumen de Sustrato
I	: intensidad de corriente Eléctrica
L	: Litro
g	: Gramos
mg	: Miligramos
mg/L	: Miligramos por Litro
μm	: Micrómetros

RESUMEN

La celda de combustible microbiano (CCM) es un sistema Bioelectroquímico que emplea el metabolismo de los microorganismos para la producción de la energía eléctrica acoplada con la biodegradación de la materia orgánica. La presente investigación se desarrolló con el objetivo de evaluar la generación de bioelectricidad y la degradación de la materia orgánica en celdas de Combustible Microbiano (CCM) con agua residual industrial. Para ello se elaboró 4 celdas de combustible microbiano (CCM) de doble cámara tipo "H" a escala laboratorio con un volumen de 2 L, la celda consistió de una cámara anódica y catódica unida mediante un puente salino, como electrodo se empleó varilla de grafito. Se evaluó la influencia de dos áreas de electrodo (0.0051 y 0.0074 m²) y dos resistencias externas (100 y 150 Ω) sobre el rendimiento de la CCM con respecto a la generación de bioelectricidad y degradación de la materia orgánica. El diseño estadístico empleado fue factorial 2² con ocho tratamientos con replicas, los resultados fueron analizados mediante el ANOVA factorial a un nivel de confianza de 95%, el análisis indicó que la interacción de las variables independientes fue significativa. Así mismo se determinó que a mayor área superficial (0.0074 m²) y menor resistencia externa (100 Ω.) se obtiene una mayor eficiencia de remoción de DQO (79%) y DBO (71%). Con respecto a la generación de bioelectricidad los resultados obtenidos muestran que al emplear una menor resistencia externa de 100 Ω y una mayor area superficial de electrodo de 0.0074 m² se obtienen voltajes de 516mV.

Palabras Claves: Agua residual Industrial, Biodegradación de materia orgánica, Bioelectricidad, Celda de Combustible Microbiana y Resistencia externa.

ABSTRACT

The microbial fuel cell (CCM) is a Bioelectrochemical system that uses the metabolism of microorganisms for the production of electrical energy coupled with the biodegradation of organic matter. In this sense, the present investigation was developed with the objective of studying the generation of bioelectricity and the degradation of organic matter in Microbial Fuel (CCM) cells with industrial wastewater. For this purpose, 4 microbial fuel cells (CCM) of double chamber type "H" were elaborated on a laboratory scale with a volume of 2 L, the cell consisted of an anode and cathodic chamber connected by a saline bridge, as an electrode a rod was used graphite. The influence of two electrode areas (0.0051 and 0.0074 m²) and two external resistances (100 Ω and 150 Ω) on the performance of the CCM with respect to the generation of bioelectricity and degradation of organic matter was evaluated. The statistical design used was factorial 2² with treatments repetitions, the results were analyzed using the factorial ANOVA at a 95% confidence level, the analysis indicated that the interaction of the independent variables was significant. Likewise, it was determined that the greater the surface area (0.0074 m²) and the lower external resistance (100 Ω), the greater the removal efficiency of COD (79%) and BOD (71%). With respect to the generation of bioelectricity, the results obtained show that when using a greater external resistance of 100 Ω and a greater electrode surface area of 0.0074 m², voltages of 516 mV are obtained.

Keywords: Industrial wastewater, Biodegradation of organic matter, Bioelectricity, Microbial Fuel Cell and External resistance.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

El crecimiento acelerado de la población en el planeta y la rápida industrialización han generado problemas ambientales relacionados con la disposición de aguas residuales. Actualmente el tratamiento de las aguas residuales no es sostenible para satisfacer las crecientes necesidades de saneamiento básico. A nivel mundial gran parte de las aguas residuales industriales se vierten sin tratamiento en los cursos de agua abiertos, lo cual reduce la calidad de mayores volúmenes de agua y, a veces, se infiltran en los acuíferos y contaminan los recursos hídricos subterráneos (UNESCO, 2017).

En el Perú, el 70 % de aguas residuales industriales y domesticas se vierten a los cursos de agua sin tratamiento alguno (González, 2010). El sector industrial no cuenta con autorizaciones de vertimiento vigentes. Los vertidos industriales se realizan sin tratamiento directamente a las fuentes de agua o al alcantarillado de uso poblacional. No tratar las aguas residuales antes de su descarga en los cuerpos receptores (ríos, arroyos, lagunas y mares) tiene como consecuencias efectos dañinos sobre la salud humana y el ambiente, como la generación de olores, el agotamiento del oxígeno disuelto y la liberación de nutrientes, contaminantes tóxicos y patógenos (Rodríguez, 2017).

Optar por sistemas de tratamientos convencionales, requiere de gran inversión para su construcción, mantenimiento y operación. Habitualmente cuando se lleva acabo el tratamiento de aguas residuales la mayoría de las instalaciones operan utilizando el proceso aerobio conocido como lodos activados (Buitrón *et al*, 2008). Este proceso es un alto consumidor de energía, la cual es necesaria para la aireación del sistema. En general, se necesita 1 KWH de energía para la oxidación de materia orgánica que contiene un kilogramo de carbono presente en el agua, alrededor de 0.5 KWH por m³ de agua residual a tratar (Ramalho, 2003).

Por otro lado, las necesidades energéticas se encuentran en creciente demanda, del año 2007 al 2015 hubo un crecimiento en la demanda energética del Perú de 7.4% por año. Para el año 2030 se espera que la demanda de electricidad alcance y exceda los 1.632KWh. siendo el sector industrial el de mayor demanda con 66 % de consumo, seguido por el sector residencial 24%, comercial 19% y por ultimo iluminación pública 3%, divididas ente las fuentes de energía termoeléctrica e hidroeléctrica (MINEM, 2007).

En este sentido es necesario plantear sistemas de tratamiento con bajo costo, tanto en inversión como en su operación y mantenimiento. Existen procesos anaerobios que puede reducir los costos de operación, mediante este proceso anaerobio se puede llevar a cabo la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales por una parte y, por otra generar electricidad de manera que este sistema de tratamiento sea auto sostenible (D. M. Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013a).

Las celda de combustible microbiana (CCM) es una tecnología emergente que podría contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual, la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Las celdas de combustible microbiano (CCM) son dispositivos que se encargan de convertir energía bioquímica a energía eléctrica mediante microorganismos (Buitrón & Pérez, 2011b). Las bacterias obtienen la energía transfiriendo electrones desde un donador de electrones, como el acetato o agua residual (materia orgánica), hacia un aceptor de electrones, como el oxígeno. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre el donador y el aceptor, será mayor la ganancia energética para la bacteria y, por lo tanto, de eliminación de materia orgánica (Schröder et al., 2006).

1.2. Justificación de la investigación

El mundo experimenta numerosas problemáticas ambientales, entre ellas la contaminación atmosférica causada por el uso de combustibles fósiles en la generación de energía, contaminación de fuentes hídricas y del suelo por la descarga de aguas residuales.

En países con grandes problemas de saneamiento y escasos recursos, como los que están en vías de desarrollo, las celdas de combustible microbianas (CCM) representan sistemas de tratamiento de aguas residuales apropiadas y sostenibles (Logan, 2009). Puesto que, mediante la degradación de la materia orgánica por la acción de las bacterias se puede lograr la depuración de aguas residuales y en forma paralela generar bioenergía (electricidad) sin pasar por procesos de combustión (D. M. Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013b).

De esta forma las celdas de combustible microbiana (CMM) representan una tecnología promisoría para propósitos de biorremediación de aguas residuales (Logan & Regan, 2006). El presente trabajo de investigación incentiva la implementación de este sistema auto sostenible para evitar la contaminación de las fuentes hídricas y la atmósfera por la emisión de CO₂ y entre otros gases provenientes de la combustión fósil y reemplazar por energía limpia.

Por otro lado, el propósito de este sistema no es competir con las tecnologías existentes para generar electricidad a gran escala, sino tratar el agua residual y obtener durante este proceso un producto de valor agregado. Es decir, ver el tratamiento del agua no solo como algo necesario para la sustentabilidad, sino también como un proceso que valoriza la materia orgánica presente (Buitrón & Pérez, 2011a)

1.3. Presuposición filosófico

El señor, dio al hombre el deber de administrar los recursos naturales de manera que se garantice el equilibrio en la tierra (Gen 1:28), dentro de estos recursos se incluye el agua, elemento esencial para la supervivencia de los seres vivos presentes en la tierra.

Nuestro mundo está contaminado y en proceso de destrucción, una de las causas es la inadecuada gestión de las aguas residuales en todo el mundo. La tierra está enferma se contaminó a causa de la irresponsabilidad de sus moradores, porque traspasaron las leyes naturales, forjando su propia destrucción (Isaías 24:4-6). Para el creyente genuino el cuidado del medio ambiente, conforme a los principios bíblicos, es una valiosa ocasión de actuar a favor de una causa que va más allá de los intereses individuales otorgando satisfacción al ser humano.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la generación de bioelectricidad y degradación de la materia orgánica en celdas de combustible microbiano (CCM) con aguas residuales industriales.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Generar el rendimiento de producción de bioenergía en celdas de combustible microbiana por métodos electroquímicos en términos de voltaje generado a partir del agua residual industrial.
- ✓ Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual industrial en las celdas de combustible microbiano.
- ✓ Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) del agua residual industrial en las celdas de combustible microbiano.

CAPITULO II

REVISION DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Gracias al descubrimiento de Michael Cresse Potter, botánico de la Universidad de Durham en el Reino Unido, en 1910 demostró que los microorganismos pueden llegar a generar energía y liberar corriente, y el posterior aporte de Cohen de la Universidad de Cambridge en el año de 1931, quien continuo con la investigación de Potter, y detallo en un ensayo como en una celda de combustible microbiano (CCM) genero más de 35 mV, sin embargo, esta tecnología tomo importancia en los años 60 cuando la NASA se interesó en transformar desechos orgánicos en electricidad, para que sea usada en sus viajes espaciales de gran duración (Shukla, Suresh, Berchmans, & Rajendran, 2004).

Alzate gaviria *et al.* (2010) ejecutaron la investigación sobre la “Evaluación del desempeño e identificación de exoelectrónicos en dos tipos de celdas de combustible microbianas con diferente configuración en el ánodo”. Para ello emplearon dos celdas tipo PEM (*protón exchange membrana*) con diferente configuración en el ánodo, las CCM operaron en batch durante 120 días y en intervalos de temperatura mesofílica. En la CCM1 utilizaron grafito de superficie plana y en la CCM2 usaron grafito granular. El sustrato que emplearon fue agua residual sintética, conteniendo hexosa como fuente de carbono, además emplearon un inóculo mixto como biocatalizador; en la cámara catódica emplearon un electrodo acuoso saturado de O₂. La densidad de poder en la CCM1 fue 6 W/m² con remoción de DQO del 70%, mientras que en la CCM2 se identificó un promedio de densidad de poder de 48W/m³ con 95% de remoción de DQO.

Jung y Regan (2011) realizaron la siguiente investigación “*Influencia de la resistencia externa en la electrogénesis, metanogénesis y comunidades procariontas anódicas en células de combustible microbiana*” donde evaluaron los efectos de la

resistencia externa en la CCM utilizando acetato y glucosa. Las densidades de corriente promedio oscilaron entre 40.5 mA/m² (9.800Ω) a 284.5 mA/m² (150Ω) para CCM alimentados con acetato, con un potencial anódico correspondiente rango de 188 a 4 mV (frente a un electrodo de hidrogeno estándar). Para las CCM alimentados con glucosa, oscilo entre 40.0 mA/m² (9.800Ω) a 273.0 mA/m² (150 Ω), con un potencial de ánodo correspondiente en un rango de 189 a 7 mV. Las CCM con acetona produjeron mayores eficiencias Coulómbica y eficiencias energéticas que los CCM con glucosa en todos las Rext probados. La producción de biogás represento del 14 al 18 % del flujo de electrones en los GR, pero solo del 0 al 6% en los tratamientos con acetato. Los tratamientos con glucosa produjeron niveles similares de metano, independientemente de la Rext. Sin embargo la producción total de metano en los tratamientos con acetato aumento a medida que la Rext aumento, lo que sugiere que el potencial anódico podría influir en la competencia por sustratos entre exoelectrógenos y metanogénos en los tratamientos con acetato. Un aumento de Rext. a 9.800Ω, cambio significativamente las comunidades bacterianas del ánodo tanto para los tratamientos con acetato como para los tratamientos con glucosa, mientras operaba a 970Ω y 150Ω poco efecto. Estos resultados muestran que Rext afecta no solo a la generación del potencial anódico, sino también a la comunidad de biopelículas anódicas y a la metanogénesis.

Estrada y Salazar (2018) ejecutaron la investigación sobre “Generación de energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales por medio de bioceldas”, donde evaluaron el funcionamiento de las CCMs y su caracterización haciendo énfasis en los mecanismos de transporte de electrones y los factores que influyen en la operación de las CCMs. Para ello emplearon diferentes celdas de combustible microbiano de un material acrílico-pexiglass los cuales operaron a escala laboratorio con agua residual de una unidad habitacional, con una arquitectura de una sola cámara. Para los reactores emplearon una lámina de grafito como cátodo. Así mismo los cátodos fueron impregnados con platino como catalizador. La cámara catódica de las CCMs estaba constituido por dos capas en el

siguiente orden: Membrana Nafion 117 y un electrodo de grafito. El cátodo fue expuesto al ambiente y aireado por convección natural. Así mismo construyeron dos cámaras anódicas de forma cilíndrica (horizontal) con un volumen de 156 mL. También implementaron una CCM de una sola cámara de forma cilíndrica (vertical) con un volumen de 8.4.L en este caso se utilizó en el ánodo una barra de grafito sólido. Obtuvieron como resultado en la CCM de 8.4 L un Voltaje aproximado a circuito abierto de 1.0 V y en las CCMs de 156 ml obtuvieron un voltaje a circuito abierto entre 0.5 y 0.7 V.

Buitrón y Pérez (2011b) realizaron la siguiente investigación *“Producción de Electricidad en celda de Combustible Microbiana utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos”*, donde evaluaron la influencia de la distancia de electrodos sobre la generación de electricidad y la remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbianas usando agua residual. Para ello configuraron tres celdas semejantes geometría pero con diferentes volúmenes. En promedio, obtuvieron una eficiencia de remoción de materia orgánica del 71%. La duración del ciclo fue de 0.97 días para la celda de 40ml, 1.03 días para la celda de 80 ml y 5.93 días para la celda de 120 ml. El aumento de distancias entre los electrodos (4, 8 y 12 cm) no causó un efecto negativo en la generación de electricidad, en la mayor separación (celda de 120 ml) se alcanzó un voltaje máximo de 660 mV, mientras que para la celda de 40 y 80 ml fue de 540 mV y 532 mV, respectivamente. Densidad de potencia máxima obtuvieron en la Celda con separación de 12 cm (408 mW/m²).

Mora y Bravo (2017) realizaron el estudio sobre la *“Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales”*. Donde evaluaron la diversidad bacteriana asociada a las biopelículas formadas sobre los ánodos de celdas de combustible microbianas. Construyeron celdas de una cámara que operación durante 30 días, utilizando muestras ambientales como inóculo y único sustrato energético. Reportaron valores de densidad de potencia máxima de 4.85 mW/m² para el agua residual doméstica y de 1.85 mW/m² para el caso del agua residual

industrial, con disminuciones de 71% de la DBO para el agua residual doméstica y de 59 % de la DBO para el caso del agua residual industrial.

Hincapié (2014) realizó la siguiente investigación, “*Desarrollo de una Celda de Combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales*”. Cuyo objetivo fue desarrollar una CCM económica de fácil construcción, para el tratamiento de agua residual paralelo a la producción de energía eléctrica empleando agua sintética de alta carga orgánica. Para ello implemento dos CCM, la primera operó durante 50 días en condiciones de voltaje a circuito abierto, con presencia de inóculo y sustrato de acetato de sodio. Y la segunda operó con inóculo sin ningún sustrato presente. En la primera CCM obtuvieron 281 mV, y en la segunda CCM 188 mV.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Valencia (2018) realizó el estudio sobre la “*Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de camal*” donde evaluó la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en las celdas de combustible microbiano (CCM), por intervención de la actividad catalítica como potencial de oxidación de materia orgánica e inorgánica, a partir de aguas residuales de camal Azoguine. Así mismo evaluaron la influencia de los factores de temperatura y concentración de sustrato del agua residual en la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica. Para ello emplearon un prototipo de CCM conformada por dos celdas ánodo y cátodo las cuales estaban unidas mediante un puente salino. Las CCM operaron con un volumen de sustrato de 250 mL., para ambas celdas (ánodo y Cátodo), como electrodo utilizaron grafito con un área de $6.66 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, con muestras iniciales que variaron de 1980 – 3200 mg/L en demanda química de oxígeno (DQO), alcanzando una eficiencia Coulómbica de 18 a 21% y de las temperaturas de 8, 15 y 25 °C se obtuvo eficiencias Coulómbica de 18 – 70%, corriente de área máxima alcanzada de 11.2 – 21.44 mA/m². Obteniendo como resultado que una temperatura de 25°C se obtiene mejores

resultados y mayor eficiencia de remoción de DQO de 79.8 – 93%. Concluyendo que a bajas temperaturas se generan bajas corrientes, y a temperaturas altas (25°C) se generan corrientes altas y por ende altas eficiencias coulombicas alcanzando el 70% y 93% de remoción de materia orgánica.

Jibaja (2018), realizo la investigación sobre la *“Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas a partir de tiosulfato utilizando cepas de acidithiobacillus ferrooxidans”* cuyo objetivo fue producir electricidad en las celdas de combustible microbianas (CCMs) a partir del tiosulfato utilizando a acidithiobacillus ferrooxidans. Para ello empleo dos cultivos de At. Ferrooxidans cepa LB102 y LB151. Mediante las cronometrías (C1 y C2) mostraron que la bacteria es productora de la bioelectricidad al utilizar el tiosulfato solo y el tiosulfato con hierro. Con respecto a la producción de electricidad la CCM1 produjo una densidad de potencia promedio de 2.34 mW/m² en el rango de operación de 23 – 119 horas, la CCM2 produjo una densidad de potencia promedio 3.02 mW/m² en el rango de 23 – 119 horas, la CCM3 alcanzó una densidad de potencia de 2.67 mW/m² en 7 horas, la CCM4 por su parte genero una densidad de potencia promedio de 1.03 mW/m² en 5 horas. Los controles de las 5 celdas produjeron una densidad de potencia promedio menor en comparación que las celdas inoculadas con las cepas.

2.1.3. Antecedentes Locales

Condori Pacheco y Torres Zamata (2019); realizaron la investigación titulada, *“Biodegradación de la materia orgánica y producción de bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica-Lima”*. Donde evaluaron la biodegradación de la materia orgánica y generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano. Para ello configuraron 5 CCM de doble cámara (aerobia y anaerobia) tipo “H” con un volumen de 1700 ml a escala laboratorio, las celdas ánodo – cátodo unidas mediante un puente salino, emplearon como electrodo barras de grafito

conectadas mediante un cable de cobre como conductor eléctrico. Realizaron 5 tratamientos con tres replicas, para los tratamientos emplearon tres diferentes longitudes de electrodos de grafito y tres diferentes resistencias externas. Obtuvieron un mayor desempeño en la CCM que opero con una resistencia de 50Ω y un area superficial de 151 cm^2 logro una eficiencia de remoción de DQO de 82.3 % y DBO 82,6%. Con respecto a la generación de voltaje registraron hasta 380 mV.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificados por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, estas aguas requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas, al sistema de alcantarillado (Metcalf and Eddy, Tchobanoglous, Burton y Cajigas, 1995).

2.2.2. Tipos de agua residuales

2.2.2.1. Aguas residuales domesticas

Producida en las diferentes actividades al interior de las viviendas, edificios, colegios, etc. Están compuestos por aguas negras que provienen de inodoros y aguas grises provenientes de lavaplatos, duchas y lavandería (Mejia, 2018).

2.2.2.2. Aguas residuales municipales

Son las aguas domesticas mezcladas con aguas pluviales o aguas residuales industriales previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (Mejia, 2018).

2.2.2.3. Aguas residuales agrícolas

Son las que proceden de las escorrentías superficiales de las zonas agrícolas. Se caracterizan por la presencia de pesticidas, sales y un alto contenido de sólidos en

suspensión. La descarga de estas aguas es recibida directamente por los ríos (Espigares y Pérez, 1985).

2.2.2.4. Aguas residuales industriales

Resultan del desarrollo de un proceso productivo, realizadas en las distintas industrias, incluyendo la minería; que contienen principalmente metales pesados y sustancias tóxicas para los cuerpos receptores y la vida humana (Mejía, 2018).

2.2.2.5. Aguas residuales hospitalario

Contienen elevadas concentraciones de microorganismos y/o virus. Estas aguas componen una mezcla de sustancias complejas cuya actividad tóxica, mutagénica y genotóxica dependerá de interacciones sinérgicas y antagónicas entre sus componentes y el ambiente (Espigares y Pérez, 1985).

2.3. Composición típica de las aguas residuales

Es fundamental conocer la naturaleza del agua residual para el diseño del sistema de tratamiento, evacuación y gestión ambiental (Ramírez, 2007).

Tabla 1. *Composición típica de las aguas residuales*

Contaminantes	Unidades	Débil	Media	Fuerte
Solidos suspendidos (ST)	.mg/L	350	720	1200
Disueltos Totales (SDT)	mg/L	250	500	850
Solidos suspendidos (SS)	mg/L	100	220	350
Solidos sedimentables	mg/L	5	10	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno; 5 días, 20°C	mg/L	110	220	400
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	80	160	290
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	250	500	100
Nitrógeno (Total)	mg/L	20	40	85
Nitrógeno Orgánico	mg/L	8	15	35
Amoniaco libre	mg/L	12	25	50
Fosforo (total)	mg/L	4	8	15
Fosforo orgánico	mg/L	1	3	5
Fosforo inorgánico	mg/L	3	5	10
Cloruros	mg/L	30	50	100
Sulfatos	mg/L	20	30	50
Alcalinidad (CaCO ₃)	mg/L	50	100	200
Grasa	mg/L	50	100	150
Coliformes Totales	Nº/100 mL	10 ⁶ – 10 ⁷	1 ⁷ – 10 ⁸	10 ⁷ – 10 ⁹
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV _s)	ug/L	<100	100 - 400	>400

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995)

2.4. Características de las aguas residuales

Tabla 2. *Características fisicoquímicas*

Parámetro	Descripción
Materia orgánica	Está compuesta principalmente por CHONS (Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre), proteínas (restos de origen animal y vegetal), los carbohidratos (restos de origen vegetal), los aceites y grasas (residuos de cocina e industria) y los surfactantes (detergentes).
Oxígeno disuelto	Es un parámetro fundamental que se contempla en el ecosistema acuático con un valor de 4 mg/l valor que asegura la sobrevivencia de los organismos superiores. El oxígeno se usa como indicador de la contaminación para los cuerpos hídricos. Para el correcto funcionamiento de los tratamientos aerobios de las aguas residuales, es necesario asegurar una concentración mínima de 1 mg/l.
Demanda bioquímica	Es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, se usa para determinar el consumo de oxígeno que hacen los microorganismos para degradar los compuestos biodegradables.
Demanda química de oxígeno (DQO)	Medida indirecta de la cantidad de la materia orgánica contenida en una muestra. A diferencia de la DBO, esta prueba emplea un oxidante (dicromato de potasio) en un medio (ácido sulfhídrico) en vez de microorganismos.
Sólidos Totales	La materia orgánica se presenta en forma de sólidos. Estos sólidos pueden ser suspendidos (SS) o disueltos (SD), los que también pueden ser volátiles (SV), los cuales se presumen orgánicos, o fijos (SF) que suelen ser inorgánicos. Parte de los sólidos suspendidos pueden ser también sedimentables (SSed).
Potencial de hidrogeno (PH)	Controla los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales (TAR). La mayoría de los microorganismos responsables de la depuración de las aguas residuales se desarrollan en un rango de pH óptimo entre 6,5 y 8,5 unidades.

Nitrógeno	Componente principal de las proteínas y nutriente esencial para las algas y bacterias que intervienen en la depuración de las aguas residuales. Los valores excesivamente altos de nitrógeno amoniacal (>1500 mg/l) se consideran inhibitorios para los microorganismos responsables de TAR.
Fosforo	Nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos. No obstante, valores elevados pueden causar problemas de eutrofización en los cuerpos de agua lóticos como en lagos, embalses, lagunas.
Temperatura	La temperatura de las aguas residuales es mayor que las aguas no contaminadas debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica
turbidez	Medida de la propiedad de transmisión de la luz del agua, es otro ensayo utilizado para indicar la calidad de los vertidos de aguas residuales con respecto a la materia suspendida.
Color	Es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro.
Olor	Presenta un olor desagradable, esto se debe a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, principalmente se debe, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles.

Fuente: (Ramalho, 1990).

Tabla 3. *Características microbiológicas*

Organismo	Descripción
Bacterias	Presentes en varias formas y tamaños son los responsables de la estabilización de la materia orgánica, algunas bacterias son patógenas causan enfermedades gastrointestinales.
Arqueas	Similares a las bacterias en tamaño y componentes celulares se diferencian de las bacterias en el material celular ARN. Son importantes en los procesos anaerobios.
Algas	Organismos fotosintéticos autótrofos, contienen clorofila. Son importantes en la producción de oxígeno en los cuerpos de agua y en los procesos de tratamiento de AR. En lagos y reservorios pueden proliferar y deteriorar la calidad del agua.
Hongos	Predominan los aerobios, multicelulares no fotosintético, son organismos heterótrofos. Importantes en la descomposición de la materia orgánica.
Protozoos	Usualmente organismos unicelulares sin pared celular. En su mayoría son aerobios y facultativos. Se alimentan de bacterias, algas y otros microorganismos. Importantes en tratamientos biológicos por que mantienen el equilibrio entre microorganismos.
Virus	Parásitos, formados por la asociación de material genético (ADN o ARN) y estructura proteica. Son patógenos, con frecuencia dificultan el tratamiento de las aguas residuales
Helmintos	Los huevos ocasionan enfermedades.

Fuente: (Ramalho, 1990)

2.5. Características de las aguas residuales industriales

La composición de las aguas residuales es muy variable y estas dependerán del tipo de industria que la genere, pudiendo recibir sales inorgánicas, metales pesados, detergentes, jabones, materia orgánica, etc. (VENTO, 2019).

Los vertidos generados por el sector alimentario y agroalimentario se caracterizan en general por una elevada carga orgánica biodegradable, un contenido moderado de sólidos en suspensión y la escasa o nula presencia de contaminantes tóxicos y/o peligrosos. La cantidad de materia orgánica que aportan los distintos sectores es extremadamente variada, estando además condicionada en cada sector por la materia prima y el proceso productivo que se aplique (Picazo, 1951).

2.5.1. Características físicas

Entre las características físicas presentes en las aguas residuales está la cantidad de sólidos (suspendidos, sedimentables, disueltos), olor, temperatura, color, turbidez y densidad (Aguilar, Sáez, Llorens y Ortuño, 2002).

2.5.2. Características químicas

Químicamente las aguas residuales son muy complejas, debido a que dependiendo de la industria en que se utilice el agua tendrá diferentes contaminantes. Algunos compuestos que se pueden encontrar en las aguas residuales son: altos niveles de metales pesados, materia orgánica biodegradable, materia orgánica no biodegradable, materia inorgánica, fósforo, azufre, sulfuros de hidrógeno, metano entre otros (Aguilar *et al.*, 2002).

2.5.3. Características biológicas

En cuanto a lo biológico las aguas residuales industriales poseen virus, bacterias, plantas de diferentes tipos, animales como insectos entre otros que en su mayoría no son tan complejos de eliminar (ECOFLUIDOS, 2011).

2.6. Componentes de aguas residuales industriales

En la tabla N° 00 se muestra como varía la composición de los parámetros de la DBO₅, DQO, Sólidos en Suspensión y el pH en aguas residuales dependiendo del tipo de industria alimentaria que la genera.

Tabla 4. Componentes de algunas aguas residuales de la industria alimentaria

Industria	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	pH
Cervecería	850	1,700	90	4 - 6
Destilerías	7,000	10,000	Bajo	-
Procesamiento de Leche	600 - 1,000	150 - 250	200 - 400	Acido
Enlatadoras (cítricos)	2,000	-	-	Acido
Mataderos y frigoríficos	1,500 - 2,500	200 - 400	800	7
Desechos Agrícolas	1,000 - 2,000	500 - 1,000	1,500 - 3,000	7.5 - 8.5
Procesamiento de aves	500 - 800	600 - 1,050	450 - 800	6.5 - 9

Fuente: CEPIS (2002).

2.7. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales, también conocido como proceso de depuración, es un sistema utilizado para remover contaminantes del agua. Estas aguas pueden ser descontaminadas a través tratamientos convencionales y no convencionales (EPA, 2000). Existen varios niveles de tratamiento así tenemos; tratamiento primario, secundario y terciario. El proceso de tratamiento inicia desde el momento en que el agua potable es utilizada y arrojada al drenaje, así la red de drenaje se convierte en la columna vertebral para la captación y transporte de aguas negras o residuales (Osorio, Torres y Sánchez, 2010). Posterior a su tratamiento podrán ser reutilizadas en actividades diversas como la agricultura, la industria y la recreación o simplemente descargadas a un cuerpo receptor (Metcalf and Eddy, 1995).

El principal objeto del tratamiento de aguas residuales es eliminar o reducir los contaminantes a niveles que no causen efectos nocivos en humanos o en los ambientes receptores.

Otro objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es mejorar su calidad para cumplir con las normas de calidad del cuerpo receptor o las normas de reutilización (Norma OS.090, 2006), y proteger la salud, promover el bienestar de las personas y proteger el medio ambiente.

En el año 2008 en Perú se emitió un Decreto Supremo 002 – 2008 MINAM, con la finalidad de que las aguas tratadas también puedan ser reutilizadas en el riego de la agricultura, y evitar la continua contaminación del medio ambiente (D.S N° 002-2008 MINAM, 2008).

2.7.1. Tratamiento físico

Tiene por objeto remover una considerable cantidad de materia orgánica e inorgánica sedimentable, para disminuir la carga en el tratamiento biológico (Norma OS.090, 2006).

La sedimentación es un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas. Los sólidos, más pesados que el agua, precipitan. La sedimentación primaria aplica para partículas floculentas (con o sin coagulante previa). La tasa de sedimentación se incrementa incorporando procesos llamados coagulación y floculación química al tanque de sedimentación. Se realizan en tanques rectangulares o cilíndricos (Aguilar *et al.*, 2002).

2.7.2. Tratamiento químico

Nivel de tratamiento que permite lograr la remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos en suspensión (Norma OS.090, 2006). Este proceso reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables floculentos que pueden ser separados por sedimentación.

Un tratamiento secundario remueve aproximadamente 85% de la DBO y los SS aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados, demanda química de oxígeno (DQO) y bacterias patógenas (Ramalho, 2003).

En este proceso se presentan gran cantidad de microorganismos como bacterias, hongos, protozoos, rotíferos, etc., que entran en estrecho contacto con la materia orgánica la cual es utilizada como su alimento. Los microorganismos convierten la materia orgánica biológicamente degradable en CO₂ y H₂O y nuevo material celular (TECPA, 2018).

2.7.3. Tratamiento Biológico

El tratamiento biológico de aguas residuales utiliza la actividad metabólica de los microorganismos para la eliminación de materia orgánica y elementos nutritivos (N y P). Este tratamiento tiene como objetivo, degradar y absorber la materia disuelta, coloidal o sedimentable en flocos biológicos o biopelículas, y los compuestos solubles que incluyen la materia orgánica biodegradable o no biodegradable y nutrientes, incluyendo los macronutrientes nitrógeno y fósforo (Lopez, Buitron, Garcia y Cervantes, 2017). El tratamiento biológico se puede dar en condiciones aerobias o anaerobias (Tuset, 2019).

El proceso biológico en condiciones aerobias, ocurren en presencia de oxígeno (O₂), este elemento es el aceptor de electrones, obteniendo elevados rendimientos energéticos.

El proceso biológico en condiciones anaerobias, generalmente se emplea en aguas residuales con altos contenidos de materia orgánica, en donde intervienen varios grupos de bacterias como anaerobias estrictas y facultativas en ausencia de oxígeno, se genera la producción de biogás. En este proceso el aceptor de electrones puede ser el CO₂ o parte de la materia orgánica (Corrales *et al.*, 2015).

2.7.4. Sistemas Bioelectroquímicos

En los últimos años se ha propuesto sistemas Bioelectroquímicos, siendo una tecnología híbrida que acopla reactores biológicos con celdas electroquímicas para obtener electricidad.

Los sistemas Bioelectroquímicos (SBE) utilizan el metabolismo de bacterias que se encuentran adheridos en forma de biopelículas en electrodos anódicos para realizar la oxidación de la materia orgánica. Estos dispositivos pueden dividirse en dos tipos de celdas de electrolisis microbianas donde se consume energía eléctrica para llevar a cabo reacciones químicas no espontáneas de oxidación – reducción y celdas de combustible microbianas en las cuales se genera corriente eléctrica de manera espontánea mediante la oxidación-reducción (Revelo, Hurtado y Ruiz, 2013).

2.8. Celdas de combustible microbiano

Las celdas de combustible microbiano (CCM), son dispositivos que convierten energía química en energía eléctrica a partir de la oxidación de una amplia gama de sustratos orgánicos por el metabolismo bacteriano para producir una corriente eléctrica (Fanks y Nevin, 2010). Una CCM está conformada por: cámara anódica; cámara catódica; electrodos, medio de intercambio protónico, inóculo bacteriano, aceptor de electrones y sustrato (Schröder *et al.*, 2006).

Las CCM se diferencian de otros sistemas que generan energía porque operan eficientemente, a temperatura ambiente e incluso a bajas temperaturas, producen una menor cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía, por lo que las pocas emisiones de este gas no requieren ningún tipo de tratamiento, tampoco necesitan aporte de energía siempre que el cátodo sea aireado pasivamente o sea un biocátodo (Logan *et al.*, 2006).

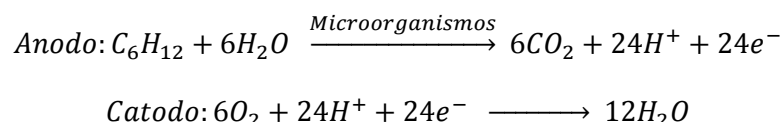
2.8.1. Principio de funcionamiento de las celdas de combustible microbiano.

Las celdas CCM generalmente consta de dos cámaras (anódica y catódica) cada una con su respectivo electrodo, dichas cámaras se encuentran separadas por una membrana de intercambio catiónico.

El principio de operación de las CCM se basa en la extracción y transferencia de electrones desde el metabolismo microbiano (cadena de transporte de electrones) hasta el electrodo (ánodo). Las CCM transforman un sustrato biodegradable en energía eléctrica. Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato (Logan *et al.*, 2006). La cámara anódica opera en condiciones anaerobias, el sustrato o agua residual es oxidado por microorganismos, produciendo dióxido de carbono (CO₂), Electrones (e⁻) y protones (P⁺). Los electrones son transportados desde el ánodo hacia el cátodo por medio de un circuito exterior que contiene una resistencia o un dispositivo, generando corriente eléctrica. En el cátodo, los electrones reaccionan con el aceptor final de electrones del proceso global, y con los protones, que previamente atravesaron el electrolito (agua residual) y la membrana de intercambio de protones, para producir agua (Estrada, 2014).

El cátodo y el ánodo son conectados por un circuito externo, por el cual viajan los electrodos de la cámara anódica a la cámara aeróbica.

Una reacción típica con glucosa como sustrato es:



Las reacciones que ocurren en los electrodos se deben a la biopelícula formada en el ánodo y al catalizador empleado para la reducción del oxígeno. En el ánodo, el material polímero puede ser degradado a moléculas simples, tales como ácidos grasos e hidrogeno, que son utilizados para la generación de electricidad. Otras reacciones de conversión; como de glicerol a etanol, puede producir compuestos para la generación de energía. En el cátodo, las reacciones pueden resultar en la generación de energía o adicionalmente en la formación de subproductos, como agua (Zhang *et al.*, 2017).

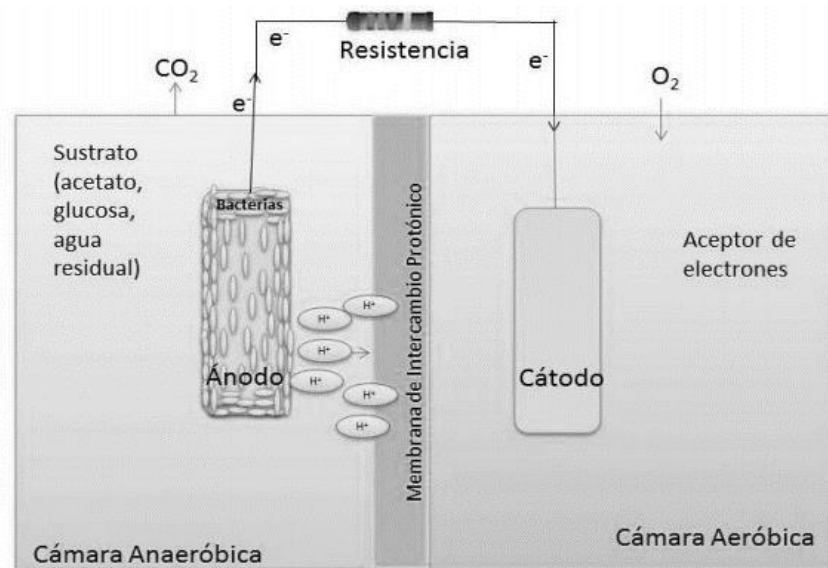


Figura 1. Principio de funcionamiento de una CCM de doble compartimiento.

2.9. Configuración y diseño de una CCM

Un aparato ideal de celdas de combustible microbiana consiste en dos cámaras, una anódica y otra catódica, hechas de un material inerte como vidrio, policarbonato o plexiglás, con su respectivo electrodo. Estas cámaras están separadas por una membrana de intercambio protónico. Un prototipo básico de celda de combustible microbiano, puede ser de simple o doble cámara (Chaudhuri y Lovley, 2003).

2.9.1. Sistemas de un solo compartimiento

El diseño de CCM de un solo compartimiento contiene tanto ánodo como cátodo (Figura 2). La cámara anódica está vinculada a un solo cátodo poroso expuesto

directamente al aire del ambiente en ausencia de una solución catalítica, separado por una capa de difusión de gas o una membrana de intercambio protónico. Los electrones se transfieren al cátodo poroso para completar el circuito.

Las ventajas de este tipo de celdas es que permiten mayor variedad y simplicidad en la fabricación (Das *et al.*, 2019). En cuanto a la operación de la celda, la presencia de oxígeno inhibe la formación de depósitos en el ánodo. Por otra parte, la principal dificultad con este diseño es evitar que el sustrato reaccione directamente con el oxígeno, para ello es necesario que el ánodo presente selectividad con el sustrato (Du *et al.*, 2005).

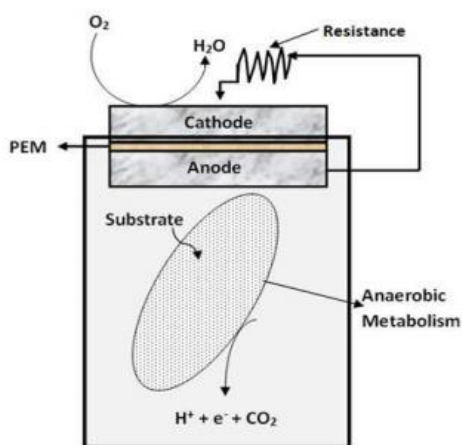


Figura 2. Celda de combustible microbiana de un solo compartimiento (Mohan et al., 2014).

2.9.2. Sistemas de doble compartimiento

La configuración que comúnmente adopta es de dos cámaras o compartimientos. La CCM de dos cámaras construido en forma tradicional de tipo “H” es ampliamente utilizado y económico la cual consiste en dos compartimientos (ánodo y cátodo) conectadas por un tubo que contiene un separador de membrana de intercambio catiónico (CEM) entre los cuales se tiene: puente salino, Nafion® ultrex o un puente de sal simplemente, el cual permite que los protones se desplacen hacia cátodo mientras bloquea la difusión de oxígeno en el ánodo (Liu y Logan, 2004).

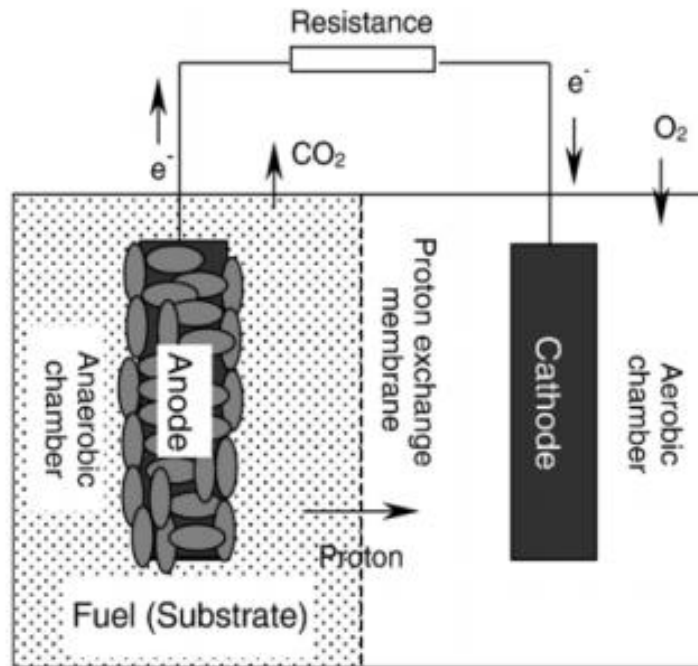


Figura 3. Celda de combustible microbiano de doble compartimiento (Liu & Logan, 2004)

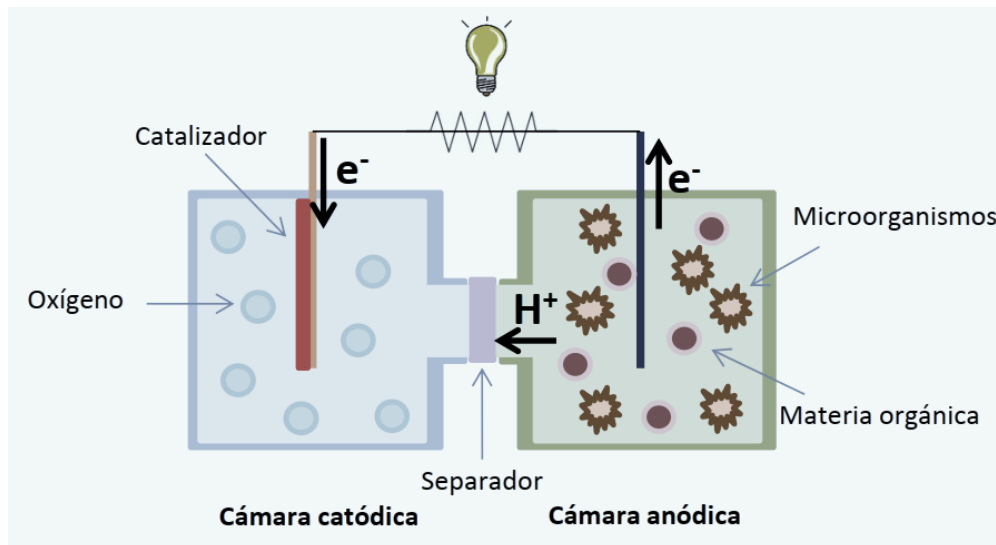


Figura 4. Esquema de una CCM de doble cámara tipo "H" (Salar et al., 2011).

Los sistemas de tipo "H" son aceptables para investigaciones de parámetros básicos, como: producción de energía y degradación de compuestos específicos. La cantidad de energía que se genera en estos sistemas se ve afectada por el área superficial del cátodo con relación del ánodo y la superficie de la membrana (Liu y Logan, 2004).

Tabla 5. *Componentes Básicos de una Celda de Combustibles Microbiano*

Materiales	Componentes	Observaciones
Ánodo	Grafito, Filtro de Grafito, Papel Carbón, tela de carbón, Pt, Pt negro, carbón vítreo reticulado (RVC).	Necesario
Cátodo	Grafito, Filtro de Grafito, Papel Carbón, tela de carbón, Pt, Pt negro, carbón vítreo reticulado (RVC).	Necesario
Cámara Anódica	vidrio, Policarbonato, Plexiglás	Necesario
Cámara Catódica	vidrio, Policarbonato, Plexiglás	Opcional
Sistema de intercambio de protones	Membrana de intercambio de protones: Nafion®, Ultrex, Polietileno. Poli (estireno-co-divinilbenceno); puente de sal, tabique de porcelana o únicamente electrolito	Necesario
catalizadores de electrones	Pt, pt negro, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polianilina, mediador de electrones	Opcional

Fuente: (Du, Li, y Gu, 2007)

2.9.3. Sistemas de múltiples compartimiento

Las CCM pueden adoptar diversas configuraciones geométricas y funcionales como sistemas de múltiple compartimiento. Los arreglos en serie o paralelo o una combinación de ambos, se emplean para incrementar la densidad de potencia (Logan & Regan, 2006).

2.10. Estructura de una celda de Combustible Microbiano (CCM)

2.10.1. Electrodos

Una parte fundamental en el diseño de una CCM es la elección de los electrodos, pues determinan el rendimiento y costo del sistema. Existe gran variedad de materiales y

configuraciones (Salar *et al.* 2014). El material de electrodo más versátil es el carbón, disponible como placas de grafito compacto, barras o gránulos (Sell *et al.*, 1989).

El criterio de selección de los electrodos se centra en las características fisicoquímicas que poseen, al momento de seleccionar el electrodo, independientemente de la configuración de CCM en que se pueda encontrar, se debe determinar y seleccionar de acuerdo a: porosidad, area de contacto, estabilidad, durabilidad, conductividad, resistencia al esfuerzo mecánico, accesibilidad y costos (Mustakeem, 2015)

Un material poroso puede considerarse como un material aceptor de electrones, sin embargo, a mayor porosidad mayor formación de biopelículas o biofilm. La formación de biopelículas o biofilm no asegura la eficiencia del proceso, puede generar perturbaciones no deseadas en el sistema electroquímico.

El area de contacto del electrodo, está relacionada con la resistencia que puede llegar a tener una CCM, cuando se desea disminuir la resistencia de una CCM, se recomienda aumentar el area de contacto del electrodo, cuando se aumenta el area de contacto del electrodo se asegura más sitios donde se pueden llevar a cabo las reacciones (Walsh *et al.*, 1999). Los principales electrodos utilizados en celdas de combustible microbiano se muestran en la figura 5.

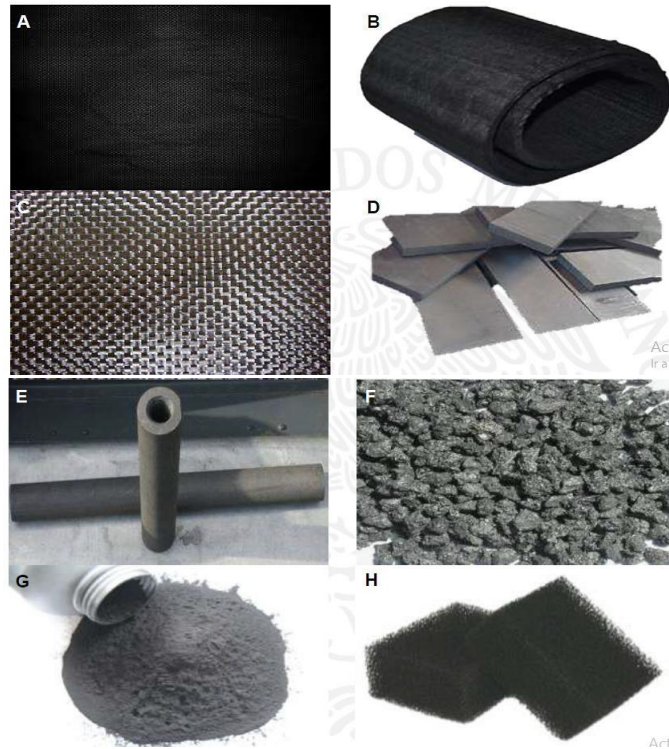


Figura 5. Principales materiales utilizados como electrodos en las CCM: (A) tela de carbón; (B) fieltro de grafito; (C) fibra de carbón; (D) placa de grafito; (E) barra de grafito; (F) grafito granular o carbón activado granular; (G) carbón activado en polvo; (H) carbón vítreo reticulado (Roh y Woo, 2015)

2.10.2. Ánodo

Para el ánodo, el material más usado es el carbón en distintos formatos como papel, placa, tela, malla, fieltro, gránulos, granulo de carbón activo, malla de acero inoxidable. Los carbonosos son los más usados debido a su gran biocompatibilidad, estabilidad química, alta conductividad y su relativo bajo coste. Una mayor porosidad del material empleado para el ánodo influye en el incremento de la energía producida, ya que las bacterias disponen de más área por unidad de volumen (Salar *et al.* 2014).

2.10.3. Cátodo

El cátodo debe tener un alto potencial redox y facilidad para capturar los protones. La mayoría de los materiales antes mencionados para el ánodo también se emplean en la formulación de los cátodos. Los más comunes son el grafito, la tela de carbono y el papel de carbono.

El oxígeno es el aceptor más adecuado de electrones para una CCM debido a su alto potencial de oxidación, disponibilidad, bajo costo, sustentabilidad, y la carencia de residuos químicos. Para incrementar la velocidad de reducción de oxígeno, los catalizadores de platino generalmente son usados para oxígeno disuelto o cátodos de difusión de gas (Cheng *et al.*, 2006).

2.10.4. Sustrato:

En las CCM, el sustrato es considerado como un factor biológico importante para la generación de electricidad (Liu *et al.*, 2009). Los sustratos empleados en las CCM para la producción de electricidad van desde los compuestos puros hasta mezclas complejas de materia orgánica presente en aguas residuales. Entre los más comunes se encuentran: acetato, glucosa, biomasa lignocelulosa y diferentes tipos de agua residual como doméstico, municipal y de la industria alimentaria. Los sustratos complejos permiten el desarrollo de una comunidad bacteriana muy diversa y electroquímicamente activa, sin embargo, los simples son más fáciles de degradar, aumentando así la producción de electricidad (Salar *et al.* 2014).

2.10.5. Membrana de intercambio de protones

La membrana de intercambio catiónico impide el paso de los electrones del compartimiento ánodo al cátodo dejando pasar solo los protones, así mismo cumple la función de transportar los protones o iones ácidos desde el ánodo al cátodo (Logan, 2008).

Las membranas más usadas es la de Nafion[®] 115 0 117, es un polímero muy utilizado, tanto por su alta resistencia química y mecánica como por su alta conductividad eléctrica (protónica). Un separador ideal tiene la función de inhibir la transferencia de sustrato y de oxígeno a la vez que permite un buen transporte de protones con un bajo coste.

2.10.6. Conductor externo

El conductor externo transporta los electrones del ánodo hacia el cátodo. Para ello se debe elegir metales con alta capacidad de conducción y no tóxicos.

2.11. Desempeño eléctrico de las CCM

El desempeño eléctrico de una CCM se estudia a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en la resistencia externa entre el ánodo y el cátodo y los respectivos cálculos que se derivan de ellas (Rabaey, Lissens, Siciliano y Verstraete, 2003). Los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico en las Celdas de Combustible Microbiano son: la densidad de potencia (DP) y la resistencia interna (RI) (Borole, *et al.*, 2009).

La densidad de potencia (DP) expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (1) (Wang *et al.*, 2010) o la potencia por unidad de volumen del sustrato (2), los cálculos se realizan de la siguiente manera:

$$P_A = \frac{IU}{A} \dots \dots \dots \text{Ecuacion (1)}$$

$$P_V = \frac{IU}{V} \dots \dots \dots \text{Ecuacion (2)}$$

Donde:

I : intensidad de corriente en amperios

U : potencia en voltios

A : área de la superficie del electrodo anódico (m²)

V : volumen del sustrato de la cámara anódica (m³)

Con respecto a la resistencia interna (RI) es un parámetro muy importante para caracterizar un generador de corriente como lo es una CCM. Se puede obtener a partir del

análisis de las curvas de polarización que se derivan de las mediciones de voltaje en la resistencia externa (Hoyos *et al.*, 2007).

La eficiencia Coulómbica (EC) es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCMs. La EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el sustrato de la cámara anódica (sharma y Li, 2010), mediante la siguiente fórmula (Luo *et al.*, 2010)

$$EC(\%) = \frac{\text{Coulombios recuperados}}{\text{Coulombios totales en el sustrato consumido}} \times 100$$

Para una mezcla de sustrato o agua residual, el total de culombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo, para obtener la eficiencia Coulómbica de una CCM en régimen batch (Logan, 2006)

$$EC = \frac{M_{O_2} \int_0^t I(t) dt}{F b_{O_2} V_{an} \Delta DQO}$$

Donde:

M_{O_2} : Peso molecular del oxígeno (32 g/mol)

$\int(I)dt$: Culombios reales generados en la operación de la CCM (C)

F : Constante de Faraday (96,485 C/mol e-)

t : Tiempo de reacción o ciclo de operación de la CCM (s)

b_{O_2} : Numero de moles de electrones generados por mol de oxígeno (4 mol)

V_{an} : Volumen total de la cámara anódica (L)

ΔDQO : Cantidad de DQO eliminado durante el ciclo de operación de la CCM (mg/L)

2.12. Condiciones de operación de una CCM

- **pH:** el valor de pH es fundamental para el buen desempeño de una CCM deberá tener cuenta la actividad biológica llevada en el ánodo, es decir, un valor de PH en el rango de 6.0 a 9.0, en el ánodo, será un valor que respete las condiciones naturales del biocatalizador.
- **Temperatura:** las CCMs se ven fuertemente afectadas por los cambios de temperatura, influyen en la cinética, transporte de masa, termodinámica, y naturaleza y distribución de la comunidad microbiana (Jadhav & Ghangrekar, 2009). La temperatura es un factor crucial para el rendimiento de este tipo de sistemas, tanto en la generación de electricidad como en la eliminación de materia orgánica, aumentando ambos con la temperatura. En temperaturas entre 30 – 45 °C la actividad bioelectrocatalítica de los microorganismos es máxima, siendo este rango el más adecuado para conseguir buenos rendimientos (Michie *at al.*, 2001). Sin embargo, mantener estas temperaturas encarece el progreso, por lo que es conveniente comenzar con una temperatura alta que permita el desarrollo bacteriano e ir reduciéndola gradualmente.
- **Concentración de la materia orgánica:** Alta concentración de sustrato estimula una elevada generación de electricidad en un vasto rango de concentraciones, determinaron que aumentando la Concentracion de lactato hasta 200 mM se obtiene como resultado valores altos de energía en una CCM inoculada con *S. putrefaciens*.
- **Oxígeno Disuelto:** la generación de corriente eléctrica se hace posible al mantener a los microbios separados del oxígeno, o de cualquier aceptor de electrones diferente al ánodo, y esto requiere un ambiente anaerobio en la cámara anódica. (Du, 2007).

2.13. Mecanismos de transferencia de electrones

La transferencia extracelular de electrones se define como el proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular (Lovley, 2008). El transporte extracelular de electrones a los electrodos se realiza por tres diferentes formas.

2.13.1. Transferencia directa de electrones

Este tipo de transferencia lo realizan los géneros de *Shewanella* y *Geobacter* donde los electrones se transfieren directamente a la superficie del electrodo por las proteínas de la membrana de citocromo exterior (Mustakeem, 2015). En la Figura 6 se muestra los tres mecanismos de transferencia de electrones.

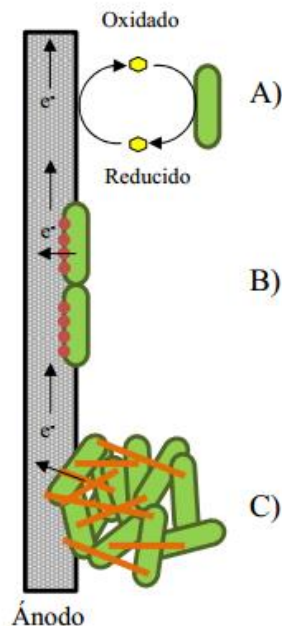


Figura 6. Mecanismos de transferencia de electrones. A) Transferencia con ayuda de mediadores externos. B) Transferencia directa con la participación de citocromos. C) Transferencia por medio de nanocables bacterianos o pili.

2.13.2. Transferencia de electrones a través de mediadores

Algunas bacterias no pueden realizar la transferencia de electrones de manera directa debido a la naturaleza no conductiva de su membrana celular, por lo cual requieren de mediadores de electrones exógenos en forma oxidada que sean capaces de atravesar la membrana celular, aceptar electrones de al menos un donante y posteriormente ser transferidos a través de la célula en su forma reducida para finalmente oxidar y transferir los electrones en el ánodo (Falcón *et al.*, 2009).

Los mediadores deberán tener la capacidad de atravesar la membrana celular fácilmente, tomar los electrones a partir de la cadena transportadora, además poseer una alta velocidad de reacción con el electrodo y no ser biodegradables ni tóxicos para los microorganismos. Los mediadores más comunes son rojo neutro, azul de metileno, tionina, azul de Meldola, Fe (III) (Revelo *et al.*, 2013).

2.13.3. Transferencia de electrones a través de nanocables

Las bacterias *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella Oneidensis* presentan nanocables bacterianos, siendo estructuras flexibles formadas de proteína llamada pilina que ayudan a las bacterias a adherirse a las superficies. Los pilis realizan la conexión eléctrica entre la células y los óxidos de Fe (III) conduciendo los electrones a la superficie del ánodo a través de la formación de redes internas en varias capas de la biopelículas (Chang *et al.*, 2006).

2.14. Microorganismos empleados en las celdas de Combustible Microbiano

Las CCM utilizan microorganismos que son capaces de oxidar materia orgánica y transferir electrones, las cuales son conocidas como bacterias exoelectrogeneras, entre ellas se encuentran diferentes géneros de bacteria como *Shewanella*, *Geobacter*, *Pelobacter*, *Desulfotomaculum* (Chang *et al.*, 2006).

El género de bacteria denominada *Geobacter* de la familia *Geobacteraceae* de la cual sobresalen dos especies, el *metallireducens* y el *sulfurreducens* tienen la capacidad de transferir electrones a moléculas como Fe (III) y Mn (IV), óxidos de nitrógeno, sustancias de alto peso molecular formado por la degradación química y biológica de plantas y animales. Además permite la transferencia de electrones de forma directa a los electrodos, generando pequeñas corrientes eléctricas, esta característica le permite a la especie *Geobacter* jugar un papel importante en el ciclo de la materia orgánica y de los metales en los sedimentos acuáticos (Lovley, 2008). Además estas bacterias son capaces de fabricar pili, que son estructuras eléctricamente conductoras de proteínas cuya función es transferir electrones desde la superficie externa del *Geobacter* hasta los electrodos (Chang *et al.*, 2006).

El desarrollo de los microorganismos depende de las condiciones ambientales, disponibilidad de nutrientes, consistencia del medio, acidez-alcalinidad, presencia o no de oxígeno, grado de humedad, luz, pH, Temperatura. Así mismo los microorganismos usan minerales (C, N, P, S) como nutrientes tomados del sustrato. De manera que el sustrato debe ser tal que permita que los microorganismos logren desarrollarse a cumplir con sus funciones vitales contribuyendo a la depuración del agua y la producción energética (Lovley, 2008).

2.14.1. Crecimiento y reproducción del Género *Geobacter*

El crecimiento y reproducción del Género *Geobacter* ocurre a medida que los nutrientes son procesados e incorporados como nuevo material de célula. El proceso reproductivo de esta bacteria es fisión binaria, donde las células individuales se duplican a una tasa característica. El tiempo que requiere una célula de *Geobacter* en duplicarse es aproximadamente 19 ± 3.6 h en laboratorio (Lovley, 2008). El crecimiento de esta población se compone de una serie de fases. En la primera etapa (fase lag) las células se adaptan a su nuevo ambiente. En la segunda etapa se entra a la fase exponencial, en la cual la

población se duplica a intervalos regulares, este es el periodo de más rápido crecimiento bajo condiciones óptimas de pH y temperatura (Academy Khan, 2019). Cuando el número de células que son producidas es igual al número de células que mueren, se establece un equilibrio dinámico en el cual el crecimiento bacteriano se detiene, esta etapa se denomina fase estacionaria y se debe a un agotamiento de algún nutriente. La fase de muerte o declinación se alcanza cuando la tasa de destrucción supera la tasa de crecimiento (Iversen y Forsythe, 2003).

El crecimiento óptimo de esta especie se produce cuando el pH se encuentra en el rango de 6,2-7,4 y la temperatura en el rango de 22-30°C. No se observa crecimiento cuando el pH es inferior a 5.8 o superior a 8.0 y la temperatura es inferior de 10°C o superior a 36°C (Shelobolina, 2007).

2.14.2. Metabolismo y nutrición de los microorganismos en una CCM

El factor principal que influye en la generación de energía dentro de una CCM son las vías metabólicas de los microorganismos, ya que estas gobiernan el flujo de electrones y protones, conjuntamente con el sustrato empleado y el potencial del ánodo. Y es precisamente del ánodo del cual depende si las bacterias pueden usar la cadena respiratoria en un metabolismo oxidante, ya que a mayor potencial anódico es menor la necesidad de aceptores de electrones (Revelo *et al.*, 2013).

En general el metabolismo celular de los microorganismos para degradar contaminantes, depende de la forma de obtención de energía, de esta forma los que utilizan compuestos orgánicos se denominan quimiorganotrofos, en particular las bacterias empleadas en una CCM tienden a ser quimiorganotrofos anaerobios, es decir utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono para su crecimiento y desarrollo (Ayde, Mejía, Vásquez, y González, 2012).

2.14.3. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico, que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el cual parte de la materia orgánica se transforma, por la acción de microorganismos, en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono. Es un proceso complejo en el cual intervienen diferentes grupos de microorganismos. La materia orgánica se descompone en compuestos más sencillos, que son transformados en ácidos grasos volátiles, que son los principales intermediarios y moduladores del proceso. Estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénicos que producen metano y dióxido de carbono.

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases de reacciones químicas consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato, intervienen diferentes poblaciones de microorganismos, los cuales se diferencian por la velocidad de crecimiento y su sensibilidad a compuestos inhibidores (Bermúdez, Cánovas, Manjon, Iborra y Howell, 1988).

2.14.3.1. Hidrolisis

Las bacterias son incapaces de emplear como alimento, material orgánico particulado por lo que en primera instancia este debe ser transformado en polímeros solubles o monómeros en el proceso conocido como licuación o hidrolisis. Este proceso se lleva a cabo por la acción de bacterias fermentativas facultativas y obligadas que excretan exoenzimas para degradar sustratos monoméricos y poliméricos. Como resultado se producen moléculas más pequeñas que pueden atravesar la pared celular. La hidrolisis de estos sustratos no involucra transferencia de electrones (Oflaherty *et al.*, 2006)

Esta fase es de particular importancia durante el tratamiento anaerobio de residuos sólidos, estiércol y aguas residuales con alto contenido de sólidos suspendidos como las

aguas residuales domésticas. Los productos resultantes de la hidrolisis son sustratos como azúcares monoméricas, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y alcoholes (Tortora *et al.*, 2007)

2.14.3.2. Acidogénesis

Los productos de la hidrolisis son metabolizados por fermentación a varios productos como: acetato, propionato, butirato, hidrogeno, dióxido de carbono, así como también formol, y metanol por bacterias fermentativas (Bermúdez *et al.*, 1988)

2.14.3.3. Acetogénesis

En la etapa de acetogénesis, los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. Las bacterias acetogénicas sintróficas son las encargadas de convertir los productos finales de la etapa acidogénica en acetato a partir de dos rutas: deshidrogenación acetogénica e hidrogenación acetogénica (Tortora *et al.*, 2007).

2.14.3.4. Metanogénesis

La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético a metano y del ácido fórmico en dióxido de carbono, y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrogeno (Bermúdez *et al.*, 1988).

2.15. Inoculo de microorganismos

El factor más importante para que una CCM genere una corriente de electrones que pueda ser utilizada, es el microorganismo o microorganismos utilizados para llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica a compuestos como CO₂ y H⁺ y la liberación de electrones al sistema. Teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de transferencia de electrones, es importante seleccionar un microorganismo que sea capaz de

transferir los electrones directamente al ánodo, tal como *Geobacter*, o por medio de nanocable, tal como *Shewanella* (Revelo *et al.*, 2013).

Se recomienda el uso de cultivos mixtos, ya que permite utilizar una gran variedad de sustratos, entre ellos, residuos (Du *et al.*, 2007). Así, se pueden emplear diferentes tipos de inóculos en la CCM que pueden provenir de lodos activos (Lee *et al.* 2003), lodos anaerobios (Rabaey *et al.*, 2003), aguas residuales domésticas (Min *et al.* 2004), aguas residuales industriales (Prasad *et al.*, 2006), sedimentos marinos o sedimentos acuáticos (Holmes *et al.*, 2004). Estos inóculos suelen contener microorganismos electrófilos/anófilos y grupos de microorganismos que usan mediadores naturales, por los que no es necesaria la adición de mediadores externos (137). Los mejores resultados se han obtenido empleando fangos activos o anaerobios (Rabaey *et al.*, 2003).

2.16. Biopelículas

Las biopelículas son comunidades complejas de microorganismos adheridas a una superficie, rodeadas por una sustancia que secretan como medio de protección de las amenazas externas dado que viven en comunidades microbianas mixtas típicas de biopelículas, los microorganismos pueden compartir sus destrezas y habilidades individuales para la supervivencia del grupo manteniendo una comunicación permanente entre ellos en los diferentes ambientes o microambientes donde permanecen y conviven, por ello tienen muchas ventajas de protección (Stoodley *et al.*, 2002; Xavier, 2007; Hibbing, 2010).

2.17. Etapas de formación de las biopelículas

La formación de una biopelícula (figura N° 6) inicia con la adherencia de una bacteria individual sobre la superficie, para posteriormente tener una etapa de bipartición y agregación de células. Durante esta primera fase, el sustrato tiene que ser adecuado para la adsorción reversible y, finalmente la adhesión irreversible de la bacteria.

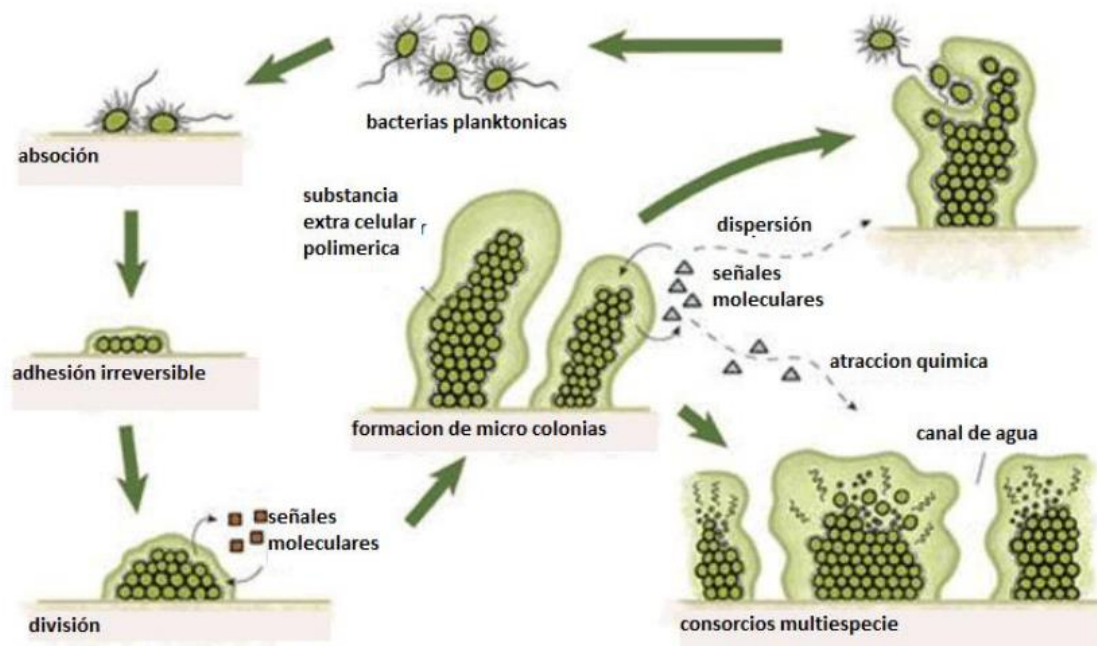


Figura 7. Proceso de formación de biopelícula en un gráfico cíclico (American Scientist, 2006)

Durante la segunda etapa, hay una redistribución de bacterias, la bacteria comienza a dividirse por fisión binaria y las células hijas se extienden alrededor del sitio de unión, formando microcolonias, en una monocapa, mientras tanto las células se diferencian transformando su comportamiento y dan lugar a la compleja arquitectura de la biopelícula presentando canales y poros. El más evidente de estos cambios es la producción de la matriz de exopolisacáridos que cementan a todo el conjunto y dentro del cual se lleva a cabo la maduración de las colonias (Bonilla, 2007).

En la tercera etapa, cuando la biopelícula ha alcanzado la madurez, algunas células, ya sea aisladas o en conglomerados bacterianos, se liberan de la matriz para poder colonizar nuevas superficies, cerrando el proceso de formación y desarrollo de la biopelícula. Hay tres mecanismos de desprendimiento: la erosión, que es una remoción continua; la separación, que es una remoción rápida y masiva; la abrasión, que libera partículas por colisión del líquido con la biopelícula (Nazar, 2007).

2.17.1. Nutrición de las biopelículas

Las bacterias son extremadamente versátiles y tienen la habilidad para utilizar una amplia gama de nutrientes que van desde compuestos inorgánicos simples a compuestos orgánicos más complejos. El carbono y el nitrógeno son los nutrientes más requeridos por su utilización en el desarrollo de las células bacterianas, seguido por el fósforo ya que es utilizado en la síntesis de ácidos nucleicos y de fosfolípidos la mayoría de las bacterias lo usan en forma inorgánica. Las bacterias del género *Pseudomonas* puede usar más de cien compuestos orgánicos (Varela y Grotiuz, 2002).

2.17.2. Protones en la biopelícula

La oxidación de la materia orgánica produce tanto protones como electrones. Los electrones son removidos casi instantáneamente a través de la biopelícula y el circuito eléctrico de la CCM. Los protones tienen que migrar fuera de la biopelícula y después hacia el cátodo. Esto ocurre a un ritmo mucho más lento y puede causar una baja en la producción de energía. Por cada electrón producido en forma de corriente, también se produce un protón dentro de la biopelícula. La producción de corriente por los microorganismos en la CCM causa un aumento de diez veces la concentración de protones (Franks y Nevin, 2010).

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se efectuó en las instalaciones del laboratorio de la “Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental” perteneciente a la “Facultad de Ingeniería y Arquitectura” de la universidad Peruana Unión (UPeU), situada en el km 19.5 carretera central Ñaña, Distrito de Lurigancho, Provincia Lima, Departamento de Lima. Comprende una extensión territorial de aproximadamente 490, 000 m² y una altitud de 530 m.s.n.m. con coordenadas geográficas UTM 11°59'24” Sur y 79°50'29” Oeste. La construcción del dispositivo Celdas de Combustible Microbiano (CCM) se Realizó a escala laboratorio. Los análisis de los parámetros (DQO Y DBO5) fueron realizados por el laboratorio DELTALAB S.A.C acreditado por INACAL. Y los parámetros (pH, Temperatura Conductividad) fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión.

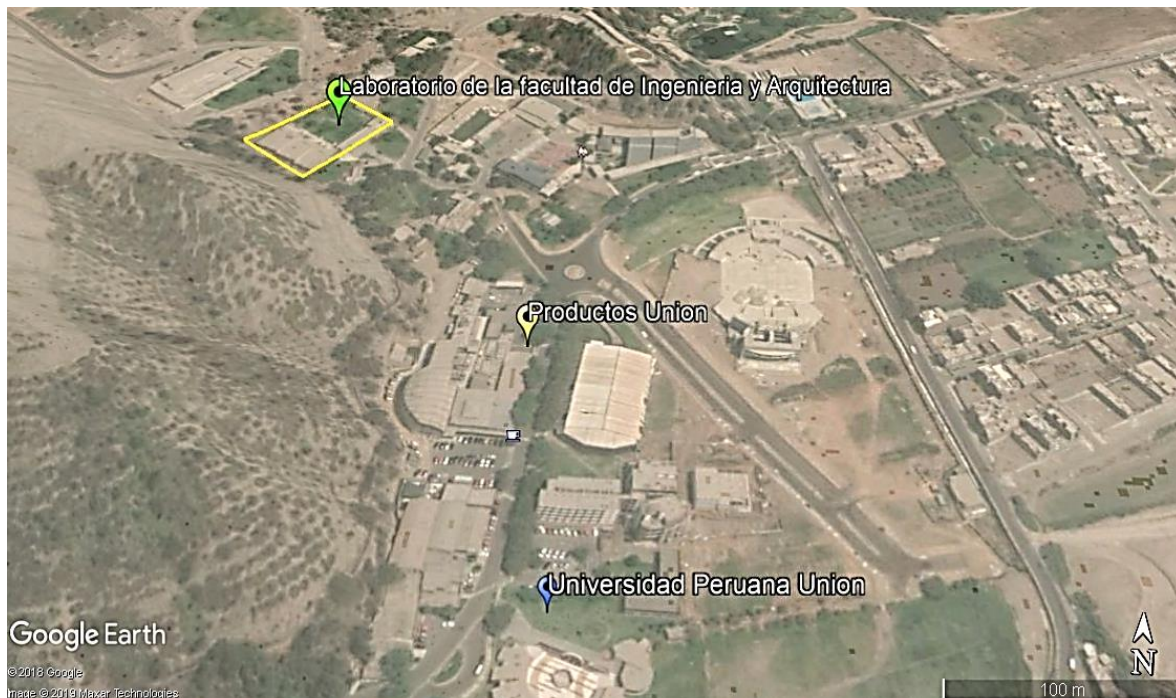


Figura 8. Vista Panorámica del Laboratorio de la Universidad Peruana Union, de Google Earth, 2019.

3.1.1. Planta de industria unión

Las muestras de aguas residuales industriales que se emplearon en el experimento (sustrato de la celdas de combustible microbiano) son provenientes de la Industria Union, la cual está ubicada dentro del campus de la Universidad Peruana Unión - Lima, con coordenadas geográficas UTM 86°73'87 Sur y 79°50'29" oeste.

3.2. Materiales y Equipos

Tabla 6. Equipos empleados en el desarrollo de la investigación

Equipo	Marca	Serie	Cantidad
Multiparámetro	HANNA	HI9811-5	1
Estufa	ECOCEL	D 160041	1
Balanza Analítica	A y D COMPANY, LIMITED	6A7703497	1
Campana extractora de Gases			1
Multímetro digital			4
Computadoras			4
Cocina eléctrica			1

Tabla 7. Insumos empleados en la investigación

Insumos Químicos	Unidad	Cantidad
Agar-Agar al 5%	g	80
Cloruro de Sodio al 10%	g	160
Ácido Clorhídrico (HCL) 1M	g	3.7
Hidróxido de sodio (NaOH) 1M	g	4
Agua destilada	L	35

Tabla 8. *Materiales empleados para el desarrollo de la investigación*

Materiales	Unidad	Cantidad
Balde con capacidad de 20 Litros	Unidad	1
Balde con capacidad de 5 Litros	Unidad	1
Cinta masking	Unidad	4
Cadena de custodia	Unidad	8
Plumón indeleble	Unidad	1
Toalla de papel absorbente	Unidad	1
Tabla portapapeles	Unidad	1
Guantes	Unidad	100
Frascos rotulados de 50 ml	Unidad	4
Vasos precipitados 600 ml	Unidad	4
Vasos precipitados 1000 ml	Unidad	4
Coolers con hielo	Unidad	2
Mascara respiradora	Unidad	20
Guardapolvo	Unidad	1
Varillas de grafito (1.5 cm de diámetro x 30 cm de largo)	Unidad	5
Plancha de acrílico (1.5 m x 2m)	Unidad	1
Tapón de hule N° 7	Unidad	4
Resistencias externas de 100 Ω y 150 Ω	Unidad	4
Cinta aislante	Unidad	1
Varilla de vidrio	Unidad	1
Pipetas graduadas	Unidad	2
Malla de asbesto	unidad	1
Cucharilla de metal	Unidad	1
Placas Petri	Unidad	4
Cable de cobre	cm	100
Manguera de silicona transparente	cm	200
Silicona Transparente	ml	50
Vasos precipitados	ml	100

3.3. Metodología

El desarrollo del presente estudio de investigación se realizó en 6 etapas: diseño y construcción de las celdas de combustible microbiano (CCM); recolección de la muestra de agua residual (sustrato) de la Industria Unión y la obtención del inoculo (lodo anaerobio); análisis del agua residual industrial (pre análisis); aclimatación de microorganismos en el compartimiento anódico; operación de la celda de combustible microbiano (CCM) a escala laboratorio; caracterización eléctrica y análisis de los parámetros del efluente de la celda de combustible microbiano (post análisis).

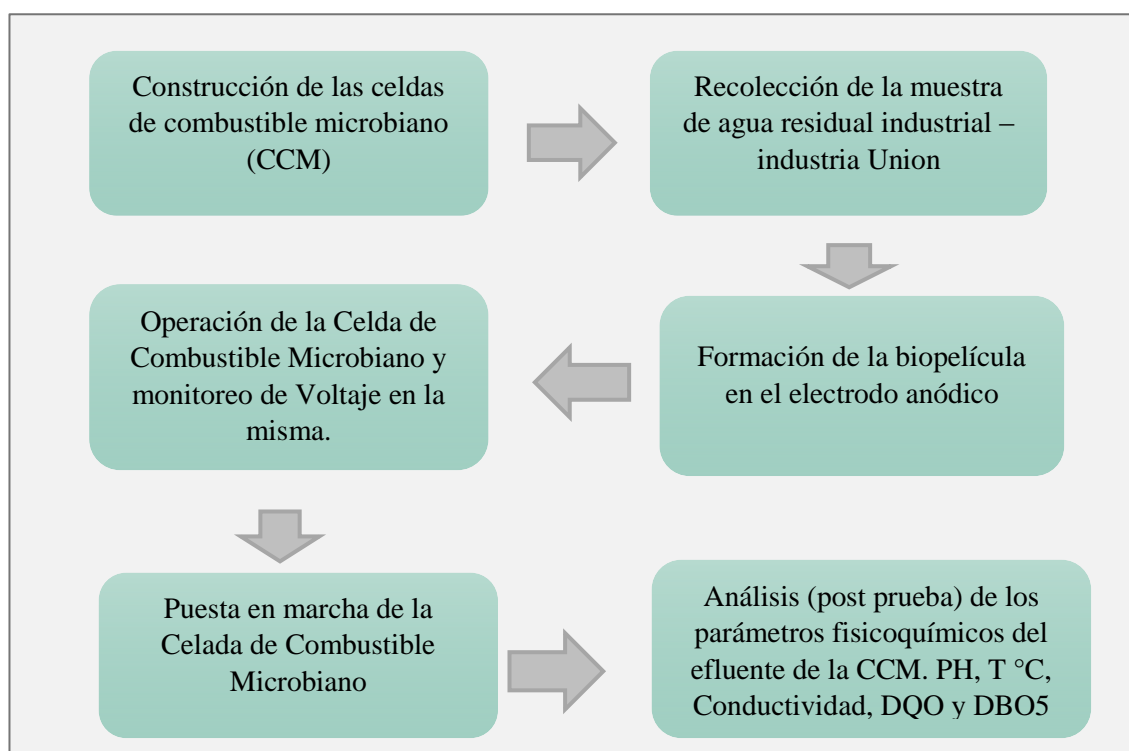


Figura 9. Diagrama de flujo de la investigación

3.3.1. construcción de la celda de combustible Microbiano a escala laboratorio

Se construyó 4 configuraciones de CCM de dos compartimientos (modelo “H”) anódico (10cmx10cmx20cm) y catódica (10cmx10cmx20cm) que operaron en condiciones anaerobias y aerobias respectivamente. El volumen de los compartimientos depende del volumen del sustrato empleado en este caso se trabajó con un volumen de 2 Litros. Los

compartimientos fueron elaborados con un material acrílico. Así mismo cada uno de estos compartimientos tanto al ánodo y cátodo se le realizaron una perforación de 3.5 cm de diámetro en la parte lateral inferior para el intercambio de protones mediante un puente salino. Y otra perforación de 1 cm de diámetro en la parte lateral superior del compartimiento anódico para la alimentación del sustrato. El compartimiento anódico trabaja en condiciones anaerobias por lo que fue sellada herméticamente para evitar el ingreso de oxígeno. Con respecto al compartimiento catódico este trabaja en condiciones aerobias por lo que en todo el proceso de operación se conservó abierto y en contacto con el ambiente para mantenerse oxigenado.



Figura 10. Celda de combustible microbiano a escala laboratorio

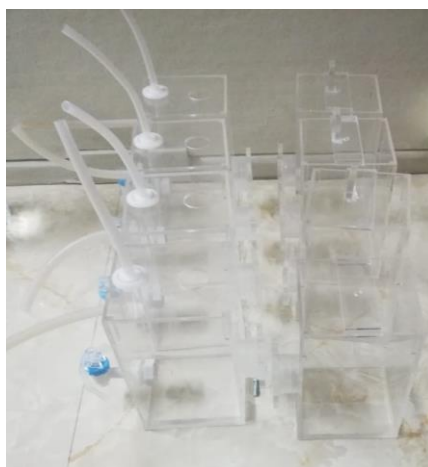


Figura 11. Las cuatro celdas a escala laboratorio

3.3.1.1. Área superficial de los electrodos

Para el presente estudio de investigación se tomaron en cuenta 2 áreas distintas (0.0051 m^2 y 0.0074 m^2) de electrodo de grafito con el objetivo de ver si hay diferencia significativa en la generación de bioelectricidad en la CCM por la variación de áreas.

En cada compartimiento de las CCMs se colocó una varilla de grafito como electrodo, conectados mediante un cable de cobre (Ánodo – Cátodo). El electrodo del compartimiento anódico fue aclimatado antes de su instalación para la formación de la biopelícula de microorganismos.



Figura 12. Electrodo de grafito para el ánodo y cátodo de las CCMs

3.3.1.2. Puente de intercambio protónico

Elaboración del puente salino

Se elaboró un tubo de material acrílico de 3.5 de diámetro y 5 cm de longitud, en donde se depositó la mezcla de agar-agar (5 gr) y solución salina o electrolito en este caso cloruro de sodio (10 gr).

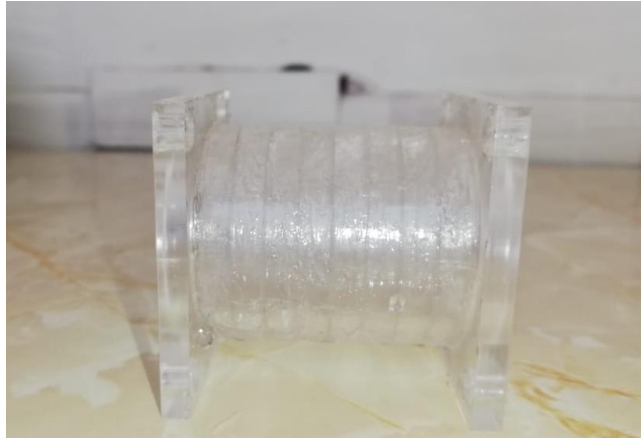


Figura 13. Puente de intercambio protónico

Preparación de la mezcla del puente salino

Se procedió a preparar la mezcla del puente salino para lo cual se pesó 10 gramos de NaCl y 5 gramos de Agar-Agar. Seguidamente en un vaso precipitado de 200 ml se hizo hervir 100 ml de agua destilada hasta ser burbujeada, donde se añadió el NaCl y con una varilla de vidrio se movió hasta disolver, seguidamente se añadió poco a poco agar-agar moviendo constantemente hasta diluir la solución durante 5 minutos, posteriormente se hizo enfriar por 5 minutos y se vació en los tubos acrílico. Este proceso se realizó para las cuatro celdas y para cada réplica.



Figura 14. Preparación de la solución del puente salino de intercambio de protones

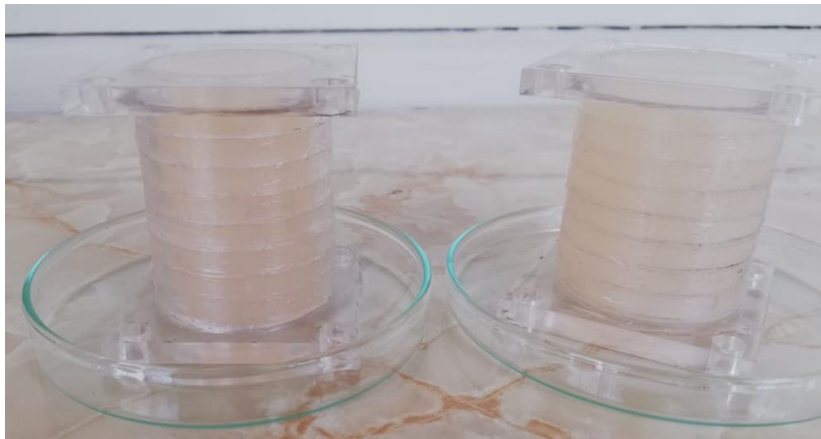


Figura 15. Vaciado de la solución salina en el puente de intercambio de protones

3.3.1.3. Limpieza de electrodos de grafito

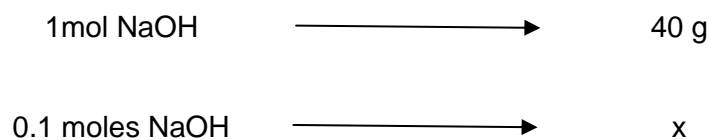
Antes de realizar la limpieza se lijaron los electrodos de grafito suavemente para favorecer la formación de biopelículas y quitar algunas impurezas, posterior al lijado del electrodo se realizó la limpieza de los electrodos en una solución de hidróxido de Sodio (NaOH) a una concentración de 1M y posteriormente en una solución de Ácido Clorhídrico (HCL) 1M según (Chaudhuri y Lovley, 2003).

Para la preparación de la solución de NaOH a 1M se utilizó 4 g de masa de soluto, requerido para 0.1L de disolvente (agua destilada) de una solución de concentración de 1M.

$$\begin{array}{ccc}
 1M & \longrightarrow & 1L \\
 X & \longrightarrow & 0.1 L
 \end{array}$$

$$x = \frac{1M * 0.1 L}{1L}$$

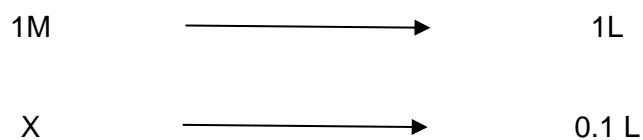
$$x = 0.2 \text{ moles}$$



$$x = \frac{0.2 L * 40 g}{1 mol NaOH}$$

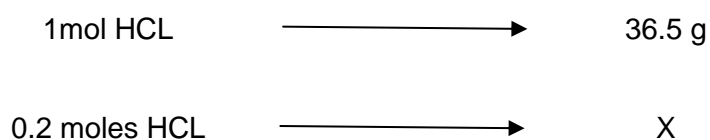
$$x = 8 g$$

De igual forma la preparación de la solución de ácido HCL a 1M de concentración. Se utilizó 7.3 g de masa del soluto, requerido para 0.2L de disolvente (agua destilada) de una solución con concentración de 1M.



$$x = \frac{1M * 0.2 L}{1L}$$

$$x = 0.1 moles$$



$$x = \frac{0.2 moles HCL * 36.5 g}{1 mol HCL}$$

$$x = 7.3 g$$

Posterior a la preparación de las soluciones de NaOH y HCL, los electrodos fueron lavados con agua destilada en un vaso precipitado de 1000 ml, posteriormente se lavó con NaOH con la finalidad de desengrasar y quitar partículas de grafito producto del lijado ya que estas partículas pueden obstaculizar la formación de biopelículas de los microorganismos electrógenos. Finalmente para limpiar el electrodo de la solución alcalina se lavó con agua destilada y seguidamente en una campana extractora de gases se hizo el lavado con HCL (Parra, 2002).



Figura 16. Limpieza de los electros de grafito

3.3.1.4. Prueba de las CCMs

Al finalizar la construcción de los cuatro sistemas fue necesario la prueba para identificar cualquier defecto o fuga y asegurar el buen desempeño de los mismos durante toda la operación del experimento. Para lo cual se procedió al llenado de ambas cámaras con agua destilada.

Tabla 9. Configuración de las 4 Celdas de combustible Microbiano

Celdas de combustible microbiano	Configuración de la Celda	Tipo de material	material de electrodo (Ánodo y Cátodo)	Area del electrodo (m ²)	Puente de intercambio protónico	Resistencia Externa
CCM1				0.0074		150
CCM2	Tipo H doble cámara	Acrílico	Varilla de grafito de forma cilíndrica	0.0051	5 cm de largo puente salino (Agar-Agar con NaCl)	150
CCM3				0.0074		100
CCM4				0.0051		100

3.3.2. Recolección de la muestra y obtención del inóculo

3.3.2.1. Recolección de la muestra de agua residual industrial

El agua residual empleada en la presente investigación, se obtuvo de la Industria Unión, ubicado dentro del campus universitario (UPeU). Industria Unión antes de verter sus aguas residuales al sistema de alcantarillado sanitario cuenta con un sistema de rejillas y trampa de grasas.

La muestra del agua residual se tomó justo después del sistema de trampa de grasas. El punto de recolección de la muestra fue donde se concentra todos los afluentes de los diferentes procesos, y se escogió un horario donde el caudal tiende a ser mayor. Para la toma de muestras se utilizó la técnica de muestreo compuesto, donde se tomó muestras en dos tiempos distintos (9:30 am y 10:00 am), posteriormente se trasladó el agua residual en un balde de capacidad de 20 litros al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión.



Figura 17. Muestreo de agua residual de la industria Union

3.3.2.2. Obtención del inculo (microorganismos)

El inculo de microorganismos se obtuvo de un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), del CITRAR (Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y residuos peligrosos) perteneciente a la universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Localizada en el distrito del Rímac-Lima – Perú.

Para la toma de muestra de lodo del reactor UASB, se realizó extrayendo la cantidad de lodo necesario mediante las válvulas de drenaje, para tener una muestra representativa, se recomienda eliminar el volumen inicial colectado del sistema. Seguidamente se procedió a tomar 5 litros de lodo en un recipiente limpio llenando hasta el tope y se cerró herméticamente para mantener en condiciones anaerobias. La muestra de lodo anaerobio fue trasladada al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Union, donde se mantuvo refrigerada a una temperatura de 4°C hasta que pueda ser utilizada.



Figura 18. Toma de muestra de lodos (inoculo) del reactor UASB

3.3.3. Caracterización del agua residual industrial

Los parámetros Fisicoquímicos analizados en el presente estudio de investigación fueron los siguientes: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, Temperatura y Conductividad.

Los análisis pre y post tratamiento de los parámetros de Temperatura, pH y conductividad se realizaron en el laboratorio de ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión para lo cual se procedió a llenar en un vaso precipitado de 50 ml la muestra de aguas residuales al ras. Para la medición de los respectivos parámetros se utilizaron un multiparámetro de la marca HANNA.

Para los análisis de DQO y DBO_5 pre tratamiento se tomaron muestra in situ (Industria Union) en frascos de plástico de 500 ml (DQO) y 1000 ml (DBO_5) esterilizados y debidamente rotulados. Y para los análisis post tratamiento las muestras fueron tomadas en el laboratorio de Ingeniería ambiental de la UPeU. Estos frascos fueron trasladados hasta el laboratorio DELTALAB SAC acreditado por la INACAL en un cooler con su respectivo conservante o refrigerante para su análisis pertinente.



Figura 19. Toma de muestra de agua residual pre tratamiento



Figura 20. Toma de muestra post tratamiento de DQO y DBO₅



Figura 21. Análisis de los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, conductividad y pH)

3.3.4. Formación de biopelícula de microorganismos electrogénicos en los electrodos (ánodo)

Se acondicionó los electrodos para la formación de la biopelícula, el cual consistió en lo siguiente: los electrodos ánodos fueron lavados con agua destilada, posteriormente se colocaron en 4 frascos agregando 600 mL de lodo anaerobio como consorcio microbiano, así como también 1000 mL de agua residual. Finalmente se colocaron en una incubadora a 35 °C por un lapso de tiempo de 20 días homogenizando las muestras cada dos días. Esto se realizó con la finalidad de formar biopelículas en los electrodos ánodo.



Figura 22. Acondicionamiento para formación de los electrodos anódico

3.3.5. Operación de la celda de combustible microbiano (CCM) a escala laboratorio.

Se construyó 4 sistemas o celdas de combustible microbiano los cuales operaron con agua residual industrial como sustrato. Para la puesta en marcha, el procedimiento consistió en, llenar 2 L de agua residual industrial en la cámara anódica debidamente

acondicionadas y se cerró herméticamente. A continuación se procedió a llenar las cámaras catódicas con agua destilada el cual permaneció abierto y en contacto con el ambiente.



Figura 23. Puesta en marcha de las 4 celdas (CCM1, CCM2, CCM3 y CCM4)

Así mismo para la degradación de la materia orgánica y la obtención de bioelectricidad en las CCM, se emplearon 2 diferentes resistencias externas (100 y 150) y diferentes longitudes de electrodo (10 y 18 cm).

Finalmente puesta en marcha los 4 sistemas, se evaluó el desempeño eléctrico, mediante la medición del voltaje (V) en el conductor externo que está conectado a una resistencia entre el ánodo y el cátodo. La medición de Voltaje se realizó ensamblando cada sistema de CCM a un Multímetro digital PRASEK PREMIUN PR-36, el mismo que estará conectado a una computadora donde se almacenaron los datos. Los multímetros tomaron lectura de voltaje (mV) a intervalo de 10 minutos. Cada 24 horas se realizaron el vaciado de datos a un Excel.



Figura 24. Configuración completa de la CCM para medir la bioelectricidad generada en términos de voltaje.

3.3.6. Caracterización eléctrica de la celda de combustible microbiano (post análisis).

El desempeño eléctrico de las CCM se estudió a partir de las mediciones de voltaje (V), Intensidad de Corriente (A), Potencia (P) y Densidad de potencia ($\text{mW}\cdot\text{m}^2$).

3.3.6.1. Voltaje (V).

La tensión eléctrica o voltaje, es la magnitud física que en un circuito eléctrico impulsa el movimiento de los electrones a lo largo del conductor. Se midió de manera directa con un multímetro digital PRASEK PREMIUN PR-36

3.3.6.2. Intensidad de Corriente Eléctrica (A).

Es el movimiento de electrones a través del circuito eléctrico externo, moviéndose de polo negativo a polo positivo. De manera que se expresa como el flujo de carga eléctrica que existe en la CCM por unidad de tiempo.

$$A = \frac{V}{R_{externa}}$$

Donde:

V : valor del voltaje

$R_{externa}$: Resistencia externa en ohmios (Ω)

3.3.6.3. Potencia (P).

Es la cantidad de energía que entrega o genera la CCM en un tiempo determinado.

$$P = V * I$$

Donde:

P : potencia en Watts (W)

V : Voltaje en Voltios (V)

I : Intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A)

3.3.6.4. Densidad de potencia (DP).

Descrita como la cantidad de energía generada por unidad de area del electrodo anódico (mW/m^2), también calculada por unidad volumétrica del sustrato (mW/m^3).

$$DP = \frac{V^2}{A_{electrodo} R_{externa}} = \frac{mW}{m^2}$$

Donde:

V : valor del voltaje

A : area total de los electrodos

R : resistencia externa

3.3.7. Análisis de la biodegradación de la materia orgánica

El consumo de la materia orgánica se evaluó en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅).

3.3.7.1. Cálculo de eficiencia de remoción de DQO y DBO₅

El cálculo de la eficiencia de remoción de la DQO y DBO₅ se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

- Eficiencia de remoción de DQO

$$nDQO = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100$$

Donde:

$nDQO$: Eficiencia de remoción (%)
 DQO_i : Demanda Química de Oxígeno inicial (mg/L)
 DQO_f : Demanda Química de Oxígeno final (mg/L)

- Eficiencia de remoción de DBO₅

$$nDBO = \frac{DBO_{5i} - DBO_{5f}}{DBO_{5i}} \times 100$$

Donde:

$nDBO$: Eficiencia de remoción (%)
 DBO_{5i} : Demanda Biológica de Oxígeno inicial (mg/L)
 DBO_{5f} : Demanda Biológica de Oxígeno final (mg/L)

3.7. Variables de estudio

Las variables del diseño experimental se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Variables del diseño experimental

Tipo de Variable	Variable	Unidad
Independiente	Resistencia	(Ohms)
	Área del electrodo grafito	m ²
Dependiente	DQO	mg/L
	DBO5	mg/L
	Voltaje	mV
Interviniente	pH	UN
	Temperatura	°C
	Conductividad	

3.8. Diseño estadístico

Se empleó el diseño experimental factorial (2^2) completo con 2 réplicas y 4 tratamientos. Por el diseño Factorial se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores (Rodríguez, 2014). El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, con frecuencia se le llama efecto principal por que se refiere a los factores de interés primario en el experimento.

Los gráficos de contorno y superficie de respuesta son usados para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente y deducir las condiciones óptimas. Todos los análisis estadísticos se realizaron a un nivel de significancia de 95% ($p \leq 0.05$) usando el *software STATISTICA* versión 13.1.

Tabla 11. *Diseño factorial variable codificada y no codificada para la obtención de los resultados.*

Tratamiento	Variables Independientes				Variables Dependientes		
	Codificada		No codificada		DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Voltaje (mV)
X 1	X 2	Resistencia (Ohm)	Área del electrodo Grafito (m ²)				
1	-	-	100	0.0051	-	-	-
2	+	-	150	0.0074	-	-	-
3	-	+	100	0.0051	-	-	-
4	+	+	150	0.0074	-	-	-

El experimento se analizó mediante el ANOVA factorial, para comparar el efecto de los tratamientos. Los parámetros del modelo de primer orden de los efectos para diseño factorial de dos factores será (Rodríguez y Lemna, 2014):

Diseño experimental

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Donde:

Y : Respuesta predicha medida

β_0 : El intercepto

β_i y β_{ij} : Coeficientes del modelo lineal e interacción

Xi y Xj : Valores codificados de las variables independientes.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del Agua Residual industrial

En la Tabla 12 se muestra la comparación de la caracterización del agua residual de la Industria Unión con los valores de composición típica del agua residual cruda de concentración débil, media y fuerte reportados por Mecalff y Eddy (2014). Así mismo en la tabla antes mencionada se observa que los valores de concentración promedio de DQO y DBO son 2971 mgO₂/L y 1409 mgO₂/L respectivamente, por lo que se considera un agua residual de tipo fuerte, de acuerdo a la clasificación propuesta por los autores antes mencionados en líneas arriba.

La biodegradabilidad ($DBO_5/DQO > 0.4$) del agua residual de Industria Unión es de 0.47 mayor al valor establecido por Osorio y Peña (2002), indicando que la materia orgánica presente en el agua residual industrial puede ser depurada por medio de microorganismos, lo que condiciona en gran medida la viabilidad de tratar biológicamente el agua residual. De la relación DBO_5/DQO se deduce que el 47% de la materia orgánica es biodegradable, mientras que el 53% es materia inorgánica no biodegradable.

Tabla 12. *Caracterización de las Aguas Residuales Industriales*

Parámetro	Unidad	Valor promedio	Desviación estándar	Clasificación	Biodegradabilidad $(DBO_5/DQO) > 0.4$
DBO ₅	mgO ₂ /L	1409	±91.92	Fuerte	0.47
DQO	mgO ₂ /L	2971	±194.45	Fuerte	
pH	UN	6.6	±0.14	-	-
T°	°C	22.9	±0.64	-	-
Conductividad	µs/cm	1605	±.63	-	-

4.2. Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos

El tratamiento del agua residual industrial se ejecutó mediante 4 sistemas o Celdas de Combustible Microbiano con diferentes configuraciones, las cuales se diferenciaron entre sí por la variación de las resistencias externas y el area superficial del electrodo grafito. Todas las celdas iniciaron simultáneamente su tratamiento con dos replicas cada una. En la Tabla 13 se muestra el resumen de los parámetros fisicoquímicos promedio medidos pre y post tratamiento.

Tabla 13. Análisis Fisicoquímico Pre y Post tratamiento mediante el sistema de CCM

Prueba	Celda	DBO (mgO ₂ /L)		DQO (mgO ₂ /L)		pH		T° C agua		Conductividad	
		Antes	Después	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Replica 1	CCM1		453		780		4.9		21.5		6020
	CCM2	1344	579	2833	997	6.5	4.9	22.4	21.3	1790	7050
	CCM3		408		615		4.7		21.5		7060
	CCM4		490		885		5.0		21.2		7590
Replica 2	CCM1		445		793		4.7		23.8		1560
	CCM2	1474	594	3108	980	6.7	4.8	23.3	23.6	1420	1450
	CCM3		415		627		4.6		23.9		1550
	CCM4		460		896		4.6		23.9		1620

4.2.1. Remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los resultados de la biodegradación de la materia orgánica en función de la DQO se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la DQO

Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Area superficial Total del electrodo grafito (cm ²)	Concentración de DQO (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
			Afluente	Efluente	
CCM1	150	0.0074		786.5±9	74±1.4
CCM2	150	0.0051	2971±194	988.5±12	67±2.1
CCM3	100	0.0074		621±8	79±1.4
CCM4	100	0.0051		890.5±8	70±1.4

En La Figura 24 que resulta de la Tabla 13 se observa, que las celdas (CCM1, CCM2, CMM3 y CCM4) obtuvieron una eficiencia de remoción de materia orgánica de (74%, 67%, 79% y 70%) respectivamente. Así mismo se observa que la celda que obtuvo una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica es la CCM3 con 79% seguido por la celda CCM1 con un 74%, las mismas que trabajaron con la siguiente configuración, la celda CCM3 trabajo con una resistencia externa de 100 Ω y con un Área superficial de electrodo de 0.0074 m² y la celda CCM1 trabajo con una resistencia externa de 150 Ω , y un área superficial de electrodo de 0.0074 m². De donde se infiere que las celdas con mayor área superficial del electrodo y a menor resistencia externa obtienen una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la DQO. Salar *et al.* (2011), menciona que las bacterias al disponer de un area mayor en la cámara anódica se produce un incremento en la generación de energía por ende también aumenta la remoción de la materia orgánica. Ya que la relación que existe entre la generación de electricidad y remoción de materia orgánica en una CCM es directamente proporcional.

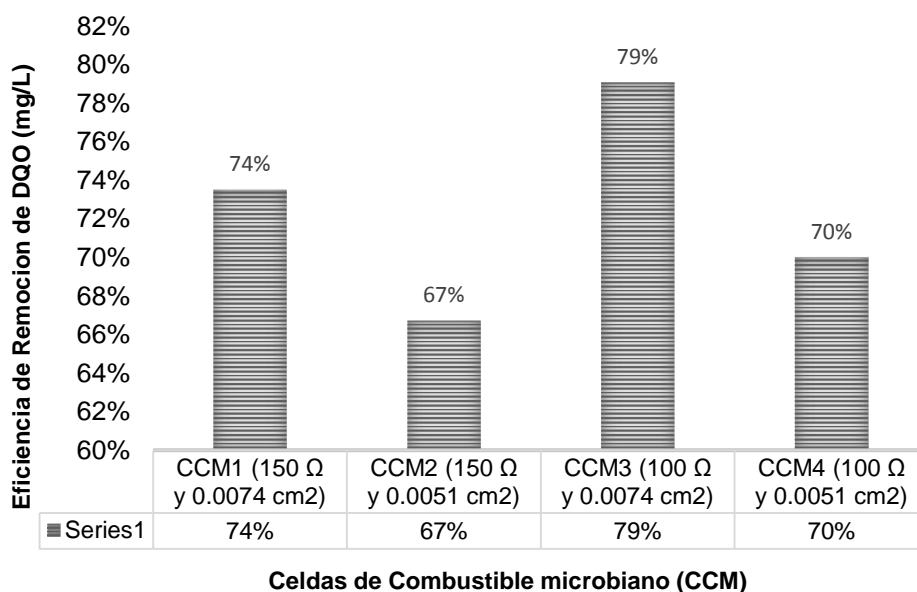


Figura 25. Eficiencia de remoción de la DQO

4.2.1.1 Análisis estadístico de la DQO

Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de la Resistencia externa (Ω) y A_{ST} Grafito en la eficiencia de remoción de la DQO.

Factor	SS	df	MS	F	P
(1) Resistencia (Ω)	34716.1	1	34716.1	384.134	0.000040
(2) Área (m^2)	111156.1	1	111156.1	1229.943	0.000004
1 by 2	2278.1	1	2278.1	25.207	0.007382
Pure Error	361.5	4	90.4		
Total SS	148511.9	7			

Nota: $R^2 = 0.997$; R-adj: 0.995

En la Tabla, se muestran los resultados de la ANOVA Factorial 2^2 con un nivel de confianza al 95% con respecto a la DQO luego de aplicar el tratamiento. Se observa que los factores tanto la resistencia externa (Ω) ($P = 0.00004$) como el área del electro (m^2) ($P = 0.000004$) resultan significativas en la remoción de la DQO, así mismo la interacción de ambos factores ($P = 0.007$) resultan significativas.

Por otro lado se tiene un coeficiente de determinación de ($R^2 = 0.997$) y un coeficiente de determinación ajustado (R-adj = 0.995), lo cual quiere decir que el modelo de regresión se ajusta en un 99% a los datos experimentales.

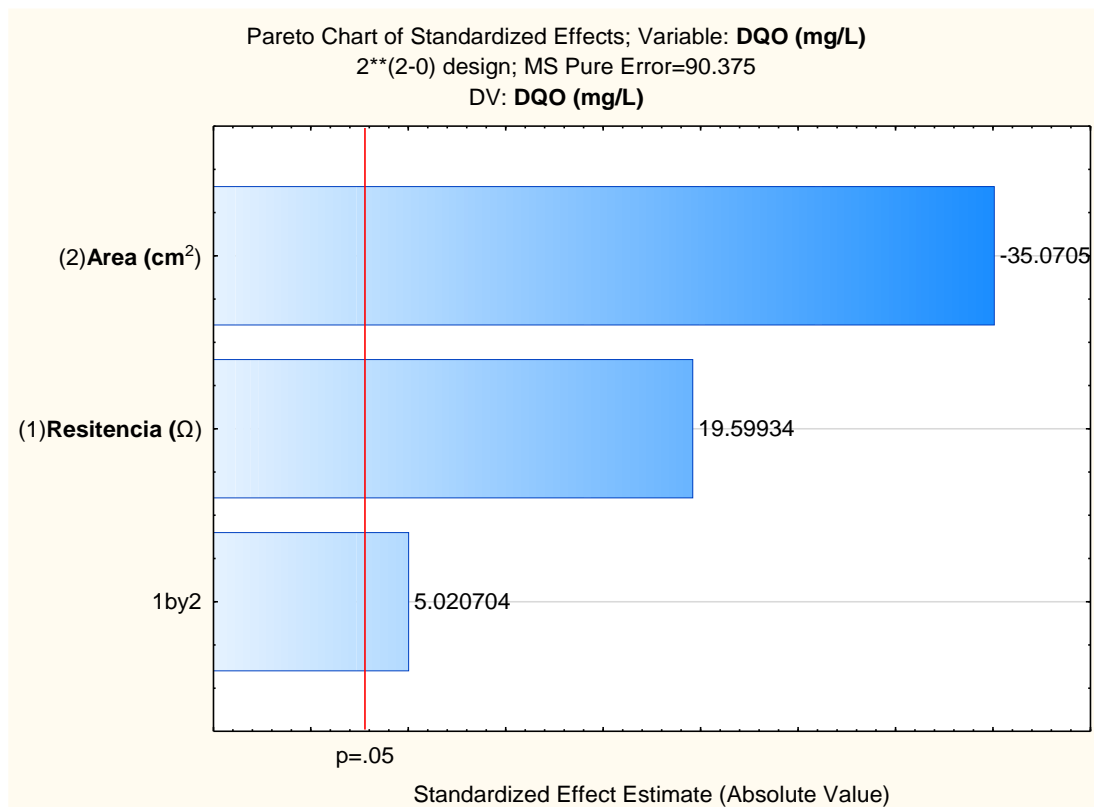


Figura 26. Significancia de los efectos principales Resistencia y A_{ST} Grafito (cm²) en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Figura 25, se presenta el diagrama de Pareto, donde se muestra gráficamente los factores más importantes en la variable respuesta (remoción de la DQO). Se observa que el área superficial del electrodo grafito (m²) tuvo mayor influencia significativa, quiere decir que a mayor area superficial se tendrá menores valores de DQO, seguida por la variable Resistencia (Ω), indicando que a mayor area superficial se tendrá menores valores de DQO, así mismo se observa que la interacción de ambos factores es significativa pero en menor medida.

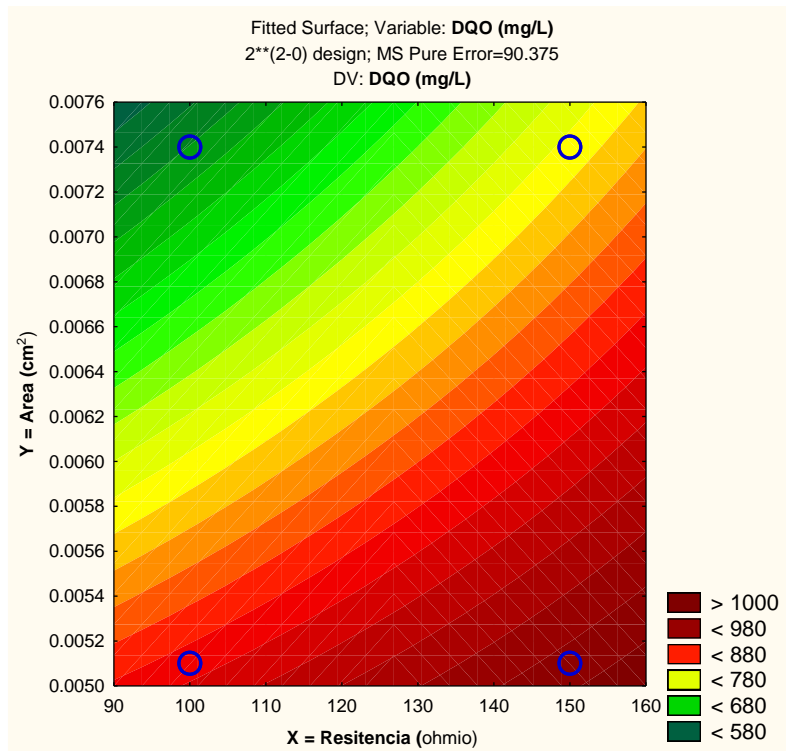


Figura 27. Curva de contorno para la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

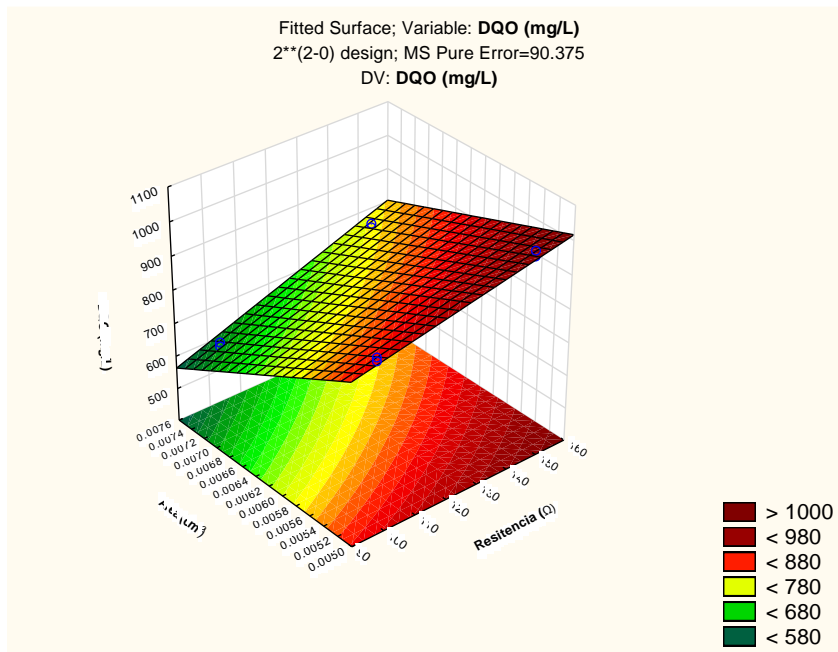


Figura 28. Diagrama de superficie para la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO)

En la Figura 26 y 27 se muestra la gráfica de contorno y superficie de respuesta de primer orden respectivamente, indicando que la interacción de dos variables independientes entre la resistencia externa (Ω) y el área del electrodo grafito (m^2), la interacción de la resistencia externa (100Ω) y área del electrodo de grafito ($0.0074m^2$) muestra que obtendremos resultados de remoción de DQO más próximos a ($< 580 \text{ mg/L}$) que se encuentran en la región verde oscuro; lo cual indica que a mayor área del electrodo grafito (m^2) y a menor resistencia externa (Ω) se obtendrá una mayor eficiencia de remoción de DQO.

4.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Los resultados de la biodegradación de la materia orgánica en función de la DBO₅ se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Remoción de la materia Orgánica en función de la Demanda Biológica de Oxígeno

Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Área superficial Total del electrodo grafito (cm^2)	Concentración de DBO (mgO_2/L)		Eficiencia de Remoción (%)
			Afluente	Efluente	
CCM1	150	0.0074		449±5.7	68±2.8
CCM2	150	0.0051	1409±92	587±10.6	58±2.1
CCM3	100	0.0074		412±4.9	71±1.4
CCM4	100	0.0051		475±21.2	66±3.5

En La Figura 28 que resulta de la Tabla 15 se observa que las siguientes celdas (CCM1, CCM2, CMM3 y CCM4) obtuvieron una eficiencia de remoción de DBO₅ (68%, 58%, 71% y 66%) respectivamente. En resumen la celda que obtuvo una mayor eficiencia de remoción de DBO₅ es la CCM3 con 71% seguido por la celda CCM1 con un 68%, las mismas que trabajaron con la siguiente configuración, la celda CCM3 trabajo con una resistencia externa de 100Ω y con un área superficial de electrodo de 0.0074 m^2 y la celda CCM1 trabajo con una resistencia externa de 150Ω , y un area superficial de electrodo de

0.0074 m². De donde se infiere que las celdas con mayor Area Superficial del electrodo y a menor resistencia externa se obtienen una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la DBO₅ (Salar *et al.*, 2011). Otros estudios han logrado mayores eficiencias de remoción debida, probablemente, a las características del agua residual empleada, la configuración de la CCM y operación.

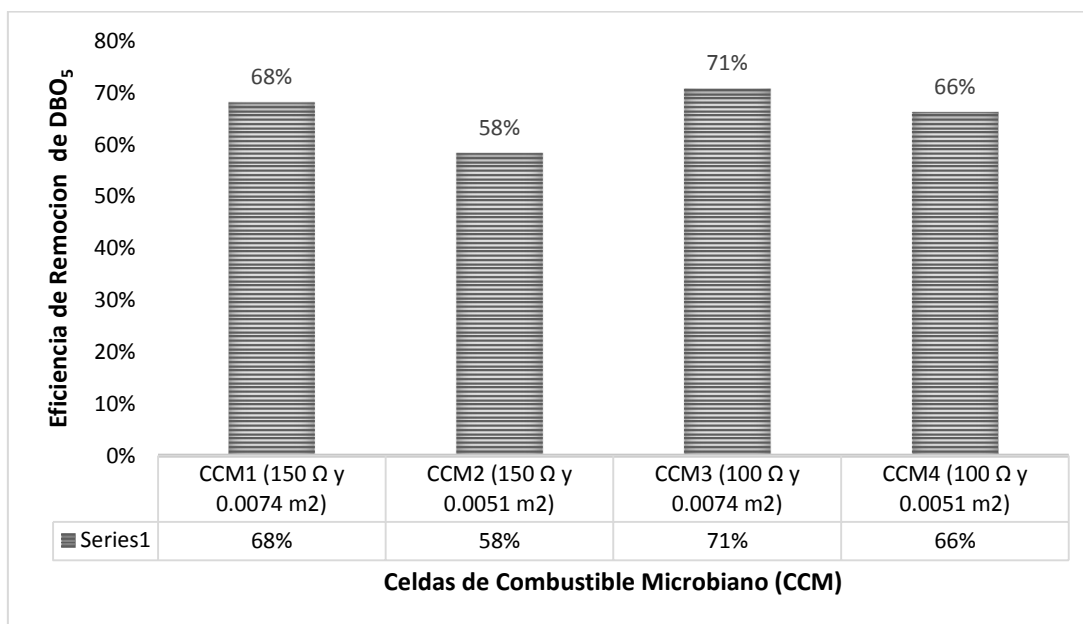


Figura 29. Eficiencia de remoción de la DBO

4.2.2.1. Análisis estadísticos de la DBO₅

Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de la Resistencia externa (Ω) y A_{ST} Grafito en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en función a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅).

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Resistencia (Ω)	11100.50	1	11100.50	71.7318	0.001065
(2)Area (cm2)	20200.50	1	20200.50	130.5363	0.000335
1 by 2	2738.00	1	2738.00	17.6931	0.013626
Pure Error	619.00	4	154.75		
Total SS	34658.00	7			

Nota: R² = 0.98; R-adj: 0.968

En la Tabla 17, se muestran los resultados de la ANOVA Factorial 2² con un nivel de confianza al 95% con respecto a DBO₅ luego de aplicar el tratamiento. Se observa que los factores tanto la resistencia externa (Ω) ($P = 0.001$) como el area del electro (m^2) ($P = 0.0003$) resultan significativas en la remoción de la DBO₅, así mismo la interacción de ambos factores ($P = 0.01$) resultan significativas.

Por otro lado se tiene un coeficiente de determinación de ($R^2 = 0.98$) y un coeficiente de determinación ajustado ($R\text{-adj} = 0.97$), lo cual quiere decir que el modelo de regresión se ajusta en un 98% a los datos experimentales.

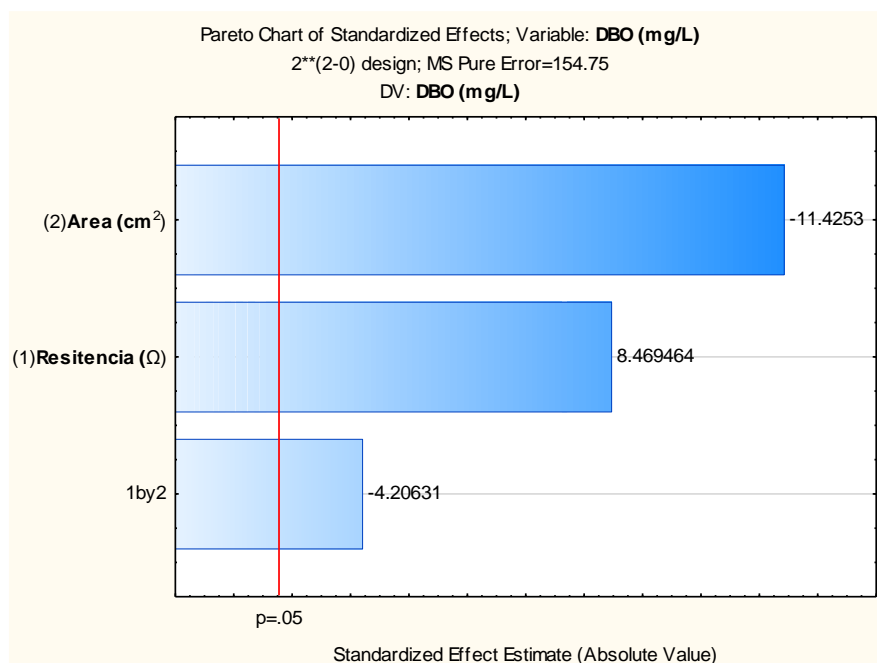


Figura 30. Significancia de los efectos principales Resistencia y A_{ST} Grafito (cm²) en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en función de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

En la figura 29, se presenta el diagrama de Pareto, donde se muestra gráficamente los factores más importantes en la variable respuesta (remoción de la DBO₅). Se observa que el área superficial del electrodo grafito (m²) tuvo mayor influencia significativa, quiere decir que a mayor área superficial se tendrá menores valores de DBO₅, seguida por la variable Resistencia (Ω), así mismo se observa que la interacción de ambos factores es significativa pero en menor grado.

Figura 31. Curva de contorno para la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

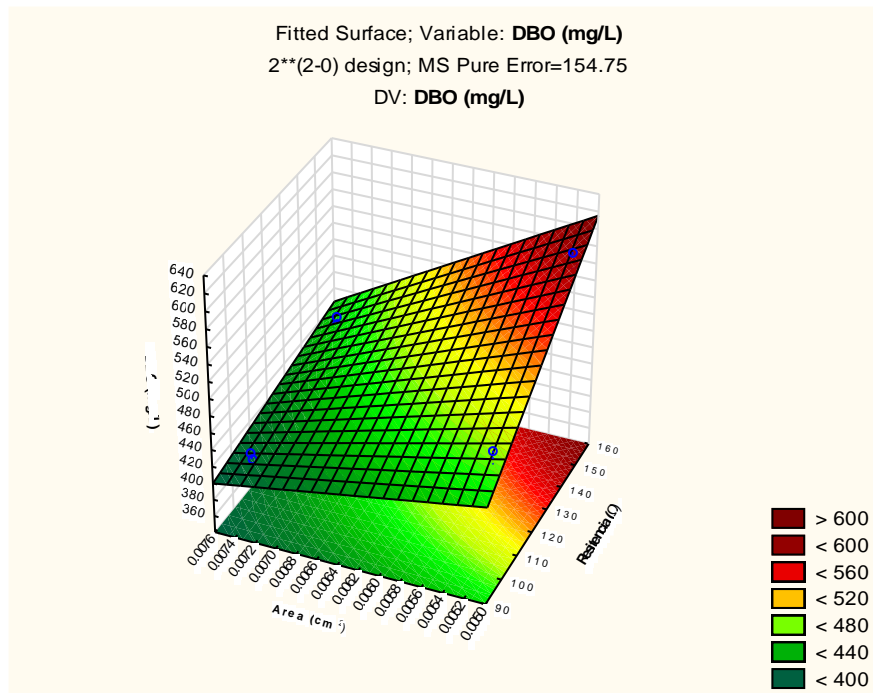
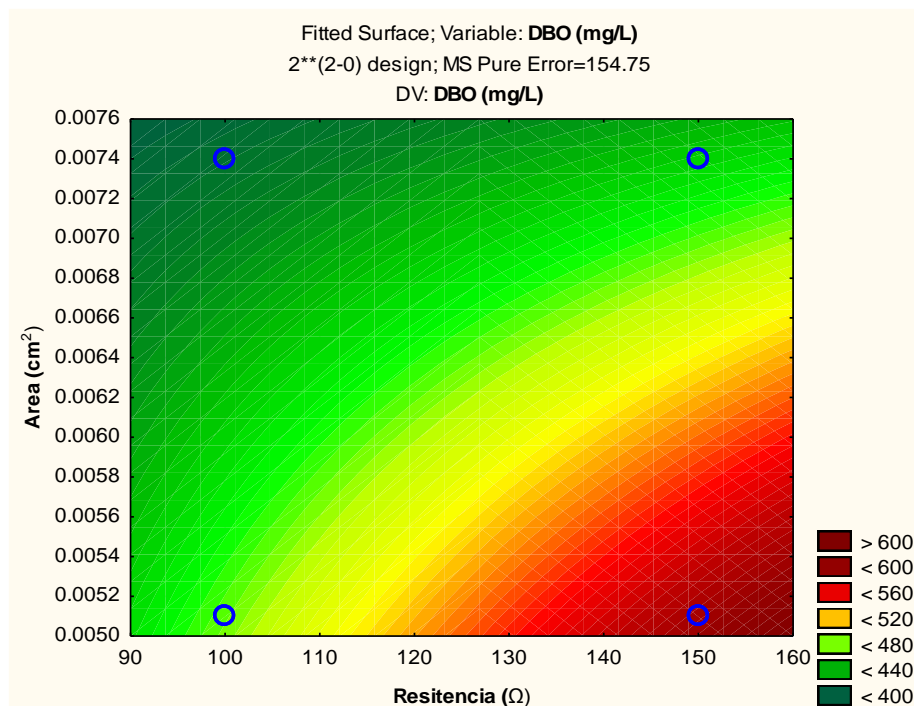


Figura 32. Diagrama de superficie para la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)



En la Figura 30 y 31 se muestra el grafico de curva contorno y superficie de respuesta de primer orden, muestran que interacción de dos variables independientes, resistencia externa (100 Ω) y area del electrodo de grafito (0.0074m²) se obtiene resultados de remoción de DBO₅ más próximos a (< 400 mg/L) que se encuentran en la región verde oscuro; lo cual indica que a mayor área del electrodo grafito (m²) y a menor resistencia externa (Ω) se obtendrá mayor remoción de DBO₅.

4.2.3. Factores intervinientes en la eficiencia de las Celdas de Combustible

Microbiano

4.2.3.1. Potencial de Hidrogeno (pH)

En la Tabla 18, se muestra los valores pre y post tratamiento de pH, se observa que el pH en el afluente ha disminuido en las cuatro Celdas. Según He (2006) un valor de pH en el rango de 6.0 a 9.0 en el ánodo, sería un valor que favorezca las condiciones del biocatalizador. Según Huang (2011) la disminución de pH en la cámara anódica se debe a la lenta difusión y migración de los protones a través del puente salino hacia la cámara catódica; dando como resultado un pH ácido, ocasionando una disminución drástica de la actividad bacteriana y por consiguiente afecta la transferencia de protones hacia la cámara catódica.

Tabla 18. Valore pre y post tratamiento del pH

pH del agua		
Celda	Afluente	Efluente
CCM1		4.8±0.1
CCM2		4.9±0.1
CCM3	6.6±0.14	4.7±0.1
CCM4		4.8±0.3

4.2.3.2. Temperatura del agua

En la Tabla 19 se muestra los valores de la temperatura del agua residual industrial obtenidas pre y post tratamiento, donde se observa que la temperatura ha disminuido ligeramente en el efluente. Según Jadhav y Ghangrekar (2009) en rangos de temperatura de 30 – 45°C la actividad bioelectrocatalítica de los microorganismos es máxima, por ende la generación de electricidad y remoción de materia orgánica tiende a aumentar. En el presente estudio la temperatura de las 4 celdas no se encuentran dentro del rango, por lo que la remoción de la materia orgánica se mantuvo cercano al 75 % y no al 100%.

Tabla 19. Valores de la temperatura del agua

Celda	T° C del agua	
	Afluente	Efluente
CCM1		22.65±1.6
CCM2	22.85±0.6	22.45±1.6
CCM3		22.7±1.7
CCM4		22.55±1.9

4.2.3.3. Conductividad del agua

En la Tabla 20 se muestra los valores de la conductividad eléctrica pre y post tratamiento, donde se observa que los valores de la conductividad aumentaron considerablemente. La CCM4 presenta un mayor incremento de conductividad, ya que antes del tratamiento se tiene un valor de 1605 ($\mu\text{s}/\text{cm}$) y después del tratamiento 4605 ($\mu\text{s}/\text{cm}$). Según Nam *et al* (2010) el incremento de la conductividad en el agua residual facilita la transferencia de protones hacia la zona catódica, por ende, se genera mayores densidades de potencia. En el presente estudio, el incremento de la conductividad también se puede deber al cloruro de sodio (NaCl) empleado en la preparación del puente salino, el cloruro de sodio (NaCl) es un electrolito que disuelto en agua es un conductor de electricidad.

Tabla 20. Valores de la conductividad pre y pos tratamiento

Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)		
Celda	Afluente	Efluente
CCM1		3790 \pm 3154
CCM2	1605 \pm 262	4250 \pm 3960
CCM3		4305 \pm 3896
CCM4		4605 \pm 4221

4.2.4. Comparación de los parámetros DQO y DBO post tratamiento con la normativa

En la Tabla 21 se muestra la comparación de los valores de los parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO5, T° y pH) obtenidos post tratamiento con los Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de aguas residuales no domesticas en sistema de alcantarillado sanitario regulado por DS. N° 021-2009-VIVIENDA.

Tabla 21. Comparación de los parámetros Fisicoquímicos post tratamiento con la normativa (DS. N° 021-2009-VIVIENDA)

Celda	Parámetro	Unidad	Valores post tratamiento	VMA para la descarga al sistema de alcantarillado
CCM1	DQO	(mg/L)	787±9	1000
CCM2			989±12	
CCM3			621±8	
CCM4			891±8	
CCM1	DBO5	(mg/L)	449±5.6	500
CCM2			587±11	
CCM3			412±5	
CCM4			475±21	
CCM1	Temperatura	°C	23±1.6	< 35
CCM2			22±1.6	
CCM3			23±1.7	
CCM4			23±1.9	
CCM1	pH	Unidad	4.8±0.1	6 – 9
CCM2			4.9±0.1	
CCM3			4.7±0.1	
CCM4			4.8±0.3	

*VMA. Valores Máximos Admisibles

En la tabla anterior se observa que los parámetro de DQO, DBO5 y Temperatura posterior al tratamiento en las Celdas de Combustible Microbiano cumplen con los Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de aguas residuales no domesticas en sistema de alcantarillado sanitario, a excepción del parámetro de DBO5 correspondiente a la CCM2. Así mismo los valores de pH en el efluente del sistema de tratamiento se encuentran en un rango de 4.7 a 4.9 los cuales no están dentro de los valores establecidos por el DS. N° 021-2009-VIVIENDA (6 a 9 UN de pH).

4.3. Desempeño Electroquímico de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)

4.3.1. Generación de bioelectricidad en la fase de operación (voltaje)

Tabla 22. Análisis de Varianza (ANOVA) para la Resistencia externa y Área superficial total del electrodo de Grafito sobre el Voltaje

Factor	SS	df	MS	F	p
(1) Resistencia	307.456	1	307.456	1.83965	0.246498
(2) Área del electrodo	307.456	1	307.456	1.83965	0.246498
1 by 2	1794.376	1	1794.376	10.73660	0.030596
Error	668.508	4	167.127		
Total SS	3077.796	7			

Nota: $R^2 = 0.78$; $R\text{-adj} = 0.62$

En la Tabla 22, se muestran los resultados de la ANOVA Factorial 2^2 con un nivel de confianza al 95% con respecto a la generación de bioelectricidad (Voltaje mV) luego de aplicar el tratamiento. Se observa que los factores tanto la resistencia externa (Ω) ($P = 0.25$) como el area del electrodo (m^2) ($P = 0.25$), independientemente no resultan significativas en la generación de bioelectricidad, sin embargo la interacción de ambos factores ($P = 0.03$) si resultan significativas en la generación de bioelectricidad.

Por otro lado se tiene un coeficiente de determinación de ($R^2 = 0.78$) y un coeficiente de determinación ajustado ($R\text{-adj} = 0.62$), lo cual quiere decir que el modelo de regresión se ajusta en un 78% a los datos experimentales.

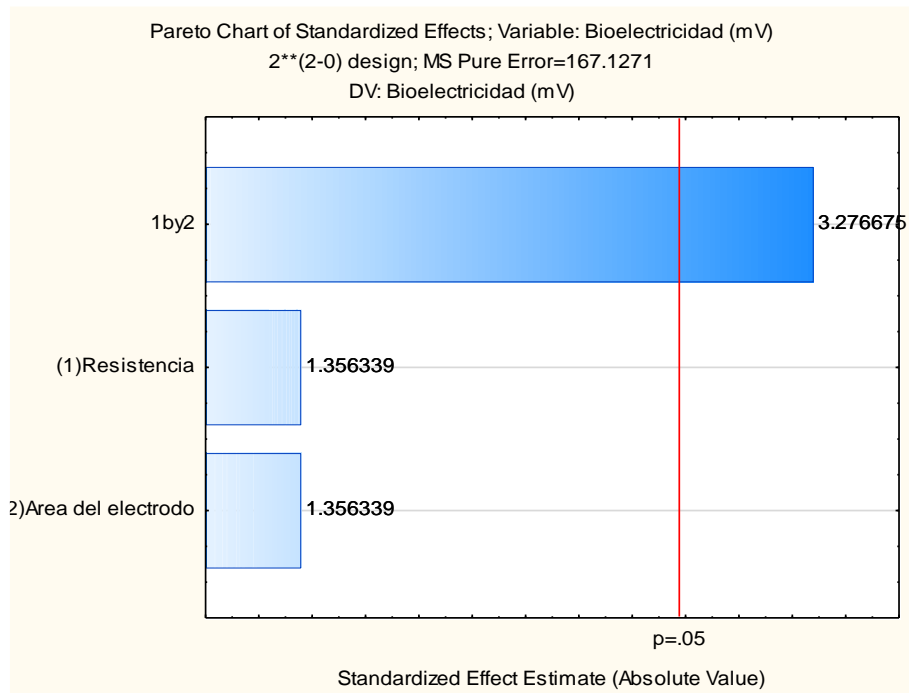


Figura 33. Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A_{ST} -Grafito (cm^2) en la Generación de bioelectricidad (mV)

En la figura 32, se presenta el diagrama de Pareto, donde se muestra gráficamente los factores más importantes en la variable respuesta (Generación de Bioelectricidad). Se observa que la interacción de los factores principales (Área superficial del electrodo grafito y Resistencia Externa) son significativos, lo que indica que son determinantes para la generación de bioelectricidad. Sin embargo el efecto del área del electrodo grafito (m^2) y la resistencia externa (Ω) independientemente no presentan un valor significativo.

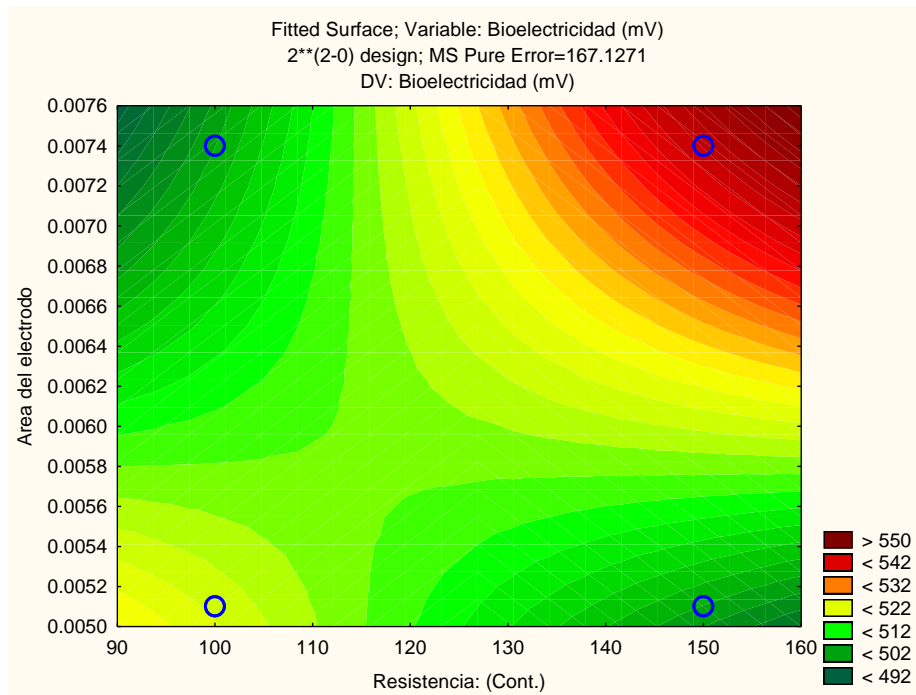


Figura 34. Curva de contorno para la generación de Bioelectricidad

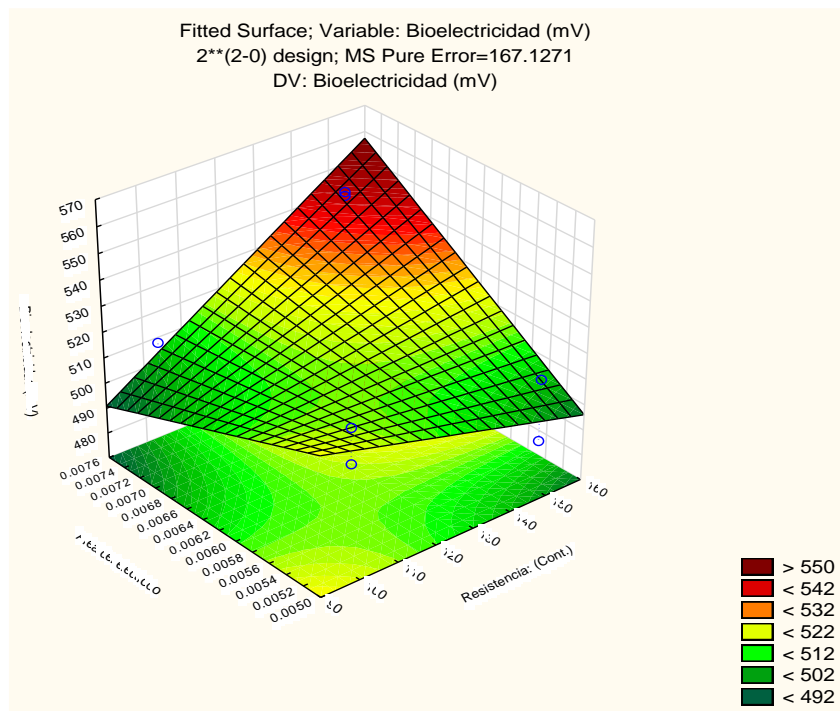


Figura 35. Diagrama de Superficie para la generación de Bioelectricidad

En la Figura 33 y 34 se muestran el grafico de contorno y superficie de respuesta de primer orden, se observa que la interacción de dos variables independientes entre la resistencia externa (Ω) y el área del electrodo grafito (m^2), la interacción de la resistencia

externa (150 Ω) y área del electrodo grafito (0.0074m²) muestran que obtendremos resultados de generación de bioelectricidad (> 500 mV) que se encuentran en la región Rojo oscuro; lo cual indica que a mayor área del electrodo grafito (m²) y a mayor resistencia externa (Ω) se obtendrá mayor generación de bioelectricidad en términos de Voltaje (mV).

4.3.2. Caracterización electroquímica de la Celda de combustible microbiano.

Las cuatro configuraciones de Celdas de combustible microbiano empleadas en el experimento que operaron durante nueve días con dos replicas cada una, demuestran que es posible generar bioelectricidad expresada en Voltaje (mV) empleando como sustrato el Agua residual industrial. En la tabla 23 se muestra la caracterización electroquímica de las cuatro celdas de combustible microbiano.

Tabla 23. Valores de Voltaje, Intensidad de Corriente, Potencia y Densidad de Potencia

Celdas de combustible Microbiano	Dias	Resistencia (Ω)	Area superficial de Grafito (m ²)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
CCM1	1	150	0.0074	484±15	3.23±0.1	1.6±0.1	210.6±13
	2	150	0.0074	489±15	3.26±0.1	1.6±0.1	214.8±13
	3	150	0.0074	493±10	3.29±0.1	1.6±0.1	218.5±9
	4	150	0.0074	494±10	3.29±0.1	1.6±0.1	218.9±9
	5	150	0.0074	492±16	3.28±0.1	1.6±0.1	217.9±14
	6	150	0.0074	497±16	3.31±0.1	1.7±0.1	222.1±15
	7	150	0.0074	504±20	3.36±0.1	1.7±0.1	227.9±18
	8	150	0.0074	527±0	3.51±0	1.8±0	249.6±0
	9	150	0.0074	544±1	3.63±0	1.9±0	266.1±1
CCM2	1	150	0.0051	480±5	3.20±0	1.5±0	302.7±7
	2	150	0.0051	494±1	3.29±0	1.6±0	320.6±1
	3	150	0.0051	508±12	3.39±0.1	1.7±0.1	340.2±16

	4	150	0.0051	516±9	3.44±0.1	1.8±0.1	350.8±13
	5	150	0.0051	509±6	3.40±0	1.7±0	341.4±8
	6	150	0.0051	497±7	3.31±0.1	1.7±0.1	324.8±10
	7	150	0.0051	491±0	3.28±0	1.6±0	317.9±0
	8	150	0.0051	490±0	3.27±0	1.6±0	315.9±0
	9	150	0.0051	487±0	3.25±0	1.6±0	312.7±0
	<hr/>						
	1	100	0.0074	497±17	4.97±0.2	2.5±0.2	332.7±23
	2	100	0.0074	518±20	5.18±0.2	2.7±0.2	361.5±28
	3	100	0.0074	517±11	5.17±0.1	2.7±0.1	360.1±15
	4	100	0.0074	520±1	5.20±0	2.7±0	363.9±2
CCM3	5	100	0.0074	517±8	5.17±0.1	2.7±0.1	360.6±11
	6	100	0.0074	516±12	5.16±0.1	2.7±0.1	358.4±17
	7	100	0.0074	517±12	5.17±0.1	2.8±0.1	359.8±17
	8	100	0.0074	522±4	5.22±0	2.7±0	367.5±6
	9	100	0.0074	519±9	5.19±0.1	2.7±0.1	363.6±13
	<hr/>						
	1	100	0.0051	421±51	4.21±0.5	1.8±0.4	351.8±85
	2	100	0.0051	461±7	4.61±0.1	2.1±0.1	419.2±13
	3	100	0.0051	463±11	4.63±0.1	2.1±0.1	423.9±20
	4	100	0.0051	471±19	4.71±0.2	2.2±0.2	438.2±36
CCM4	5	100	0.0051	483±25	4.83±0.3	2.3±0.3	460.8±49
	6	100	0.0051	489±25	4.89±0.2	2.4±0.2	472.1±48
	7	100	0.0051	499±25	4.99±0.3	2.5±0.3	491.4±49
	8	100	0.0051	507±32	5.07±0.3	2.6±0.3	508.6±65
	9	100	0.0051	522±38	5.22±0.4	2.7±0.3	538.3±78
	<hr/>						

En la Figura 35, se muestra el comportamiento del voltaje (mV) de nueve días, de las cuatro celdas con diferentes configuraciones. Donde se observa que la generación de

bioelectricidad en las cuatro celdas comprenden las fases de crecimiento y estacionaria (oscilatoria). Sin embargo en la CCM2 y CCM3 también se aprecia la fase de muerte celular o declinación.

Al inicio del experimento se registró voltajes de 484 mV, 480 mV, 497 mV, 421 mV para las celdas CCM1, CCM2, CCM3 y CCM4 respectivamente. Estos valores de voltaje registrados se diferencian entre sí, debido a que cada celda conto con diferente configuración (diferente area superficial de electrodo y resistencia externa). Durante el experimento se registró valores de voltaje máximos de 544 mV, 516mV, 522mV, 522mV para las celdas CCM1, CCM2, CCM3 Y CCM4 respectivamente. Alcanzando la CCM1 un voltaje máximo (544 mV) en comparación a las demás celdas, vale decir que a mayor Area superficial de electrodo (0.0074 m²) y resistencia externa (150) se obtiene mayor generación de bioelectricidad.

Yuan y Kim (2008), mencionan que la generación de energía eléctrica aumenta en función a la cantidad de bacterias presentes en el ánodo y al comenzar el proceso browniano los microorganismos que se encuentran en el centro del ánodo empiezan a morir y en consecuencia disminuye la generación de voltaje, esto explica el acontecimiento en la CCM2 y CCM3 donde se observa la disminución de Voltaje.

Otras investigaciones realizadas obtuvieron resultados similares así tenemos; Lache, (2018) realizo un estudio donde empleó como sustrato agua residual, y placa de grafito como electrodo, donde obtuvieron voltajes promedio de 294.17 mV.

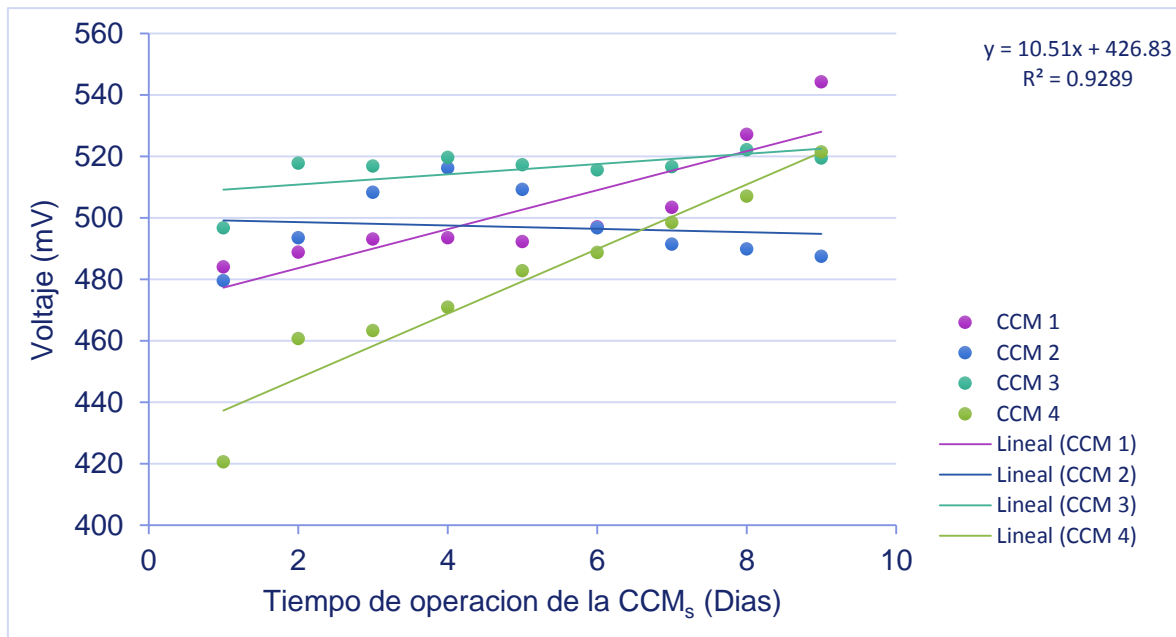


Figura 35. Comportamiento del voltaje registrado en las 4 CCM.

En la figura 36 se muestra el comportamiento de la intensidad de corriente durante el periodo de operación de nueve días. Donde se observa que los valores de intensidad de corriente obtenida por la CCM1 y CCM2 que trabajaron con una resistencia mayor de 150 Ω fluctúan en un rango de 3.2 a 3.4 mA. Sin embargo las Celdas CCM3 y CCM4 que operaron con una resistencia menor de 100 Ω registraron valores mayores de intensidad de corriente que fluctúan en un rango de 4.9 – 5.2 mA. En resumen una mayor densidad de corriente se obtiene al trabajar con una resistencia menor (100 Ω), esto es corroborado por Alzate et al. (2008) quienes afirman que con una resistencia menor se registra una mayor intensidad de corriente, esto se debe a que con bajas resistencias, los electrones se mueven más fácilmente a través del circuito.

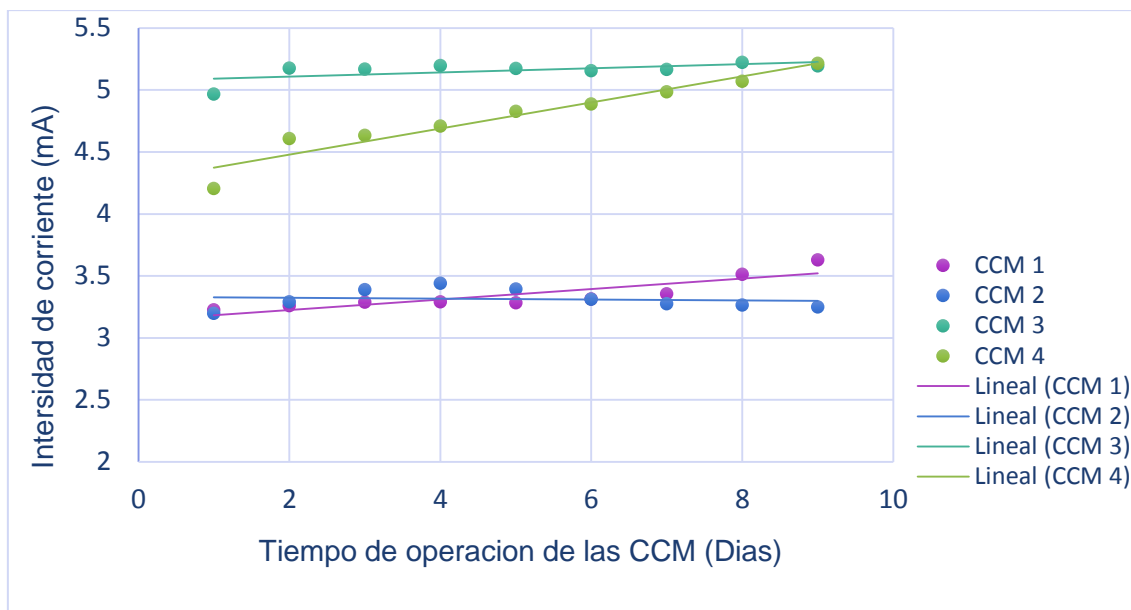


Figura 36. Comportamiento de la intensidad de corriente registrado en las 4 CCM.

La densidad de potencia generada en las cuatro celdas (CCM) fue medida en base al área superficial del ánodo en mW/m^2 . En la figura 38 se muestra las densidades de potencias alcanzadas por las cuatro celdas (CCM1, CCM2, CCM3 y CCM4) durante el periodo de operación de nueve días. Donde la CCM4 obtuvo la densidad de potencia máxima de $550 \text{ mW}/\text{m}^2$ en el noveno día. Y durante el periodo de operación de la CCM siempre se mantuvo por encima de las demás celdas (CCM1, CCM2 y CCM3). Los resultados obtenidos muestran que a menor área de electrodo se obtiene mayores densidades de potencia.

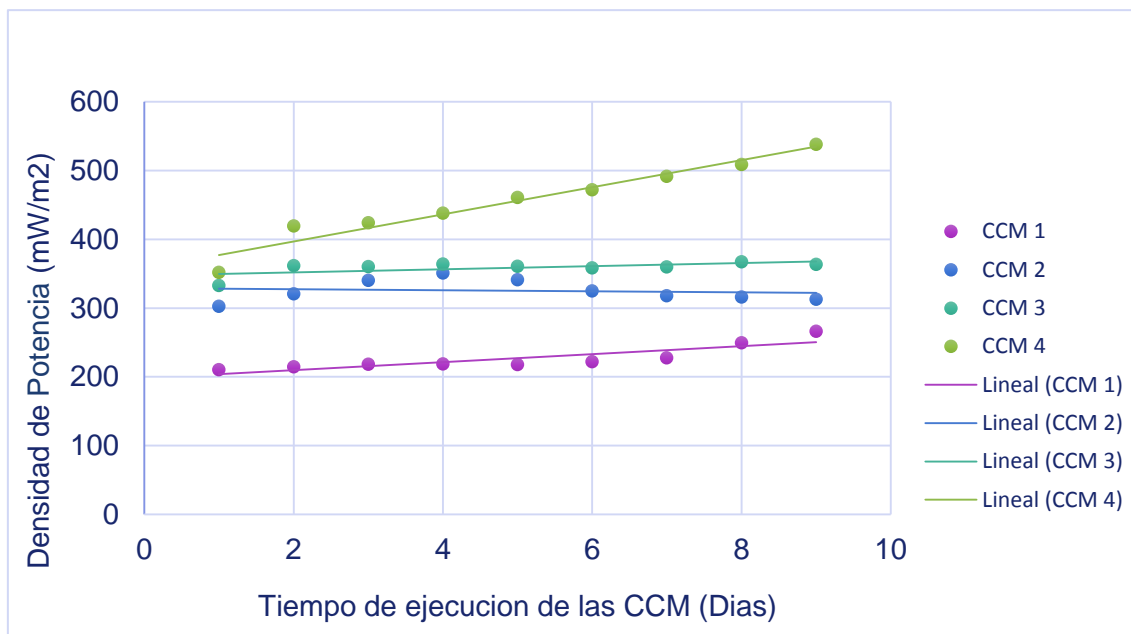


Figura 38. Comportamiento del Densidad de potencia registrado en las 4 CCM

4.4. Relación de la bioelectricidad con la eficiencia de remoción de la materia Orgánica

Tabla 23. Relación de la bioelectricidad y la biodegradación de la materia orgánica

Celdas de combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Area superficial de Grafito (cm)	Voltaje Promedio (mV)	Eficiencia de remoción de DQO (%)	Eficiencia de remoción de DBO (%)
CCM1	150	0.0074	502.67729	74	68
CCM2	150	0.0051	496.97169	67	58
CCM3	100	0.0074	515.83934	79	71
CCM4	100	0.0051	479.37763	70	66

En la Figura 39 que resulta de la Tabla 23 se observa la relación que existe entre la generación de bioelectricidad y biodegradación de la materia orgánica. La relación que existe es directamente proporcional ya que a mayor generación de electricidad también será mayor la degradación de la materia orgánica. Liu y Logan (2004) afirman que a medida que los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el sustrato, está a la vez dona electrones al electrodo (ánodo), de esta manera generaran bioelectricidad.

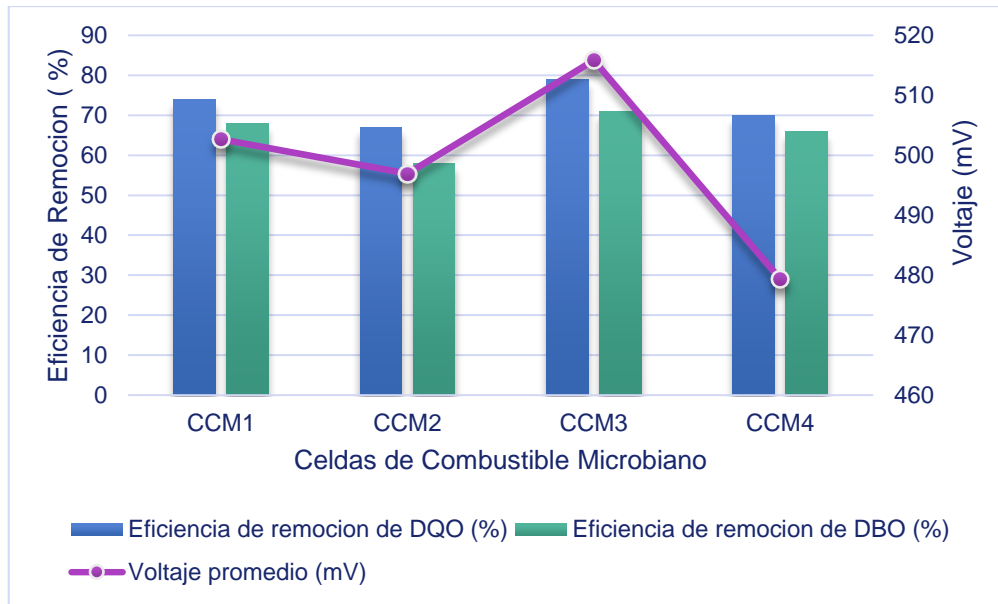


Figura 39. Relación de bioelectricidad y biodegradación de la materia orgánica

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos en la investigación, aplicando el diseño estadístico factorial 2^2 y su respectivo análisis mediante el ANOVA factorial, con un nivel de confianza al 95%, se determinó que la interacción de las variables independientes (área superficial del electrodo y resistencia externa) es estadísticamente significativa en la generación de bioelectricidad y remoción de materia orgánica (DQO y DBO₅) del agua residual industrial.

Los resultados de los análisis realizados (pre y pos) de la DQO en un laboratorio acreditado por la INACAL, muestran una eficiencia de remoción para la DQO de 74%, 67%, 79% y 70% para las Celdas CCM1, CCM2, CCM3 Y CCM4 respectivamente. Así mismo las gráficas de contorno y superficie de respuesta del diseño estadístico muestran que a mayor area de electrodo y menor resistencia externa se obtiene una mayor eficiencia de remoción de DQO. Es así que la CCM3 logro una mayor eficiencia de remoción de DQO (79%) con respecto a las demás celdas, ya que trabajo con una mayor área de electrodo de 0.0074 m² y menor resistencia externa de 100 Ω .

De igual a la forma los resultados de los análisis para la DBO5 muestran una eficiencia de remoción de 68%, 58%, 71% y 66% para las CCM1, CCM2, CCM3 y CCM4 respectivamente. Así mismo las gráficas de contorno y superficie de respuesta del diseño estadístico factorial 2^2 muestran que a mayor area de electrodo y menor resistencia externa se obtiene una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica (DBO5). Es así que la CCM3 logro una mayor eficiencia de remoción de DBO5 (71%), ya que trabajó con una mayor area de electrodo de 0.0074 m² y menor resistencia externa de 100 Ω .

Con respecto a la generación de bioelectricidad, se registró voltajes promedios de 503, 497, 516, 479mV para la CCM1, CCM2, CMM3 y CCM4 respectivamente, destacándose la CCM3 en la generación de bioelectricidad ya que se registró un mayor voltaje (516 mV) a diferencia de las demás celdas. Las gráficas de superficie de respuesta del diseño estadístico, muestran que los voltajes mayores a 516 mV se registran al emplear una menor resistencia externa de 100 Ω y una mayor área superficial de electrodo de 0.0074 m².

5.2. Recomendaciones

Se recomienda hacer una evaluación de la CCM por un periodo de tiempo más prolongado para establecer su eficiencia tanto en reducción de la materia orgánica como en la generación de bioelectricidad. Ya que los resultados obtenidos en la presente investigación con respecto a la generación de bioelectricidad en unidades de voltaje, muestran que las celdas (CCM 1 y CCM4) el voltaje sigue una línea de tendencia creciente.

Así mismo se recomienda trabajar con un volumen de sustrato mayor a 2000 ml para las celdas de combustible microbiano a escala laboratorio. y mayor area de electrodo.

En la presente investigación se registraron valores de pH por debajo de 4.9 lo cual no es recomendable para el buen desempeño de las celdas de combustible microbiano. Por ello se recomienda para futuras investigaciones emplear mediadores (Mn, Fe) para estabilizar el pH y mantener en un rango de 6.0 – 9.0, ello permitirá un mejor desempeño de la CCM con respecto a generación de energía eléctrica.

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (UNESCO) Organización de las Naciones Unidas para la Educación (2017). Hecho 36: Aguas residuales industriales Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Retrieved December 13, 2019, from URL <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater>.
- Academy, K. (2019). Crecimiento exponencial y logístico. from URL <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/population-growth-and-regulation/a/exponential-logistic-growth>.
- Aguilar, M., Sáez, J., Llorens, M., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación - M. I. Aguilar - Google Libros*. Retrieved from [https://books.google.com.pe/books?id=8vIQBXPvhAUC&printsec=frontcover&dq=proceso+de+coagulacion+y+floculacion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjQyIOP_LjmAhVJOs0KHeU6BgIQ6AEIKDAA#v=onepage&q=proceso de coagulacion y floculacion&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=8vIQBXPvhAUC&printsec=frontcover&dq=proceso+de+coagulacion+y+floculacion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjQyIOP_LjmAhVJOs0KHeU6BgIQ6AEIKDAA#v=onepage&q=proceso+de+coagulacion+y+floculacion&f=false)
- Alzate, L., González, K., Peraza, I., García, O., Domínguez, J., Vázquez, J., & Tzec, B. (2010). Evaluación del desempeño e identificación de exoelectrógenos en dos tipos de celdas de combustible microbianas con diferente configuración en el ánodo. *Redalyc, vol 35, n°*, 19–25.
- Ayde, A., Mejía, R., Vásquez, J. A., & González, A. (2012). *Recreaciones Bacterias, fuente de energía para el futuro Bacteria, source of energy for the future* (Vol. 16).
- Bermúdez, J., Cánovas, M., Manjon, A., Iborra, J., & Howell, J. (1988). *La digestión anaerobia*. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=dLR2fQTufases+de+la+digestion+anaerobia>.

- Buitrón, G. y Pérez, J. (2011a). *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5–11.
- Buitrón, G. & Pérez, J. (2011b). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1):5-11, 7.
- Buitrón, G. (2008). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales*. 1–30.
- Chang, I., Gorby, Y., Yanina, S., McLean, J., Rosso, K., Moyles, D., & Fredrickson, J. (2006). Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(30), 11358–11363.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0604517103>
- Chaudhuri, S. & Lovley, D. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 21(10), 1229–1232.
<https://doi.org/10.1038/nbt867>
- Condori, A. & Torres, G. (2019). Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica – Lima. *Universidad Peruana Unión*, (Ccm). Retrieved from <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1655>
- Corrales, C., Marcela, D., Romero, A., Macías, J., & Vargas, C. (2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. 1–27.
- Das, S., Bhowmick, G., Verma, H. K., Neethu, B., & Ghangrekar, M. (2019). Improved performance of microbial fuel cell by using conductive ink printed cathode containing

Co₃O₄ or Fe₃O₄. *Electrochimica Acta*, 310, 173–183.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.127>

Du, C., Cheng, X., Yang, T., Yin, G., & Shi, P. (2005). Numerical simulation of the ordered catalyst layer in cathode of proton exchange membrane fuel cells. In *Electrochemistry Communications* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.09.022>

Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, Vol. 25, pp. 464–482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>

Espigares, M. & Pérez, A. (1985). Composicion de *aguas residuales*. *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Universidad de Granada. Granada.

Estrada, E. & Salazar, S. (2018). Generación de energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales por medio de bioceldas. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 1–81.

González del Valle, M. (2010). *El 70% de aguas residuales en Perú se vierte sin tratamiento, afirma viceministra* | Noticias | Agencia Peruana de Noticias Andina. Retrieved from <https://andina.pe/agencia/noticia-el-70-aguas-residuales-peru-se-vierte-sin-tratamiento-afirma-viceministra-286553.aspx>

Hincapié, L. (2014). *Desarrollo de un celda de combustible microbiana (ccm) para aplicación en tratamiento de aguas residuales*.

Iversen, C. & Forsythe, S. (2003, November 1). Risk profile of *Enterobacter sakazakii*, an emergent pathogen associated with infant milk formula. *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 14, pp. 443–454. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(03\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(03)00155-9)

Jibaja, S. (2018). “ *Producción De Electricidad En Celdas De Combustible microbianas a partir de tiosulfato Utilizando Cepas de acitithibacillos ferroxidans*. 106. Retrieved from

http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/3965/Produccion_JibajaCaceres_Sandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jung, S. & Regan, J. (2011). Influence of external resistance on electrogenesis, methanogenesis, and anode prokaryotic communities in microbial fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(2), 564–571. <https://doi.org/10.1128/AEM.01392-10>

Liu, H. & Logan, B. (2004). Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040–4046. <https://doi.org/10.1021/es0499344>

Logan, B. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375–381. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2113>

Logan, B., Hamerlars, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., & Rabaey, K. (2006). *Critical Review Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology*. <https://doi.org/10.1021/es0605016>

Logan, B. & Regan, J. (2006). Microbial fuel cells - Challenges and applications. *Environmental Science and Technology*, Vol. 40, pp. 5172–5180. <https://doi.org/10.1021/es0627592>

Lopez, C., Buitron, G., Garcia, H., & Cervantes, F. (2017). Tratamiento biologico de aguas residuales: principios, modelacion y diseño. In *Ingenieria Quimica* (Vol. 33). <https://doi.org/10.17345/9788484241027>

Lovley, D. (2008). The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 19, pp. 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.10.005>

- Mejía, J. (2018). El nuevo régimen de vertimiento de aguas residuales tratadas en el Perú | Servindi - Servicios de Comunicación Intercultural. Retrieved December 15, 2019, from <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/13/07/2018/el-nuevo-regimen-de-vertimiento-de-aguas-residuales-tratadas-en-el>
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales : tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F., & Cajigas, A. (1995). *Ingeniería de aguas residuales : tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill.
- MINEM (2007). *Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Electricidad*. 1–20.
- Mora, A., & Bravo, E. (2017). Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales. *Acta Biologica Colombiana*, 22(1), 77–84. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>
- Osorio, F., Torres, J., & Sánchez, M. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*.
- Picazo, J. (1995). *Aguas residuales en la industria agro alimentaria: caracterización y sistemas de tratamiento y depuración*.
- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*, 25(18), 1531–1535. <https://doi.org/10.1023/A:1025484009367>
- Ramalho, R. (1990). Caracterización de las aguas residuales domésticas e industriales. In E. Reverté (Ed.), *Tratamiento de aguas residuales* (pp. 3–5).
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Retrieved from

[https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA8&dq=tratamiento+secundario+que+contaminantes+se+elimina&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjctaWw_rjmAhVQCM0KHWRwDZsQ6AEIKzAA#v=onepage&q=tratamiento secundario que contaminantes se elimina&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA8&dq=tratamiento+secundario+que+contaminantes+se+elimina&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjctaWw_rjmAhVQCM0KHWRwDZsQ6AEIKzAA#v=onepage&q=tratamiento%20secundario%20que%20contaminantes%20se%20elimina&f=false)

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Scielo.conicyt.cl*. Retrieved from https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000600004&script=sci_arttext&tIng=e

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013a). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013b). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Rodríguez, H. (2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes | iAgua*. Retrieved from <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>

Roh, S., & Woo, H. (2015). Carbon nanotube composite electrode coated with polypyrrole for microbial fuel cell application. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(1), 484–487. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.8404>

Schröder, U., Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Keller, J., Freguia, S., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>

- Shukla, A., Suresh, P., Berchmans, S., & Rajendran, A. (2004). *Biological fuel cells and their applications*. 1–14.
- TECPA. (2018). Tratamientos secundarios en depuración de aguas residuales en EDAR . Retrieved December 15, 2019, from <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>
- Tuset, S. (2019). Tratamiento biológico de aguas residuales. Retrieved December 16, 2019, from <https://blog.condorchem.com/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
- Valencia, M. (2018). *Escuela De Posgrado Maestría En Ciencias - Ingeniería Química*.
- VENTO (2019). Aguas residuales industriales características - Grupo Vento BLOG. Retrieved December 15, 2019, from <http://evaporadoresindustriales.grupovento.com/aguas-residuales-industriales-caracteristicas/>
- Zhang, L., Li, J., Zhu, X., Ye, D., Fu, Q., & Liao, Q. (2017). Startup Performance and Anodic Biofilm Distribution in Continuous-Flow Microbial Fuel Cells with Serpentine Flow Fields: Effects of External Resistance. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(14), 3767–3774. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04619>

CAPITULO VII

ANEXOS

6.3. Anexo I – Parámetros Físicoquímicos medidos en las celdas de combustible microbiano (CCM)

6.3.1. Parámetros físicoquímicos Pre y post tratamiento en CCM

Tabla 24. Parámetros físicoquímicos pre y post del tratamiento por replicas mediante el sistema de CCM

Prueba	Celda	DBO (mgO ₂ /L)		DQO (mgO ₂ /L)		pH		T° C agua		Conductividad	
		Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Replica 1	CCM1		453		780		4.9		21.5		6020
	CCM2	1344	579	2833	997	6.5	4.9	22.4	21.3	1790	7050
	CCM3		408		615		4.7		21.5		7060
	CCM4		490		885		5.0		21.2		7590
Replica 2	CCM1		445		793		4.7		23.8		1560
	CCM2	1474	594	3108	980	6.7	4.8	23.3	23.6	1420	1450
	CCM3		415		627		4.6		23.9		1550
	CCM4		460		896		4.6		23.9		1620

6.3.2. Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L)

Tabla 25. Remoción de la DQO

Replicas	Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Area superficial Total del electrodo grafito (cm ²)	Concentracion de DQO (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
				Afluent e	Efluent e	
Replica 1	CCM1	150	0.0074	2833	780	72%
	CCM2	150	0.0051		997	65%
	CCM3	100	0.0074		615	78%
	CCM4	100	0.0051		885	69%
Replica 2	CCM1	150	0.0074	3108	793	74%
	CCM2	150	0.0051		980	68%
	CCM3	100	0.0074		627	80%
	CCM4	100	0.0051		896	71%

6.3.3. Remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅ mg/L)

Tabla 26. Remoción de la DBO₅

Replicas	Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Area superficial Total del electrodo grafito (cm ²)	Concentracion de DBO (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
				Afluyente	Efluyente	
Replica 1	CCM1	150	0.0074	1344	453	66%
	CCM2	150	0.0051		579	57%
	CCM3	100	0.0074		408	70%
	CCM4	100	0.0051		490	64%
Replica 2	CCM1	150	0.0074	1474	445	70%
	CCM2	150	0.0051		594	60%
	CCM3	100	0.0074		415	72%
	CCM4	100	0.0051		460	69%

6.3.4. Monitoreo de pH en el agua residual industrial

Tabla 27. Valores de pH pre y post tratamiento

Celda	Resistencia (Ω)	Area del electrodo Grafito (cm)	Replicas	pH	
				Entrada	Salida
CCM1	150	0.0074	Replica 1	6.5	4.9
			Replica 2	6.7	4.7
CCM2	150	0.0051	Replica 1	6.5	4.9
			Replica 2	6.7	4.8
CCM3	100	0.0074	Replica 1	6.5	4.7
			Replica 2	6.7	4.6
CCM4	100	0.0051	Replica 1	6.5	5.0
			Replica 2	6.7	4.6

6.3.5. Monitoreo de la Temperatura en el agua residual industrial

Tabla 28. Valores de Temperatura pre y post tratamiento

Celda	Resistencia (Ω)	Area del electrodo Grafito (cm)	Replicas	T° C. A.R.I	
				Entrada	Salida
CCM1	150	0.0074	Replica 1	22.4	21.5
			Replica 2	23.3	23.8
CCM2	150	0.0051	Replica 1	22.4	21.3
			Replica 2	23.3	23.6
CCM3	100	0.0074	Replica 1	22.4	21.5
			Replica 2	23.3	23.9
CCM4	100	0.0051	Replica 1	22.4	21.2
			Replica 2	23.3	23.9

6.3.6. Monitoreo de conductividad en el agua residual industrial

Tabla 29. Valores de conductividad pre y post tratamiento

Celda	Resistencia (Ω)	Area del electrodo Grafito (cm)	Replicas	Conductividad A.R.I	
				Entrada	Salida
CCM1	150	0.0074	Replica 1	1790	6020
			Replica 2	1420	1560
CCM2	150	0.0051	Replica 1	1970	7050
			Replica 2	1420	1450
CCM3	100	0.0074	Replica 1	1790	7060
			Replica 2	1420	1550
CCM4	100	0.0051	Replica 1	1970	7590
			Replica 2	1420	1620

6.4. Anexo II – parámetros electroquímicos evaluados en la Celda de Combustible Microbiano (CCM)

6.4.1. Parámetros electroquímicos monitoreadas en las cuatro CCM

Tabla 30. Parámetros electroquímicos medidos de la CCM1

Celdas de combustible Microbiano	Dias	Resistencia (Ω)	Longitud de Grafito (cm)	Area superficial de Grafito (m)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
CCM1	10	150	15	0.0074	473	3.2	1.5	201
	11	150	15	0.0074	478	3.2	1.5	205
	12	150	15	0.0074	486	3.2	1.6	212
	13	150	15	0.0074	486	3.2	1.6	212
	14	150	15	0.0074	481	3.2	1.5	208
	15	150	15	0.0074	485	3.2	1.6	211
	16	150	15	0.0074	489	3.3	1.6	215
	17	150	15	0.0074	527	3.5	1.8	249

18	150	15	0.0074	544	3.6	2.0	265
19	150	15	0.0074	495	3.3	1.6	220
20	150	15	0.0074	500	3.3	1.7	224
21	150	15	0.0074	500	3.3	1.7	225
22	150	15	0.0074	501	3.3	1.7	225
23	150	15	0.0074	504	3.4	1.7	228
24	150	15	0.0074	509	3.4	1.7	233
25	150	15	0.0074	518	3.5	1.8	241
26	150	15	0.0074	528	3.5	1.9	250
27	150	15	0.0074	545	3.6	2.0	267

Tabla 31. Parámetros electroquímicos medidos de la CCM2

Celdas de combustible Microbiano	Dias	Resistencia (Ω)	Longitud de Grafito (cm)	Area superficial de Grafito (cm)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
CCM2	1	150	10	0.0051	476	3.2	1.5	298
	2	150	10	0.0051	494	3.3	1.6	322
	3	150	10	0.0051	517	3.4	1.8	352
	4	150	10	0.0051	523	3.5	1.8	360
	5	150	10	0.0051	514	3.4	1.8	348
	6	150	10	0.0051	502	3.3	1.7	332
	7	150	10	0.0051	491	3.3	1.6	318
	8	150	10	0.0051	490	3.3	1.6	316
	9	150	10	0.0051	487	3.2	1.6	312
	10	150	10	0.0051	484	3.2	1.6	308
	11	150	10	0.0051	493	3.3	1.6	319
	12	150	10	0.0051	500	3.3	1.7	329

13	150	10	0.0051	509	3.4	1.7	341
14	150	10	0.0051	505	3.4	1.7	335
15	150	10	0.0051	491	3.3	1.6	318
16	150	10	0.0051	491	3.3	1.6	318
17	150	10	0.0051	490	3.3	1.6	316
18	150	10	0.0051	488	3.3	1.6	313

Tabla 32. Parámetros electroquímicos medidos de la CCM3

Celdas de combustible Microbiano	Dias	Resistencia (Ω)	Longitud de Grafito (cm)	Area superficial de Grafito (cm)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
CCM3	1	100	15	0.0074	485	4.8	2.3	316
	2	100	15	0.0074	503	5.0	2.5	341
	3	100	15	0.0074	509	5.1	2.6	349
	4	100	15	0.0074	518	5.2	2.7	362
	5	100	15	0.0074	512	5.1	2.6	353
	6	100	15	0.0074	507	5.1	2.6	346
	7	100	15	0.0074	508	5.1	2.6	347
	8	100	15	0.0074	519	5.2	2.7	363
	9	100	15	0.0074	513	5.1	2.6	354
	10	100	15	0.0074	509	5.1	2.6	349
	11	100	15	0.0074	532	5.3	2.8	382
	12	100	15	0.0074	525	5.2	2.8	371
	13	100	15	0.0074	521	5.2	2.7	366
	14	100	15	0.0074	523	5.2	2.7	368
	15	100	15	0.0074	525	5.2	2.8	371
	16	100	15	0.0074	526	5.3	2.8	372

17	100	15	0.0074	525	5.3	2.8	372
18	100	15	0.0074	526	5.3	2.8	373

Tabla 33. Parámetros electroquímicos medidos de la CCM4

Celdas de combustible Microbiano	Dias	Resistencia (Ω)	Longitud de Grafito (cm)	Area superficial de Grafito (cm)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
CCM4	1	100	10	0.0051	384	3.8	1.5	292
	2	100	10	0.0051	456	4.6	2.1	410
	3	100	10	0.0051	455	4.6	2.1	409
	4	100	10	0.0051	457	4.6	2.1	413
	5	100	10	0.0051	464	4.6	2.2	426
	6	100	10	0.0051	471	4.7	2.2	438
	7	100	10	0.0051	481	4.8	2.3	456
	8	100	10	0.0051	484	4.8	2.3	462
	9	100	10	0.0051	495	4.9	2.4	483
	10	100	10	0.0051	457	4.6	2.1	412
	11	100	10	0.0051	466	4.7	2.2	428
	12	100	10	0.0051	471	4.7	2.2	438
	13	100	10	0.0051	485	4.8	2.3	464
	14	100	10	0.0051	501	5.0	2.5	496
	15	100	10	0.0051	506	5.1	2.6	506
	16	100	10	0.0051	517	5.2	2.7	527
	17	100	10	0.0051	530	5.3	2.8	555
	18	100	10	0.0051	548	5.5	3.0	594

6.4.2. Voltajes registrados en las cuatro CCM

Tabla 34. Voltaje registrado en la CCM1

CCM 1			
N° horas	Unidad de Medida	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	450	454
2	mV/h	461	495
3	mV/h	468	495
4	mV/h	474	495
5	mV/h	478	495
6	mV/h	478	496
7	mV/h	479	496
8	mV/h	478	497
9	mV/h	478	497
10	mV/h	477	497
11	mV/h	476	497
12	mV/h	475	497
13	mV/h	474	497
14	mV/h	474	498
15	mV/h	473	498
16	mV/h	473	498
17	mV/h	472	498
18	mV/h	472	498
19	mV/h	471	498
20	mV/h	471	498
21	mV/h	472	498
22	mV/h	473	499

23	mV/h	474	499
24	mV/h	476	499
25	mV/h	477	499
26	mV/h	478	499
27	mV/h	479	499
28	mV/h	479	499
29	mV/h	479	499
30	mV/h	479	499
31	mV/h	479	499
32	mV/h	478	499
33	mV/h	476	499
34	mV/h	474	499
35	mV/h	475	499
36	mV/h	476	500
37	mV/h	477	500
38	mV/h	477	500
39	mV/h	477	500
40	mV/h	477	500
41	mV/h	477	500
42	mV/h	478	500
43	mV/h	478	500
44	mV/h	480	500
45	mV/h	481	500
46	mV/h	482	500
47	mV/h	483	500
48	mV/h	483	500
49	mV/h	484	500

50	mV/h	484	500
51	mV/h	484	500
52	mV/h	484	500
53	mV/h	485	500
54	mV/h	486	500
55	mV/h	487	500
56	mV/h	487	500
57	mV/h	487	500
58	mV/h	486	500
59	mV/h	486	500
60	mV/h	486	500
61	mV/h	486	500
62	mV/h	486	500
63	mV/h	486	500
64	mV/h	486	500
65	mV/h	486	500
66	mV/h	486	501
67	mV/h	486	501
68	mV/h	486	501
69	mV/h	486	501
70	mV/h	487	501
71	mV/h	487	501
72	mV/h	488	501
73	mV/h	488	501
74	mV/h	489	501
75	mV/h	488	501
76	mV/h	488	501

77	mV/h	489	501
78	mV/h	489	501
79	mV/h	489	501
80	mV/h	488	501
81	mV/h	488	501
82	mV/h	488	501
83	mV/h	487	501
84	mV/h	486	501
85	mV/h	486	501
86	mV/h	486	501
87	mV/h	486	501
88	mV/h	486	501
89	mV/h	486	501
90	mV/h	485	501
91	mV/h	484	501
92	mV/h	484	501
93	mV/h	483	501
94	mV/h	482	501
95	mV/h	482	501
96	mV/h	483	501
97	mV/h	483	502
98	mV/h	484	502
99	mV/h	483	502
100	mV/h	483	502
101	mV/h	482	502
102	mV/h	481	502
103	mV/h	480	502

104	mV/h	482	503
105	mV/h	482	503
106	mV/h	482	504
107	mV/h	480	504
108	mV/h	480	504
109	mV/h	479	505
110	mV/h	480	505
111	mV/h	479	505
112	mV/h	479	505
113	mV/h	479	505
114	mV/h	480	505
115	mV/h	479	506
116	mV/h	478	506
117	mV/h	479	506
118	mV/h	479	506
119	mV/h	481	506
120	mV/h	483	506
121	mV/h	484	506
122	mV/h	485	506
123	mV/h	485	506
124	mV/h	485	506
125	mV/h	485	507
126	mV/h	485	508
127	mV/h	486	508
128	mV/h	486	508
129	mV/h	486	509
130	mV/h	486	509

131	mV/h	486	509
132	mV/h	485	510
133	mV/h	485	510
134	mV/h	485	510
135	mV/h	484	510
136	mV/h	484	510
137	mV/h	483	510
138	mV/h	482	510
139	mV/h	486	510
140	mV/h	486	510
141	mV/h	486	511
142	mV/h	486	511
143	mV/h	487	512
144	mV/h	487	513
145	mV/h	488	513
146	mV/h	488	513
147	mV/h	489	513
148	mV/h	488	513
149	mV/h	488	514
150	mV/h	489	514
151	mV/h	489	514
152	mV/h	489	514
153	mV/h	488	516
154	mV/h	488	516
155	mV/h	488	517
156	mV/h	487	518
157	mV/h	486	518

158	mV/h	486	519
159	mV/h	486	520
160	mV/h	486	521
161	mV/h	486	521
162	mV/h	486	521
163	mV/h	485	522
164	mV/h	484	522
165	mV/h	484	522
166	mV/h	483	522
167	mV/h	512	523
168	mV/h	519	523
169	mV/h	522	523
170	mV/h	524	523
171	mV/h	522	523
172	mV/h	513	524
173	mV/h	515	524
174	mV/h	519	524
175	mV/h	523	524
176	mV/h	526	524
177	mV/h	527	524
178	mV/h	527	524
179	mV/h	528	528
180	mV/h	528	529
181	mV/h	528	529
182	mV/h	528	529
183	mV/h	528	530
184	mV/h	528	530

185	mV/h	529	531
186	mV/h	529	531
187	mV/h	529	531
188	mV/h	527	531
189	mV/h	531	531
190	mV/h	535	532
191	mV/h	537	533
192	mV/h	538	533
193	mV/h	540	533
194	mV/h	541	533
195	mV/h	542	533
196	mV/h	540	533
197	mV/h	541	534
198	mV/h	542	534
199	mV/h	544	534
200	mV/h	544	534
201	mV/h	545	535
202	mV/h	546	535
203	mV/h	546	535
204	mV/h	546	535
205	mV/h	546	536
206	mV/h	547	536
207	mV/h	547	536
208	mV/h	547	536
209	mV/h	556	536
210	mV/h	552	537
211	mV/h	553	537

212	mV/h	555	537
213	mV/h	541	537
214	mV/h	529	537
215	mV/h	529	537
216	mV/h	527	770
<hr/>			
TOTAL	mV	106,764	110,396
	V	107	110
<hr/>			

Tabla 35. Voltaje registrado en la CCM2

CCM 2			
N° horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2
1	mV/h	317	384
2	mV/h	372	450
3	mV/h	429	464
4	mV/h	449	472
5	mV/h	461	478
6	mV/h	469	483
7	mV/h	476	489
8	mV/h	482	491
9	mV/h	485	493
10	mV/h	487	493
11	mV/h	490	493
12	mV/h	492	492
13	mV/h	494	493
14	mV/h	496	492

15	mV/h	497	493
16	mV/h	499	493
17	mV/h	500	493
18	mV/h	501	494
19	mV/h	502	494
20	mV/h	503	494
21	mV/h	504	494
22	mV/h	504	494
23	mV/h	504	494
24	mV/h	504	493
25	mV/h	491	490
26	mV/h	438	490
27	mV/h	461	490
28	mV/h	472	492
29	mV/h	479	492
30	mV/h	485	493
31	mV/h	489	493
32	mV/h	492	494
33	mV/h	494	494
34	mV/h	497	494
35	mV/h	499	494
36	mV/h	501	494
37	mV/h	502	494
38	mV/h	503	494
39	mV/h	505	494
40	mV/h	506	494
41	mV/h	507	494

42	mV/h	508	493
43	mV/h	509	493
44	mV/h	509	493
45	mV/h	508	492
46	mV/h	505	491
47	mV/h	504	491
48	mV/h	504	488
49	mV/h	505	485
50	mV/h	507	484
51	mV/h	509	486
52	mV/h	510	487
53	mV/h	512	487
54	mV/h	512	488
55	mV/h	514	500
56	mV/h	516	504
57	mV/h	517	506
58	mV/h	517	508
59	mV/h	518	510
60	mV/h	519	510
61	mV/h	519	509
62	mV/h	519	507
63	mV/h	520	507
64	mV/h	521	505
65	mV/h	521	505
66	mV/h	521	503
67	mV/h	522	504
68	mV/h	522	503

69	mV/h	521	502
70	mV/h	522	501
71	mV/h	521	500
72	mV/h	521	499
73	mV/h	521	499
74	mV/h	521	499
75	mV/h	520	500
76	mV/h	520	502
77	mV/h	521	502
78	mV/h	522	504
79	mV/h	523	508
80	mV/h	523	512
81	mV/h	524	513
82	mV/h	525	494
83	mV/h	524	513
84	mV/h	525	513
85	mV/h	526	514
86	mV/h	526	515
87	mV/h	527	515
88	mV/h	527	515
89	mV/h	528	515
90	mV/h	528	513
91	mV/h	529	514
92	mV/h	529	514
93	mV/h	528	514
94	mV/h	528	512
95	mV/h	516	512

96	mV/h	497	512
97	mV/h	508	511
98	mV/h	509	510
99	mV/h	510	509
100	mV/h	511	511
101	mV/h	512	510
102	mV/h	512	511
103	mV/h	512	513
104	mV/h	512	513
105	mV/h	513	513
106	mV/h	515	513
107	mV/h	516	513
108	mV/h	516	513
109	mV/h	516	514
110	mV/h	516	514
111	mV/h	516	512
112	mV/h	515	513
113	mV/h	515	513
114	mV/h	515	513
115	mV/h	515	513
116	mV/h	515	512
117	mV/h	516	512
118	mV/h	516	450
119	mV/h	516	450
120	mV/h	516	464
121	mV/h	496	472
122	mV/h	498	483

123	mV/h	498	489
124	mV/h	499	491
125	mV/h	500	493
126	mV/h	500	493
127	mV/h	501	493
128	mV/h	502	492
129	mV/h	502	493
130	mV/h	502	492
131	mV/h	503	493
132	mV/h	503	493
133	mV/h	503	492
134	mV/h	504	494
135	mV/h	504	494
136	mV/h	504	494
137	mV/h	503	494
138	mV/h	503	494
139	mV/h	503	494
140	mV/h	503	493
141	mV/h	505	490
142	mV/h	506	490
143	mV/h	506	490
144	mV/h	508	492
145	mV/h	489	492
146	mV/h	489	493
147	mV/h	490	493
148	mV/h	490	494
149	mV/h	490	494

150	mV/h	490	494
151	mV/h	491	494
152	mV/h	491	494
153	mV/h	492	494
154	mV/h	492	494
155	mV/h	492	494
156	mV/h	492	494
157	mV/h	492	493
158	mV/h	492	493
159	mV/h	491	493
160	mV/h	491	492
161	mV/h	491	491
162	mV/h	491	491
163	mV/h	491	485
164	mV/h	492	485
165	mV/h	493	484
166	mV/h	494	486
167	mV/h	494	487
168	mV/h	495	487
169	mV/h	496	488
170	mV/h	495	490
171	mV/h	494	491
172	mV/h	493	491
173	mV/h	493	491
174	mV/h	492	491
175	mV/h	491	492
176	mV/h	491	491

177	mV/h	490	492
178	mV/h	490	491
179	mV/h	490	492
180	mV/h	489	493
181	mV/h	489	491
182	mV/h	488	491
183	mV/h	488	492
184	mV/h	488	491
185	mV/h	487	487
186	mV/h	486	485
187	mV/h	486	485
188	mV/h	488	486
189	mV/h	489	488
190	mV/h	489	488
191	mV/h	489	489
192	mV/h	490	492
193	mV/h	490	487
194	mV/h	490	489
195	mV/h	490	490
196	mV/h	489	490
197	mV/h	489	490
198	mV/h	488	491
199	mV/h	488	490
200	mV/h	488	490
201	mV/h	488	490
202	mV/h	488	490
203	mV/h	489	490

204	mV/h	489	490
205	mV/h	488	490
206	mV/h	488	490
207	mV/h	487	490
208	mV/h	487	490
209	mV/h	487	487
210	mV/h	486	483
211	mV/h	486	481
212	mV/h	487	481
213	mV/h	487	483
214	mV/h	487	485
215	mV/h	488	486
216	mV/h	488	488
TOTAL	mV	107898	106817
	V	108	107

Tabla 36. Voltaje registrado en la CCM3

CCM 3			
N° horas	Unidad de Medida	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	473	456
2	mV/h	476	473
3	mV/h	483	485
4	mV/h	486	498
5	mV/h	486	506
6	mV/h	487	511

7	mV/h	486	515
8	mV/h	485	515
9	mV/h	484	516
10	mV/h	484	516
11	mV/h	483	516
12	mV/h	483	515
13	mV/h	483	514
14	mV/h	484	514
15	mV/h	484	513
16	mV/h	484	512
17	mV/h	484	512
18	mV/h	483	513
19	mV/h	484	514
20	mV/h	485	516
21	mV/h	487	517
22	mV/h	489	518
23	mV/h	491	518
24	mV/h	493	534
25	mV/h	496	534
26	mV/h	499	532
27	mV/h	501	533
28	mV/h	502	533
29	mV/h	502	534
30	mV/h	503	534
31	mV/h	504	534
32	mV/h	505	534
33	mV/h	505	535

34	mV/h	505	534
35	mV/h	505	534
36	mV/h	505	534
37	mV/h	506	534
38	mV/h	506	533
39	mV/h	506	533
40	mV/h	504	533
41	mV/h	502	532
42	mV/h	500	531
43	mV/h	501	530
44	mV/h	503	529
45	mV/h	504	529
46	mV/h	505	529
47	mV/h	506	529
48	mV/h	507	529
49	mV/h	508	529
50	mV/h	508	529
51	mV/h	508	529
52	mV/h	509	529
53	mV/h	509	529
54	mV/h	510	529
55	mV/h	510	528
56	mV/h	510	527
57	mV/h	509	527
58	mV/h	509	526
59	mV/h	509	526
60	mV/h	509	526

61	mV/h	509	525
62	mV/h	508	525
63	mV/h	508	524
64	mV/h	507	523
65	mV/h	502	523
66	mV/h	499	522
67	mV/h	507	521
68	mV/h	511	521
69	mV/h	513	519
70	mV/h	515	519
71	mV/h	516	518
72	mV/h	517	518
73	mV/h	519	518
74	mV/h	520	518
75	mV/h	521	519
76	mV/h	522	521
77	mV/h	522	521
78	mV/h	522	521
79	mV/h	522	521
80	mV/h	523	521
81	mV/h	522	520
82	mV/h	522	520
83	mV/h	521	520
84	mV/h	521	520
85	mV/h	521	520
86	mV/h	521	520
87	mV/h	520	523

88	mV/h	519	523
89	mV/h	518	523
90	mV/h	516	523
91	mV/h	512	522
92	mV/h	510	522
93	mV/h	511	522
94	mV/h	511	521
95	mV/h	512	522
96	mV/h	513	523
97	mV/h	515	523
98	mV/h	515	523
99	mV/h	515	524
100	mV/h	516	523
101	mV/h	515	523
102	mV/h	515	523
103	mV/h	515	523
104	mV/h	515	523
105	mV/h	515	524
106	mV/h	515	524
107	mV/h	514	524
108	mV/h	514	524
109	mV/h	514	524
110	mV/h	514	524
111	mV/h	513	524
112	mV/h	512	523
113	mV/h	510	523
114	mV/h	505	522

115	mV/h	504	521
116	mV/h	504	521
117	mV/h	504	522
118	mV/h	505	522
119	mV/h	506	522
120	mV/h	507	523
121	mV/h	508	523
122	mV/h	509	523
123	mV/h	509	524
124	mV/h	509	524
125	mV/h	510	525
126	mV/h	510	525
127	mV/h	510	525
128	mV/h	510	525
129	mV/h	509	525
130	mV/h	509	525
131	mV/h	509	525
132	mV/h	509	524
133	mV/h	509	524
134	mV/h	509	525
135	mV/h	506	525
136	mV/h	502	525
137	mV/h	500	525
138	mV/h	500	524
139	mV/h	502	524
140	mV/h	503	525
141	mV/h	504	525

142	mV/h	505	525
143	mV/h	506	525
144	mV/h	506	525
145	mV/h	507	526
146	mV/h	508	526
147	mV/h	508	527
148	mV/h	509	527
149	mV/h	509	527
150	mV/h	510	527
151	mV/h	510	527
152	mV/h	510	527
153	mV/h	510	526
154	mV/h	510	526
155	mV/h	510	525
156	mV/h	510	525
157	mV/h	510	525
158	mV/h	510	525
159	mV/h	509	525
160	mV/h	507	524
161	mV/h	505	524
162	mV/h	505	524
163	mV/h	506	525
164	mV/h	506	525
165	mV/h	507	525
166	mV/h	502	525
167	mV/h	502	525
168	mV/h	509	525

169	mV/h	512	525
170	mV/h	514	525
171	mV/h	516	526
172	mV/h	517	526
173	mV/h	518	526
174	mV/h	519	526
175	mV/h	521	526
176	mV/h	522	526
177	mV/h	522	526
178	mV/h	522	526
179	mV/h	522	525
180	mV/h	523	525
181	mV/h	522	525
182	mV/h	522	525
183	mV/h	522	525
184	mV/h	522	525
185	mV/h	521	525
186	mV/h	521	525
187	mV/h	521	526
188	mV/h	520	526
189	mV/h	519	526
190	mV/h	517	525
191	mV/h	515	525
192	mV/h	511	525
193	mV/h	510	525
194	mV/h	510	526
195	mV/h	512	526

196	mV/h	512	526
197	mV/h	513	527
198	mV/h	514	527
199	mV/h	515	527
200	mV/h	515	527
201	mV/h	516	527
202	mV/h	515	527
203	mV/h	515	526
204	mV/h	515	526
205	mV/h	515	526
206	mV/h	515	526
207	mV/h	515	526
208	mV/h	514	526
209	mV/h	514	526
210	mV/h	514	526
211	mV/h	514	526
212	mV/h	513	526
213	mV/h	512	527
214	mV/h	508	527
215	mV/h	504	526
216	mV/h	504	526
TOTAL	mV	109765	113077
	V	110	113

Tabla 37. Voltaje registrado en la CCM4

CCM 4

N° horas	Unidad de Medida	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	217	444
2	mV/h	229	445
3	mV/h	264	450
4	mV/h	297	453
5	mV/h	313	453
6	mV/h	333	454
7	mV/h	360	454
8	mV/h	372	455
9	mV/h	383	456
10	mV/h	386	456
11	mV/h	388	458
12	mV/h	394	458
13	mV/h	399	459
14	mV/h	405	460
15	mV/h	412	460
16	mV/h	429	460
17	mV/h	446	461
18	mV/h	452	461
19	mV/h	454	461
20	mV/h	455	461
21	mV/h	458	462
22	mV/h	461	462
23	mV/h	461	462
24	mV/h	460	462
25	mV/h	459	462

26	mV/h	458	463
27	mV/h	458	463
28	mV/h	457	463
29	mV/h	457	464
30	mV/h	457	464
31	mV/h	457	465
32	mV/h	457	465
33	mV/h	457	465
34	mV/h	457	465
35	mV/h	457	466
36	mV/h	457	466
37	mV/h	457	466
38	mV/h	455	466
39	mV/h	454	467
40	mV/h	453	467
41	mV/h	452	468
42	mV/h	452	468
43	mV/h	452	468
44	mV/h	452	468
45	mV/h	454	468
46	mV/h	455	469
47	mV/h	456	469
48	mV/h	457	469
49	mV/h	457	469
50	mV/h	457	470
51	mV/h	458	470
52	mV/h	458	470

53	mV/h	458	470
54	mV/h	458	470
55	mV/h	458	470
56	mV/h	458	471
57	mV/h	458	471
58	mV/h	458	471
59	mV/h	457	471
60	mV/h	457	471
61	mV/h	456	471
62	mV/h	453	471
63	mV/h	451	471
64	mV/h	451	472
65	mV/h	451	472
66	mV/h	451	472
67	mV/h	451	472
68	mV/h	451	473
69	mV/h	454	474
70	mV/h	456	474
71	mV/h	457	474
72	mV/h	457	475
73	mV/h	458	475
74	mV/h	458	475
75	mV/h	458	476
76	mV/h	459	476
77	mV/h	459	476
78	mV/h	459	477
79	mV/h	459	478

80	mV/h	459	478
81	mV/h	459	479
82	mV/h	459	480
83	mV/h	459	480
84	mV/h	455	483
85	mV/h	455	486
86	mV/h	453	488
87	mV/h	453	488
88	mV/h	454	489
89	mV/h	455	490
90	mV/h	455	490
91	mV/h	455	492
92	mV/h	455	495
93	mV/h	456	495
94	mV/h	458	496
95	mV/h	458	497
96	mV/h	462	497
97	mV/h	462	498
98	mV/h	463	498
99	mV/h	464	498
100	mV/h	464	498
101	mV/h	464	499
102	mV/h	464	499
103	mV/h	465	499
104	mV/h	465	500
105	mV/h	465	500
106	mV/h	465	500

107	mV/h	465	500
108	mV/h	465	501
109	mV/h	465	501
110	mV/h	464	502
111	mV/h	463	503
112	mV/h	465	503
113	mV/h	465	503
114	mV/h	465	504
115	mV/h	465	504
116	mV/h	464	504
117	mV/h	464	504
118	mV/h	464	504
119	mV/h	465	504
120	mV/h	468	504
121	mV/h	469	504
122	mV/h	469	504
123	mV/h	470	505
124	mV/h	470	505
125	mV/h	471	505
126	mV/h	471	505
127	mV/h	471	506
128	mV/h	471	506
129	mV/h	472	506
130	mV/h	472	506
131	mV/h	472	506
132	mV/h	472	506
133	mV/h	471	506

134	mV/h	470	506
135	mV/h	468	507
136	mV/h	469	507
137	mV/h	470	507
138	mV/h	470	507
139	mV/h	471	507
140	mV/h	471	508
141	mV/h	472	508
142	mV/h	474	509
143	mV/h	476	509
144	mV/h	476	509
145	mV/h	477	509
146	mV/h	478	510
147	mV/h	478	510
148	mV/h	479	510
149	mV/h	479	511
150	mV/h	480	512
151	mV/h	480	512
152	mV/h	481	514
153	mV/h	481	514
154	mV/h	481	516
155	mV/h	482	516
156	mV/h	482	517
157	mV/h	481	517
158	mV/h	480	518
159	mV/h	481	518
160	mV/h	481	519

161	mV/h	481	520
162	mV/h	482	521
163	mV/h	482	521
164	mV/h	482	522
165	mV/h	482	522
166	mV/h	482	522
167	mV/h	482	523
168	mV/h	482	523
169	mV/h	482	523
170	mV/h	482	524
171	mV/h	482	524
172	mV/h	482	524
173	mV/h	482	524
174	mV/h	482	525
175	mV/h	482	525
176	mV/h	482	525
177	mV/h	482	525
178	mV/h	482	526
179	mV/h	482	528
180	mV/h	482	529
181	mV/h	482	530
182	mV/h	483	531
183	mV/h	483	533
184	mV/h	483	534
185	mV/h	482	535
186	mV/h	482	536
187	mV/h	482	536

188	mV/h	483	537
189	mV/h	488	538
190	mV/h	491	539
191	mV/h	492	540
192	mV/h	496	540
193	mV/h	496	540
194	mV/h	495	540
195	mV/h	493	540
196	mV/h	493	540
197	mV/h	492	540
198	mV/h	492	540
199	mV/h	492	541
200	mV/h	492	541
201	mV/h	492	541
202	mV/h	493	542
203	mV/h	494	544
204	mV/h	494	547
205	mV/h	494	549
206	mV/h	496	551
207	mV/h	496	551
208	mV/h	496	553
209	mV/h	496	555
210	mV/h	496	555
211	mV/h	498	557
212	mV/h	498	558
213	mV/h	498	558
214	mV/h	498	559

215	mV/h	490	560	
216	mV/h	497	560	
TOTAL		mV	99536	107554
		V	100	108

6.5. Anexo III – Análisis de laboratorio de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)

6.5.1. Análisis de laboratorio de DQO y DBO5 Pre tratamiento para la réplica 1




LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1909106

<p>Cliente: YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA Domicilio legal: Nafia, Llangancho Chovica - Lima - Lima. Producto: Agua Residual Referencia del cliente: Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima" Procedencia de las muestras: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Industria de Productos Unión - Nafia, Llangancho - Lima - Lima. Referencia del plan de muestreo: No Aplica Procedimiento de muestreo: No Aplica Fecha de recepción de las muestras: 2019/09/18 Fecha de inicio del ensayo: 2019/09/18 Fecha de término del ensayo: 2019/09/24</p>	<p>Código de Laboratorio: 1909106-1 Estación de Muestreo: MCI-IPS-ARI Fecha de Muestreo: 2019/09/18 Hora: 10:15 Tipo de muestra: Agua Residual Industrial</p>
---	--

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Biológica de Oxígeno	2	2	775	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:
Demanda Biológica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 25th Ed. 2017, 5-Day BOD Test

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada. Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas.
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno.
- Las muestras se cuantificarán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o errata física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración: "Suplemento al Informe de Ensayo".
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su sociedad.

Lima, 25 de setiembre del 2019.



DELTA LAB S.A.C.
EDSON CASTELLANOS OSORIO
JEFE DEL LABORATORIO DE ENFERMEDADES



DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALES TORRES
SUB GERENTE DE LA CALIDAD
CIP N° 209612

INFORME DE ENSAYO N° 1909129

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
 Domicilio legal : Naña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual
 Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental- UPEU- Celdas de Combustible Microbiano, Naña, Lurigancho - Lima- Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
 Procedimiento de muestreo : No Aplica.
 Fecha de recepción de las muestras : 2019/09/28
 Fecha de inicio del ensayo : 2019/09/28
 Fecha de término del ensayo : 2019/10/04

Código de Laboratorio: 1909129-1 Estación de Muestras: LAB-UPEU-CCM01 Fecha de Muestra: 2019/09/27
 Hora: 13:50
 Tipo de muestra: Agua Residual Industrial

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	1 694	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	—	50	3 378	mg/L

Código de Laboratorio: 1909129-2 Estación de Muestras: LAB-UPEU-CCM2 Fecha de Muestra: 2019/09/27
 Hora: 14:07
 Tipo de muestra: Agua Residual Industrial

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	1 674	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	—	50	3 528	mg/L

Código de Laboratorio: 1909129-3 Estación de Muestras: LAB-UPEU-CCM3 Fecha de Muestra: 2019/09/27
 Hora: 14:20
 Tipo de muestra: Agua Residual Industrial

Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	1 634	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	—	50	3 433	mg/L

6.5.2. Análisis de laboratorio de DQO y DBO5 Pre tratamiento para la réplica 2

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-077

Registro N° LE - 077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1910005

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
 Domicilio legal : Naña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual
 Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Industria de Productos Unión - Naña, Lurigancho – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
 Procedimiento de muestreo : No Aplica.
 Fecha de recepción de las muestras : 2019/10/01
 Fecha de inicio del ensayo : 2019/10/01
 Fecha de término del ensayo : 2019/10/09

Código de Laboratorio: 1910005-1	Estación de Muestreo: IPU-MG2	Fecha de Muestreo: 2019/10/01 Hora: 10:30			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	1 344	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	—	50	2 833	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:
 Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 23rd Ed. 2017. 5-Day BOD Test.
 Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017. Chemical Oxygen Demand - Closed Reflux, Colorimetric Method.

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada: Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas.
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno.
- Las muestras se mantendrán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o emienda física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración "Suplemento al informe de Ensayo"
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su solicitud.

Lima, 10 de octubre del 2019.


DELTA LAB S.A.C.
 EDSON CASTANEDA OSORIO
 JEFE DE LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA


DELTA LAB S.A.C.
 RAQUEL ROSALES TORRES
 SUB GERENTE DE LA CALIDAD
 CIP N° 209612

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.

6.5.3. Análisis de laboratorio de DQO y DBO5 post tratamiento para la réplica 1



Registro N° LE - 077

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-077

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1910115

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
 Domicilio legal : Naña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual
 Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental- UPEU- Celdas de Combustible Microbiano, Naña, Lurigancho - Lima- Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
 Procedimiento de muestreo : No Aplica.
 Fecha de recepción de las muestras : 2019/10/25
 Fecha de inicio del ensayo : 2019/10/25
 Fecha de término del ensayo : 2019/11/04

Código de Laboratorio: 1910115-1	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM1	Fecha de Muestreo: 2019/10/24 Hora: 15:42			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	445	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	793	mg/L

Código de Laboratorio: 1910115-2	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM2	Fecha de Muestreo: 2019/10/24 Hora: 16:01			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	594	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	980	mg/L

Código de Laboratorio: 1910115-3	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM3	Fecha de Muestreo: 2019/10/24 Hora: 16:07			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	415	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	627	mg/L

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
 Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

INFORME DE ENSAYO N° 1910115

Código de Laboratorio: 1910115-4		Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM4		Fecha de Muestreo: 2019/10/24 Hora: 16:30	
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	460	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	896	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:
 Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 23rd Ed. 2017. 5-Day BOD Test.
 Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017. Chemical Oxygen Demand - Closed Reflux, Colorimetric Method.

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada: Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas.
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno.
- Las muestras se mantendrán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o enmienda física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración "Suplemento al informe de Ensayo"
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su solicitud.

Lima, 04 de noviembre del 2019.



DELTA LAB S.A.C.
EDSON CASTANEDA OSORIO
JEFE DE LABORATORIO DE FISICOQUIMICA



DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALES TORRES
SUB GERENTE DE LA CALIDAD
CIP N° 209612

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1910115

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
 Domicilio legal : Naña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual
 Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental- UPEU- Celdas de Combustible Microbiano, Naña, Lurigancho - Lima- Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
 Procedimiento de muestreo : No Aplica.
 Fecha de recepción de las muestras : 2019/10/25

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO

Estación	Hora	Fecha	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)
			ESTE	NORTE	
LAB-UPeU-CCM1	15:42	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM2	16:01	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM3	16:07	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM4	16:30	2019/10/10	0299496	8674057	---

Lima, 04 de noviembre del 2019.



Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
 Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
 Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

6.5.4. Análisis de laboratorio de DQO y DBO5 Post tratamiento para la réplica 2



Registro N° LE - 077

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-077

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1910042

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
Domicilio legal : Ñaña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
Producto : Agua Residual
Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental- UPEU- Celdas de Combustible Microbiano, Ñaña, Lurigancho - Lima- Lima.
Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
Procedimiento de muestreo : No Aplica.
Fecha de recepción de las muestras : 2019/10/11
Fecha de inicio del ensayo : 2019/10/11
Fecha de término del ensayo : 2019/10/17

Código de Laboratorio: 1910042-1	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM1	Fecha de Muestreo: 2019/10/10 Hora: 11:50			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	453	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	780	mg/L

Código de Laboratorio: 1910042-2	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM2	Fecha de Muestreo: 2019/10/10 Hora: 12:16			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	579	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	997	mg/L

Código de Laboratorio: 1910042-3	Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM3	Fecha de Muestreo: 2019/10/10 Hora: 12:23			
Tipo de muestra: Agua Residual Industrial					
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	408	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	615	mg/L

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

INFORME DE ENSAYO N° 1910042

Código de Laboratorio: 1910042-4		Estación de Muestreo: LAB-UPeU-CCM4		Fecha de Muestreo: 2019/10/10	
				Hora: 12:32	
				Tipo de muestra: Agua Residual Industrial	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	490	mg/L
APHA 5220 D	Demanda Química de Oxígeno	---	50	885	mg/L

Ensayo:	Descripción del Método de Referencia:
Demanda Bioquímica de Oxígeno:	SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 23rd Ed. 2017. 5-Day BOD Test.
Demanda Química de Oxígeno:	SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017. Chemical Oxygen Demand - Closed Reflux, Colorimetric Method.

Notas:

- Condición y estado de la muestra ensayada: Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas.
- Las muestras llegaron en frascos de polietileno.
- Las muestras se mantendrán por un periodo de 10 días luego entregado el informe de ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- Toda corrección o enmienda física al presente informe de ensayo será emitido con la Declaración "Suplemento al informe de Ensayo"
- Estos resultados no deben ser utilizados como certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Resultados por debajo del límite de cuantificación del método son referenciales.
- El informe de control de calidad le será proporcionado a su solicitud.

Lima, 17 de octubre del 2019.

DELTA LAB S.A.C.

EDSON CASTANEDA OSORIO
 JEFE DE LABORATORIO DE FISCOQUIMICA

DELTA LAB S.A.C.

RAQUEL ROSALES TORRES
 SUB GERENTE DE LA CALIDAD
 CIP N° 209612

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
 Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
 Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1910042

Cliente : YANET VIVIANA ALVAREZ BAUTISTA
 Domicilio legal : Naña, Lurigancho Chosica – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual
 Referencia del cliente : Proyecto "Generación de Bioelectricidad y Biodegradación de la materia orgánica en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) con Agua Residual Industrial - Lima"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental- UPEU- Celdas de Combustible Microbiano, Naña, Lurigancho - Lima- Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica.
 Procedimiento de muestreo : No Aplica.
 Fecha de recepción de las muestras : 2019/10/11

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO

Estación	Hora	Fecha	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)
			ESTE	NORTE	
LAB-UPeU-CCM1	11:50	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM2	12:16	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM3	12:23	2019/10/10	0299496	8674057	---
LAB-UPeU-CCM4	12:32	2019/10/10	0299496	8674057	---

Lima, 17 de octubre del 2019.


DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALES TORRES
 SUB GERENTE DE LA CALIDAD
 CIP N° 209612

Este informe no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la autorización de DELTA LAB S.A.C.
 Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

Av. Carretera Central Km. 9.3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
 Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

