UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

(Creada por Ley Nro. 25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

TESIS

"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA"

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

TECNOLOGÍA SANITARIA Y RECURSOS NATURALES RENOVABLES

PRESENTADO POR:

Bach. BRAULIO CCORA REPUELLO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

HUANCAVELICA, PERÚ
2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditórium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 26 días del mes de setiembre del año 2019, a horas 12:00 m., se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los siguientes: **M.Sc. Jorge Luis HUERE PEÑA (PRESIDENTE), M.Sc. Pedro Antonio PALOMINO PASTRANA (SECRETARIO), M.Sc. Fernando Martín TORIBIO ROMÁN (VOCAL),** designados con Resolución de Decano Nº 024-2019-FCI-UNH, de fecha 02 de abril del 2019 y ratificados con Resolución de Decano N° 168-2019-FCI-UNH de fecha 25 de setiembre del 2019, a fin de proceder con la calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA", presentado por el Bachiller **Braulio CCORA REPUELLO**, para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitaria**; en presencia del **M.Sc. Víctor Guillermo SÁNCHEZ ARAUJO**, como Asesor del presente trabajo de tesis. Finalizado la evaluación a horas 1.2.50 p.m. se invitó al público presente y al sustentante abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los Jurados, se llegó al siguiente resultado:

APROBADO ☒ POR... UNANIMIDAD.

DESAPROBADO ☐

En señal de conformidad, firmamos a continuación:

Presidente

Secretario

Vocal

V° B° Decano

TITULO:

"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA"

AUTOR:

Bach. CCORA REPUELLO, BRAULIO

ASESOR:

M.Sc. SÁNCHEZ ARAUJO, VÍCTOR GUILLERMO.

Dedicatoria

Principalmente a Dios por ser mi protector y bendecirme con mi familia y amigos. A mi padre por su sacrificio y motivación para superar todos los desafíos. A mi madre por su afecto y dedicación en el proceso de convertirme en un Ingeniero Ambiental y Sanitario. A mi hermano mayor por ser un ejemplo y guía que me alienta a ser mejor persona y profesional. Y a toda mi familia por su linda compañía en todo momento.

Agradecimiento.

A Dios por haberme protegido y guiado durante la realización de mi carrera profesional, por haberme permitido vivir maravillosas experiencias, por ser mi auxilio y fortaleza en todo momento.

A mis padres José Ccora De La Cruz y Cludolfina Repuello Giráldez por haber puesto todo su sacrificio, dedicación y esfuerzo en todo momento de mi vida hasta verme culminar mi carrera profesional.

A mis asesores, el Magister Víctor Sánchez Araujo y el Ingeniero Julio Daniel Enríquez Quispe por su orientación.

A los que colaboraron con la toma de datos: Luis Antonio, Orlando, Faustino y Virgilio quienes me apoyaron durante gran parte de la ejecución del proyecto.

A mi universidad por brindarme la oportunidad de disfrutar de su espacio de trabajo y recreación, por permitirme formarme como profesional y como ser humano con visión integral de progreso para la sociedad.

A todos mis docentes, familiares, amigos y compañeros por su apoyo incondicional y compañía en gratos momentos.

Índice

Índice.....vii
Índice de glosarios..... viii
Índice de figuras.....ix
Índice de tablas.....x
Índice de apéndices.....xi
Resumen.....xii
Abstract..... xiii
Introducción.....xiv
CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....1
1.1. Descripción del problema...... 1
1.2. Formulación del problema...... 4
1.3. Objetivos...... 4
1.4. Justificación...... 5
1.5. Limitaciones...... 5
CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO.....7
2.1. Antecedentes...... 7
2.2. Bases teóricas sobre el tema de investigación...... 13
2.3. Bases conceptuales...... 15
2.4. Definición de términos...... 32
2.5. Hipótesis...... 35
2.6. Variables...... 35
2.7. Operacionalización de variables...... 36
CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....37
3.1. Ámbito temporal y espacial...... 37
3.2. Tipo de investigación...... 40
3.3. Nivel de investigación...... 40
3.4. Población, muestra y muestreo...... 40
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos...... 41
3.6. Técnicas y procesamiento de análisis de datos...... 58
CAPÍTULO IV
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....60
4.1. Análisis de información...... 60
4.2. Prueba de hipótesis...... 76
4.3. Discusión de resultados...... 102
Conclusiones.....106
Recomendaciones.....107
Referencias bibliográficas.....108
Apéndice.....112

Índice de glosarios

ANOVA: análisis de varianza.

ATP: adenosín trifosfato.

CM: campo magnético.

COD: acrónimo en inglés de *chemical oxygen demand* que significa demanda química de oxígeno.

DCA: diseño completamente al azar.

DQO: demanda química de oxígeno.

EMAPA: empresa municipal de agua potable y alcantarillado.

EPS: empresa prestadora de servicios de saneamiento.

HSD de Tukey: *honestly significant difference* de Tukey.

KWh: kilowatts por hora, representa el consumo eléctrico.

MFC: acrónimo en inglés de *microbial fuel cell* que significa celda de combustible microbiana.

MFCs: celdas de combustible microbiana, en plural.

MIP o PEM: membrana de intercambio protónico.

MO: materia orgánica.

mT: mili Tesla, es la unidad de inducción magnética.

m^3/s: metros cúbicos por segundo, representa el caudal.

NASA: administración nacional de la aeronáutica y del espacio.

pH: potencial de hidrógeno.

PTAP: planta de tratamiento de agua potable.

PTAR: planta de tratamiento de agua residual.

REDOX: reacción de oxidación - reducción

SAS: s*tatistical analysis system*, paquete estadístico.

W/m^2: watts por metro cuadrado, representa la potencia por área,

Ω: símbolo de ohmio, representa la resistencia.

Índice de figuras

Figura 1. *Modelo atómico de Bohr.* 13
Figura 2. *Mecanismos de transferencia de electrones.* 14
Figura 3. *Esquema básico de una celda de combustible microbiano.* 24
Figura 4. *Celda de combustible microbiano de dos cámaras (tipo H).* 27
Figura 5. *Celda de combustible microbiano de una cámara.* 27
Figura 6. *Celda de combustible microbiano de flujo ascendente.* 28
Figura 7*. Mecanismo de generación de protones y transferencia de electrones.* 30
Figura 8. *Curva de crecimiento bacteriano.* 31
Figura 9. *Ubicación geográfica de la zona para pruebas experimentales.* 39
Figura 10. *Ubicación geográfica de la zona para tomar muestras.* 39
Figura 11. *Separación de la variación total en sus componentes en un DCA.* 43
Figura 12. *Diseño de los componentes de la MFC.* 47
Figura 13. *Construcción de los componentes de la MFC.* 48
Figura 14. *Componentes de la cámara catódica.* 48
Figura 15. *Componentes de la cámara anódica.* 49
Figura 16. *Componentes del puente de intercambio de protones.* 49
Figura 17. *Componentes del circuito eléctrico externo.* 50
Figura 18*. Esterilización de las cámaras anódicas y catódicas.* 50
Figura 19. *Activación de la membrana Nafion 117.* 51
Figura 20. *Prueba hidráulica de las cámaras.* 52
Figura 21. *Esterilización de los electrodos y conductores.* 53
Figura 22. *Recolección del inóculo microbiano.* 54
Figura 23. *Recolección del sustrato.* 54
Figura 24. *Inicio del periodo de aclimatación.* 55
Figura 25. *Celdas inoculadas con lodo activo de PTAP.* 56
Figura 26. *Conductores de aluminio oxidados y rotos.* 57
Figura 27. *Error al adquirir datos con sensor de voltaje y amperaje.* 57
Figura 28. *Deformación de las cámaras por someter a excesivo calor.* 58
Figura 29. *Tratamientos usados en los experimentos.* 58
Figura 30. *Resultados del voltaje en la semana 01 de las MFCs.* 61
Figura 31. *Resultados del voltaje en la semana 02 de las MFCs.* 62
Figura 32. *Resultados del voltaje en la semana 03 de las MFCs.* 63
Figura 33. *Resultados del voltaje en la semana 04 de las MFCs.* 64
Figura 34. *Resultados del voltaje en las 03 MFCs.* 65
Figura 35. *Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 01 de las MFCs.* 68
Figura 36. *Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 02 de las MFCs.* 69
Figura 37. *Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 03 de las MFCs.* 71
Figura 38. *Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 04 de las MFCs.* 72
Figura 39. *Resultados de eficiencia de remoción de DQO en las 03 MFCs.* 74
Figura 40. *Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 01.* 79
Figura 41. *Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 02.* 80
Figura 42. *Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 03.* 81
Figura 43. *Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 04.* 82
Figura 44. *Valores críticos para aceptar o rechazar la hipótesis nula del voltaje.* 83
Figura 45. *Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 01.* 91
Figura 46. *Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 02.* 92

Figura 47. *Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 03..... 93*
Figura 48. *Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 04..... 94*
Figura 49. *Valores críticos para aceptar o rechazar la hipótesis nula de la eficiencia de remoción de DQO..... 96*

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables..... *36*
Tabla 2 Cronograma de actividades..... *38*
Tabla 3 Resultados de laboratorio de la caracterización del agua residual..... *53*
Tabla 4 Voltaje en la semana 01 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)..... *60*
Tabla 5 Voltaje en la semana 02 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)..... *61*
Tabla 6 *Voltaje en la semana 03 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)*..... *62*
Tabla 7 Voltaje en la semana 04 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)..... *63*
Tabla 8 Voltaje en las 03 Celdas de Combustible Microbiano (MFCs) *64*
Tabla 9 *DQO* en la semana 01 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)..... *67*
Tabla 10 *DQO* en la semana 02 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)..... *69*
Tabla 11 *DQO* en la semana 03 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)..... *70*
Tabla 12 *DQO* en la semana 04 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)..... *72*
Tabla 13 Eficiencia de remoción de DQO en las 03 Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)..... *73*
Tabla 14 Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 01..... *76*
Tabla 15 Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 02..... *77*
Tabla 16 Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 03..... *77*
Tabla 17 Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 04..... *78*
Tabla 18 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 01 .. *78*
Tabla 19 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 02 .. *79*
Tabla 20 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 03 .. *80*
Tabla 21 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 04 .. *81*
Tabla 22 Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 01 ..... *83*
Tabla 23 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - Semana 01 ..... *84*
Tabla 24 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 01 ..... *84*
Tabla 25 Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 02 ..... *85*
Tabla 26 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - Semana 02 ..... *85*
Tabla 27 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 02 ..... *85*
Tabla 28 Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 03 ..... *86*
Tabla 29 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - semana 03 ..... *86*
Tabla 30 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 03 ..... *86*
Tabla 31 Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 04 ..... *87*
Tabla 32 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - semana 04 ..... *87*
Tabla 33 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 04 ..... *87*
Tabla 34 Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 01..... *89*
Tabla 35 Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 02..... *89*
Tabla 36 Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 03..... *90*
Tabla 37 Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 04..... *90*
Tabla 38 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs *91*

Tabla 39 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 02 ..... *92*
Tabla 40 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 03 ..... *93*
Tabla 41 Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 04 ..... *94*
Tabla 42 Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 01 ..... *96*
Tabla 43 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 01 ..... *97*
Tabla 44 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 01 ..... *97*
Tabla 45 Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 02 ..... *97*
Tabla 46 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 02 ..... *98*
Tabla 47 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 02 ..... *98*
Tabla 48 Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 03 ..... *99*
Tabla 49 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 03 ..... *99*
Tabla 50 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 03 ..... *99*
Tabla 51 Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 04 ..... *100*
Tabla 52 Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 04 ..... *100*
Tabla 53 Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 04 ..... *100*

Índice de apéndices

Apéndice 1. *Esquema del procedimiento de construcción del prototipo de la MFC a detalle.* *112*
Apéndice 2. *Certificado de calibración.* *114*
Apéndice 3. *Reporte de análisis de laboratorio "RCJ LABS UNIVERSAL".* *115*
Apéndice 4. *Tabla de registro de datos de todos los parámetros en el laboratorio de la UNH.* *116*
Apéndice 5. *DATA BASE Análisis estadístico de voltaje por semanas.* *120*
Apéndice 6. *DATA BASE Análisis estadístico de eficiencia de remoción de DQO por semanas.* *122*
Apéndice 7. *Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda* *124*
Apéndice 8. *Evidencia fotográfica.* *129*
Apéndice 9. *Certificado de originalidad (UNICHECK).* *133*
Apéndice 10. *Matriz de consistencia.* *134*

Resumen

En la presente tesis se estudió a la celda de combustible microbiana (MFC acrónimo en inglés de *Microbial Fuel Cell*) como un sistema bioelectroquímico que emplea el metabolismo de las bacterias para generar electricidad, además de tratar el agua residual. El objetivo general del estudio fue evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando MFCs en la ciudad de Huancavelica. El procedimiento para la recolección de datos se realizó en dos etapas; en la primera etapa de aclimatación; se construyó y probó el prototipo de MFC, se recolectó el inóculo bacteriano y el sustrato, se caracterizó el agua residual y se instaló el sistema para su aclimatación; en la segunda etapa de pre-prueba; se identificaron las dificultades durante la operación del sistema, se analizaron y corrigieron. La población fue el caudal de las aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica administradas por la EPS EMAPA-Huancavelica que es igual a 20 m^3/s, y la muestra se tomó 01 L/mes (periodo de muestreo) suficiente para el análisis a escala laboratorio. Los mayores resultados presentaron: la celda N° 02 un voltaje promedio de 521.24 mV en la primera semana; mientras que, la celda N° 02 y 03 eficiencias de remoción de DQO promedios de 44.75% y 39.95%, respectivamente, en a la primera semana. Finalmente, se concluye que se logró generar más de 500 mV en al menos una celda (celda N° 02, semana 01).

Palabras clave: Tratamiento de agua residual, agua residual municipal, generación de energía eléctrica, celda de combustible microbiana, MFC.

Abstract

In the currently thesis, the microbial fuel cell had been studied as a system biolectrochemical (MFC) that employs the metabolism of the bacteria to generate electricity; furthermore, the treatment of wastewater. The general objective of this study was to evaluated the electric power generation potential and the wastewater treatment efficient of the municipality using MFC in Huancavelica city. The procedure for data collection was performed in were two stages; the first stage was the acclimatization; I built and tried the prototype of MFC, bacterial inoculum and substrate were collected; where an MFC prototype was built and tried; Also, bacterial inoculum and substrate were collected, Besides, I identified the properties of wastewater, after installing an acclimatization system. In the second stage called pre-taste, difficulties were identified during the system operation, which were also corrected and analyzed. My data base is the flow of the municipality´s wastewater managed by EMAPA-Huancavelica service provider which is equal to 20 m^3/s, and the sample, I took 01 L/month (period for analyze) enough to small scale. The greater results showed: an average voltage of 571 mV in the cell number 2 the first week. On another hand, the average efficiencies of removal of COD were 44.75% and 39.95% in the cell number 2 and 3 in the first week. Finally, to conclude, I reached to generate more than 500 mV at least in one cell (cell number 2, weak 01).

Key words: Wastewater treatment, municipal wastewater, electric power generation, microbial fuel cell, MFC.

Introducción

El escaso suministro de energía eléctricas principalmente en zonas rurales, el alto grado de contaminación de los combustibles fósiles en la generación de electricidad y la inadecuada disposición final de las aguas residuales municipales se han convertido en un problema de gran impacto ambiental. Por tal motivo, han surgido varios métodos para mitigarlos, los cuales requieren de alta tecnología y son de alto costo; Sin embargo, en la presente tesis se ha propuesto realizar celdas de combustible microbianas (MFC); que según Logan (2007) son dispositivos en los que las bacterias generan energía eléctrica mediante la oxidación de compuestos simples como la glucosa o complejas como la materia orgánica de las aguas residuales, representando un enfoque nuevo y promete solucionar los problemas planteados.

En el capítulo I se aborda el Planteamiento del problema, el cual, describe dos problemas críticos de carácter ambiental, debido a la generación de energía eléctricas y al tratamiento de las aguas residuales municipales. En este capítulo también se establecen los objetivos de la tesis los cuales son evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando MFC en la ciudad de Huancavelica, se argumenta la justificación como un potencial beneficio en la generación de electricidad a partir del tratamiento de contaminantes y también se analiza las limitaciones en el control de variables, selección de muestras e instrumentos utilizados para la recolección de datos.

En el capítulo II, Marco teórico, se describen los antecedentes en los cuales se fundamenta esta tesis; con apoyo bibliográfico se redactan las bases teóricas sobre el tema de investigación, las bases conceptuales y la definición de términos. Una vez definidas las variables independientes y dependientes se plantea la hipótesis, el cual establece que el potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70 % utilizando MFC en la ciudad de Huancavelica. Con las variables planteadas se construye una matriz de operacionalización de variables.

En el capítulo III, Metodología de la investigación, se describe el ámbito temporal y espacial del estudio, el tipo de investigación aplicada y el nivel explicativo; considerando como población el caudal de las aguas residuales municipales generadas por la ciudad de Huancavelica que es igual a 20 m^3/s, administradas por la EPS EMAPA-Huancavelica y como muestra 01 L/mes. Además, se especifica que se utilizó la experimentación y observación como técnica de recolección de datos, los instrumentos de recolección de datos fueron: multímetro, multiparametro y colorímetro, con los cuales se registraron los datos experimentales por cada celda y por semana; y también se describen los procedimientos para la recolección de datos (construcción y operación de las celdas). Por último, se describe que se utilizó un diseño para comparar tres tratamientos (celdas N° 01, 02 y 03) siendo el diseño completamente al azar (DCA) el más representativo; las técnicas de procesamiento de datos fueron los softwares estadísticos de SAS y Microsoft Excel 2016; y el procesamiento de datos se realizaron utilizando la prueba de análisis de varianza de ANOVA y la prueba de Tukey.

En el capítulo IV, Presentación de resultados, se muestra el análisis de la información mediante el uso de gráficas estadísticas con sus respectivas interpretaciones y la prueba de hipótesis por variable de los resultados obtenidos. Se discute e interpretan los resultados con los antecedentes propuestos, analizando la relación de los resultados hallados en las otras investigaciones citadas. Finalmente, se describen las conclusiones sustentadas en los resultados hallados acorde a los objetivos planteados y las recomendaciones sugiriendo nuevas vías para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema.

Dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual son: la crisis energética y la contaminación hídrica (Revelo, Hurtado, y Ruiz, 2013). La población actual consume 114 x 10^{12} KWh de energía cada año, esto es equivalente a la energía que contiene 90 x 10^{12} m^3 de petróleo, la humanidad es adicta a la energía, de forma que representa un recurso irreemplazable (Gonzáles, 2015). Esta creciente demanda ha provocado serios problemas de contaminación ambiental y calentamiento global de la Tierra (Falcón, Lozano, y Juárez, 2009), que trae como consecuencia el cambio climático (Gonzáles, 2015). Sin embargo, aún no se cuenta con la tecnología para dejar de depender de los combustibles fósiles como principales fuentes de energía (Falcón et al., 2009).

En el Perú, la demanda energética está creciendo 7.4 % por año, para el año 2015 se tuvo un consumo nacional de 42300 Millones de KWh, la demanda actual es suministrada por las fuentes de energía termoeléctrica e hidroeléctrica; si bien es cierto esta última es un recurso renovable, siendo el de mayor generación el complejo del Mantaro con capacidad de 7049 Millones de KWh, generando aproximadamente el 16.66 % del suministro total del Perú (Osinerming, 2016). El resto de la población

(más del 50 %) utiliza petróleo, gas natural y carbón en plantas termoeléctricas (Llontop, 2018). Mientas que según el Censo del 2017, cerca de un millón de viviendas (948 110) no disponen de alumbrado eléctrico, en cifras relativas, el 12.3 % de las viviendas no dispone de este servicio (INEI, 2018), encontrándose la mayor parte en el ámbito rural.

Según departamentos, en cobertura de energía eléctrica destaca el Callao (98.3%) y Lima (95.3%); mientras que 7 departamentos presentan menos del 80 % de viviendas que disponen de este servicio, entre ellos Huancavelica (77.5%) (INEI, 2018). La electrificación rural en el Perú presenta características especiales como son: la lejanía y poca accesibilidad a sus localidades, el consumo unitario reducido, poblaciones y viviendas dispersas; asimismo, no existe suficiente infraestructura vial, encontrándose aislados. Esta situación determina una baja rentabilidad económica para los proyectos de electrificación rural, lo que motiva que no sean atractivos a la inversión pública ni privada (MINEM, 2015).

Por otra parte, nos enfrentamos a la contaminación del agua, todo ello a consecuencia de las actividades del hombre, ya que constantemente se vierte por negligencia a los ríos, mares, etc., desechos con deficiente tratamiento que se da en las plantas depuradoras de aguas residuales. (Llontop, 2018). Los Impactos que vienen generando las aguas residuales se agrupan en tres: el primero es el impacto directo, sobre los seres humanos, mediante la transmisión de enfermedades; el segundo es el impacto indirecto sobre los cuerpos receptores, presentándose efectos en el medio ambiente y por último los impactos estéticos que alteran el aspecto natural y agradable de cuerpo superficial (Pistonesi, Haure, y D`Elmar, 2010). Es indispensable tratar estos efluentes de agua residuales, para disminuir el impacto ambiental que ocasionan (Bermudez y Bernal, 2018).

En nuestro país, se producen millones de metros cúbicos de aguas residuales al día, provenientes de la población, en actividades como lavado de ropa, aseo personal, necesidades fisiológicas, etc. y que poseen enormes cantidades de materia orgánico e inorgánico (Llontop, 2018). Estas aguas residuales generan un mayor impacto, debido a que el alcantarillado solo brinda servicio al 69.65 % de la población, el resto de la

población vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos, quebradas o, las emplean para el riego de cultivos (OEFA, 2014). La población que cuenta con red de alcantarillado genera 2 217 946 m^3 por día de aguas residuales, del cual solo el 32 % recibe tratamiento (OEFA, 2014). Según el censo del 2017 el 6.7 % (518 477) de viviendas particulares no tienen ningún tipo de servicios desagüe, sus ocupantes eliminan las excretas en río, acequia, o al aire libre (INEI, 2018).

El censo de 2017, revela que el departamento de Huancavelica presenta una escasa cobertura del servicio de alcantarillado (38.2 %), el ámbito rural presenta cerca del 20 % de cobertura de desagüe con letrinas, pozo séptico y pozo ciego (INEI, 2018). Al 2015 la cobertura de alcantarillado en la ciudad de Huancavelica fue de 88.77 %, según los reportes de la SUNASS, estas aguas residuales municipales no son tratadas, debido a que no se cuenta con la infraestructura física requerida, por lo que estas son vertidas al rio Ichu, lo que ocasiona un impacto negativo en el ambiente, es preciso mencionar que la ciudad de Huancavelica cuenta con una planta de tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, hasta la fecha no ha sido recibida ni puesta en marcha debido a que presenta deficiencias en su construcción (OTASS, 2015).

En respuesta a la mencionada problemática, en las últimas décadas la comunidad científica ha buscado alternativas tecnológicas que contribuyan a la solución de la crisis energética y la contaminación del agua; estos problemas se han abordado individualmente, a través de fuentes de energía renovables no convencionales y sistemas de tratamiento de agua residual (Franco y Ricaurte, 2018). Sin embargo, la competencia por ambos recursos ha llevado al desarrollo de alternativas tecnológicas sostenibles que incorporan sistemas con doble funcionalidad, dentro de estas tecnologías están MFC como una opción promisoria para el tratamiento y aprovechamiento del agua residual (Franco y Ricaurte, 2018).

1.2. Formulación del problema.

1.2.1. Problema general

¿Cuál será el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?

1.2.2. Problemas específicos.

- ¿Cuál será el potencial de generación de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?
- ¿Cuál será la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar el potencial de generación de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.
- Determinar la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

1.4. Justificación.

Las razones de la ejecución de la tesis fueron, generar energía eléctrica necesaria en el ámbito rural, principalmente en las plantas de tratamiento de las aguas residuales las cuales están alejadas de toda población, con la tecnología actual se calcula que se lograría encender 05 focos de manera continua; por otro lado, se contribuye con la búsqueda e investigación de energías renovables. Del mismo modo para tratar las aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica, las cuales no reciben ningún tratamiento y actualmente están siendo vertidas al rio Ichu generando efectos perjudiciales para la salud pública, medio ambiente y aspecto agradable de la ciudad. Las celdas de combustible microbianas (MFC) además de tratar las aguas residuales generan energía eléctrica simultánea. Las MFC son de gran importancia para la región de Huancavelica porqué; en primer lugar, se podrá suministrar de energía eléctrica a las zonas rurales, reducirán los costos de tratamiento de agua residuales; operarán eficientemente a la temperatura baja que presenta la región; será de fácil aplicación en localidades remotas por la facilidad de construcción y operación; las aguas tratadas podrán ser utilizadas en usos agrícolas sin efectos adversos y se generarán menores cantidades de lodos que otros tratamientos convencionales. Por último, se realizó la tesis porque las MFC son una tecnología emergente e innovadora, la cual actualmente están en etapa de investigación y promete resultados eficientes.

1.5. Limitaciones.

La principal limitación de la tesis fue la escala de la MFC construida, porque la generación de energía eléctrica es baja, debido a que a nivel mundial esta tecnología aún se encuentra en etapa de investigación de laboratorio y llevarlo a escala piloto o real en futuras investigaciones requerirá mucha más investigación. Del mismo modo, la tecnología requiere demasiado empeño para comprenderla y replicarla correctamente, es por ello que para la tesis se trabajó con la configuración más simple (MFC tipo H) para evitar demasiados errores e inconvenientes.

Aunque la producción de energía eléctrica ha aumentado año tras año, aún falta demasiado para mejorar la rapidez en la producción de energía eléctrica y debe pasar aún más tiempo para obtener una viabilidad comercial y para ello son necesarias las revisiones bibliografías que recopilen las limitaciones y propuestas para continuar con su desarrollo. Otra limitación fue la aclimatación y formación de la biopelícula o biofilm en el electrodo, debido a que las bacterias se encuentran en supresión en el agua residual y son complicadas hacer que se aglomeren en los electros, cabe resaltar que la formación de biopelícula también incrementa la resistencia interna y dificulta la transferencia de materia orgánica.

Otra de las limitaciones radica el alto costo de la membrana de intercambio de protones y de los electrodos de platino, los cuales no son comerciales a nivel nacional y generan mucho más gasto importarlos. Pero se están realizando investigaciones de materiales más económicos los cuales presentan resultados semejantes. Otra limitación radica en mantener un flujo constante en el agua residual, debido al pequeño caudal con el que trabaja, lo que conllevó a realizar la investigación a flujo estable. La utilización de aireación mecánica (bombas de pecera) fue otra de las principales limitaciones, debido al costes de la energía en la aireación que es el principal proceso de consumo de energía, Otra desventaja fue la dificultad de purgar el lodo de un sistema demasiado pequeño, a pesar que se genera poca cantidad.

Por último, en toda investigación con bacterias, la limitante es su especial cuidado ante los factores ambientales los cuales al modificarse bruscamente son mortales para estas bacterias. También se presentaron limitaciones con los instrumentos de medición (sensor de voltaje y amperaje), los cuales, por ser tecnológicamente más modernas, fueron difíciles de manipular y se terminaron por buscar otras opciones (multímetro).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Según Franco y Ricaurte (2018) quienes evaluaron una MFC para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez, mediante la eliminación de MO y generación de energía eléctrica de una MFC de 50 L de flujo continuo. Se tomaron muestras del afluente durante un mes y se evaluaron parámetros fisicoquímicos y parámetros eléctricos. Los resultados encontrados muestran que la MFC presenta una máxima eficiencia de reducción de DQO del 60%, una máxima densidad de potencia de 0.72 mW/m^2 y una notable disminución en el contenido de materia no biodegradable soluble asociada a mecanismos diferentes a la degradación biológica.

Según Bermudez y Bernal (2018) quienes apreciaron la implementación de una MFC a escala laboratorio para la generación de energía eléctrica y disminución del DQO. Estudiando las configuraciones más usadas a escala laboratorio, haciendo uso de una MFC de doble cámara tipo H construida en vidrio, electrodos de placa de grafito, agua residual sintética (tripticasa de soya) e inóculos de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*; el proceso se llevó a cabo en condiciones anaerobias facultativas. Obteniendo un voltaje promedio de 185.44 mV y 294.17 mV para cada

inóculo respectivamente, finalmente se obtuvo un máximo porcentaje de disminución de DQO de 12.24% para las *Pseudomonas aeruginosa*.

Según Ñacato (2018) quien apreció la aplicación del campo magnético (CM) en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando MFC tipo batch. Se trabajó con dos aguas: sintéticas (AS) y residuales domésticas (AR), con dos DQO de 500 mg/L y 1000 mg/L y una intensidad de CM de 95 mT y otro de control de 0 mT; las celdas fueron construidas con accesorios de tuberías, membrana de papel celofán e imanes de neodimio para la generación del CM, operando durante una semana (93 horas). Se demostró que la aplicación del CM mejoró la degradación de materia orgánica y disminuyó el tiempo de funcionamiento de la MFC a 2 días, removiendo un máximo porcentaje de DQO de 84.04% en la AR (r. alto); los mayores voltajes (607.67 mV) se produjeron con el CM durante los primeros días. Demostrándose así, que es posible construir MFC con materiales de bajo costo, obteniéndose una mejor remoción de contaminantes y una producción de bioelectricidad con la aplicación de un CM de 95 mT.

Según Medina y Zapata (2017) quienes calcularon la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante MFC a escala laboratorio, mediante la acción de dos bacterias, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, y electrodos de grafito y tela de carbono. Los resultados mostraron que *Escherichia coli* fue la bacteria que con determinadas condiciones de pH, temperatura, mediador y material del electrodo se obtuvo los mayores valores de voltaje (386 mV) y la mayor disminución de DQO (11.53% de 23248 mg/L a 20568mg/L) Lo anterior permite determinar la factibilidad del uso de bacterias para la producción de energía eléctrica y disminución de DQO simultaneo, con lo que se busca la disminución en los costos de operación de cualquier planta de tratamiento de las aguas residuales.

Según la tesis doctoral de Gonzáles (2015) quien realizó la valorización energética y tratamiento de efluentes residuales de la industria de los zumos de frutas mediante MFC. Se trabajaron en tres etapas, la primera mediante MFC de

hidrógeno acoplado a celda de combustible donde el biohidrógeno generado se utilizó como combustible para producir electricidad; la segunda una microMFC donde se realizó la aclimatación a flujo descontinuo y tratamiento a flujo continuo; y finalmente MFC fotosintética donde se sustituyó la aireación por un cultivo de algas. Obteniéndose un máximo porcentaje de eliminación de DQO del 70 % con las microMFC y una máxima producción de electricidad de 32 mV con las MFC fotosintética. También se observó que al aumentar la resistencia externa desde 120 hasta 1 000 Ω, aumentó la potencia eléctrica generada y la velocidad de eliminación de DQO debido a que disminuyeron las pérdidas energéticas.

Según Saavedra (2012) quien evaluó el diseñó de una MFC con el uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro, a fin de probar la viabilidad de la generación de bioelectricidad, se construyó una celda a escala de laboratorio, operada en forma discontinua (biopila), de doble cámara de 135 mL y 35 mL respectivamente, con discos de grafito de 1.6 cm de diámetro como electrodos, una membrana de intercambio de cationes Nafion como separador, y un área transversal de 2 cm de diámetro. La celda se operó durante 526 h a 25 °C manteniéndose con una carga (resistencia externa) en circuito cerrado de 1 KΩ entre mediciones. Se halló un valor de máxima densidad de potencia de 9 W/m^2 y voltaje 460 mV a las 507 h de operación. Concluyéndose que la operación de la celda confirmó la viabilidad de generar bioelectricidad a partir de compuestos inorgánicos reducidos de azufre.

Según Buitrón y Pérez (2011) quienes estudiaron la producción de electricidad y la eliminación de materia orgánica en MFC utilizando agua residual: midiendo el efecto de la distancia entre electrodos. Para ello se construyeron 3 celdas de geometría semejante, pero con diferente volumen. En promedio, se obtuvo una eficiencia de eliminación de materia orgánica del 71%, la duración del ciclo fue de 0.97, 1.03 y 5.93 días para la celda de 40, 80 y 120 mL respectivamente. Demostrándose que el aumento de distancia entre los electrodos no causó un efecto negativo en la generación de electricidad, en la mayor separación (celda de 120 mL) se alcanzó un máximo voltaje de 660 mV y una máxima densidad de potencia de 408 mW/m^2.

Según Cervantes (2011) quien observó la biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en MFC. Para ello se construyeron y operaron 4 MFC con cátodo flotante (CF) y 1 con bafles y ánodo en forma de escobillón (BAE). Primero, se comparó el efecto de la presencia de fenol; segundo, la resistencia externa fija (220, 460 y 1000 Ω) y la resistencia externa variable; tercero, el comportamiento electroquímico de 2 MFC-CF previamente aclimatadas; y, por último, se operó, evaluó y comparó el comportamiento de una MFC construida con materiales de bajo costo (BAE) con el comportamiento de la MFC operada anteriormente (CF). Los mayores valores de degradación de fenol (60.9 %) y de densidad de potencia (31.6 mW/m^2) se obtuvieron cuando la resistencia externa del circuito fue igual a la resistencia interna de la MFC (460 Ω). La MFC-BAE generó una menor densidad potencia y degradación de materia orgánica.

Según Huitzil (2010) quien calculó la generación de electricidad empleando *Geobacter Sulfurreducens*, al explicar el funcionamiento de las MFC para aprovechar la electricidad generada por este tipo de bacterias. Evaluó 5 estudios del empleo de *Geobacter Sulfurreducens* en diferentes países (México, EUA, Argentina y Corea del Sur), comparando los parámetros: medio de crecimiento, electrodos, valores eléctricos obtenidos, temperatura y pH. El medio de crecimiento siempre estuvo compuesto por cloruro de amonio (NH_4Cl), fosfato diácido de sodio (NaH_2PO_4), cloruro de potasio (KCl) y bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$); los electrodos en todos los casos fueron de carbón con tamaños desde 1.7 a 15.8 cm de largo, y 1.6 a 3.8 cm de ancho; la temperatura promedio de estos estudios fue de 34 °C, y el pH promedio fue de 6.1. Las resistencias empleadas tenían valores entre 100 y 4000 Ω, los valores de Voltaje oscilaron entre 0.35mV y 0.24 V, los valores de potencia se encontraron entre 335 y 880 mW/m^2.

Según Carmona (2008) quien midió la obtención de energía eléctrica directa de una MFC mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H_2, en tratamiento en lote y lote repetido. Se probó dos tipos de inóculo, metanogénico y sulfato reductor. La curva de polarización mostró que la resistencia interna del inóculo metanogénico fue 4 veces más alta que del inóculo sulfato

reductor (33 y 8 kΩ), lo cual afectó en la corriente y la potencia de la MFC (inóculo metanogénico $5x10^{-7}$ W e inóculo sulfato reductor $1x10^{-5}$ W). Los máximos potenciales obtenidos a circuito abierto fueron en los ensayos en lote (0.6 V). La máxima densidad de potencia fue obtenida en los ensayos en lote repetido (27.34 mW/m^2), En los ensayos en lote repetido se produjo la mayor remoción de DQO de 62%. Por otro lado, la remoción de la DQO de la celda fue mejor cuando la concentración de la alimentación fue mayor.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Según la tesis de maestría de Jibaja (2018) quien calculó la producción de electricidad en MFC a partir de tiosulfato utilizando cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans,* Se emplearon 2 cultivos de *At. ferrooxidans* cepa LB102 y LB151, en 5 celdas. Las técnicas electroquímicas utilizadas fueron: la voltametría cíclica (VC1 y VC2) para mostrar picos de corriente de oxidación y reducción de los compuestos e indicando que hay una interacción de la bacteria con el electrodo y la cronoamperometría (C1 y C2) para mostrar que la bacteria era la productora de la electricidad al utilizar el tiosulfato solo y el tiosulfato con hierro. La producción máxima de densidad de potencia fue en la MFC3 de 29 mW/m^2 en 7 h, la máxima energía producida fue por la MFC2 de 1 610 Joule. Las pruebas moleculares identificaron a las 2 cepas como *Acidithiobacillus ferrooxidans,* estos resultados indican que con el compuesto inorgánico tiosulfato como sustrato se produjo electricidad utilizando el cultivo de las 2 cepas de *At. ferrooxidans* en las MFC.

Según Llontop (2018) quien apreció la influencia de los niveles de DBO de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica y los ligeros incrementos del pH en las cámaras anódicas utilizando MFC, Se recolectó 6 L de muestra de agua residual, se midió la producción de electricidad a tres distintos DBO (242, 150, 50 mg/L), se escogieron tres puntos de pH comunes (7.00, 7.24, 7.30) y se determinó si el incremento pH tuvo efecto sobre la cantidad de electricidad, se calculó el % de remoción de DBO. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante un análisis estadístico de varianza, la celda con 242 mg/L alcanzó la máxima potencia de 190.021 mW/m^2 a las 83.3 h y en el aumento del pH

desde 7.16 a 7.32 se obtuvieron las densidades de potencia más altas (175.9 mW/m^2). El porcentaje de remoción de materia orgánica disminuyó con el incremento de DBO y la celda con 150 mg/L obtuvo el máximo de 86.67 %.

Según Rojas (2017) quien estudió la eficiencia de la generación eléctrica de un agente biológico en un sistema Bioelectroquímico. Se diseñó y se construyó una MFC usando una membrana de intercambio protónico (MIP) Nafion 117, electrodos de grafito de alta densidad y como agente biológico se aisló una bacteria nativa a partir de biomasa residual de origen porcícola, el sustrato usado fue el caldo de infusión, el sistema trabajó en régimen Batch que fue inoculado con la bacteria *E. faecium*, el cual estuvo funcionando por 10 000 minutos de manera continua. Los resultados muestran una media de producción energética de 3 kJ y una media de densidad de potencia de 4.5 W/m^2. Por tanto, se puede concluir que es posible generar energía eléctrica con el *microorganismo E. faecium*.

Según Calderón (2017) quien apreció la generación y acumulación de energía eléctrica utilizando sistemas de MFC inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP "La Tomilla"- Arequipa. Se diseñó y construyó una MFC en ausencia de membrana de intercambio protónico, y se comparó con un sistema control con membrana Nafion 117 de esta manera se intentó demostrar que se puede excluir a las costosas membranas en la construcción de las MFC reduciendo costos de manera exponencial. Ambos sistemas se mantuvieron funcionando por 25 días de manera continua, produciendo una media de densidad de potencia de 200.22 mW/m^2 y 197.7mW/m^2 para cada sistema respectivamente. El análisis estadístico demostró que no existía diferencia significativa entre los resultados de ambos sistemas, por lo tanto, se demostró que las membranas de intercambio protónico pueden ser removidas de los diseños sin tener repercusiones negativas.

Según Pineda (2015) quien observó la producción de energía eléctrica en una MFC empleando Cascarilla de Arroz (*Oryza sativa*) como sustrato y Licor Ruminal Bovino como inóculo microbiano. Se realizó una comparación del sustrato consumido con la energía total producida. La MFC tuvo un diseño de dos cámaras cilíndricas concéntricas, tipo batch, con puente salino de cloruro de potasio y

electrodos de malla de acero inoxidable 301. Se realizó una comparación entre celdas con rumen bovino y cascarilla de arroz (RB+CA) y celdas con rumen bovino (RB), Las celdas operaron durante 46 y 20 días respectivamente sin agotarse. Ambos tipos de celda reportaron valores de parámetros de producción de energía estadísticamente similares, siendo la máxima densidad de potencia de 4.94 mW/m^2. Estos resultados demuestran que la cascarilla de arroz es un sustrato que puede ser degradado por microorganismos del rumen bovino para la producción de electricidad.

2.2. Bases teóricas sobre el tema de investigación.

2.2.1. Teoría electrónica de la generación de electricidad.

Cualquier átomo está constituido por un núcleo subdividido, a su vez, en protones y neutrones; en torno a dicho núcleo giran los electrones, el protón tiene carga positiva y el electrón carga negativa; si un átomo pierde electrones queda electrizado positivamente; si, por el contrario, los adquiere, queda electrizado negativamente; de todos es conocido el fenómeno de electrización de los cuerpos por frotamiento; el electrón es la parte más importante del átomo, ya que de su facilidad para moverse a lo largo de los cuerpos va a depender que éstos sean conductores o aislantes. Por tanto, podemos decir que la unidad elemental de carga eléctrica es el electrón (Flores, 2013).

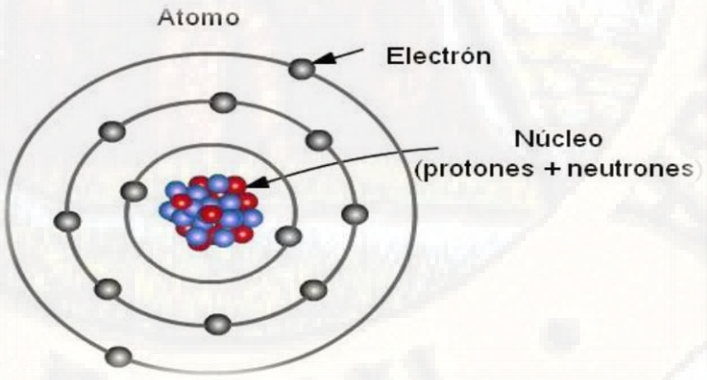


Figura 1. Modelo atómico de Bohr.

Fuente: Huitzil (2010)

2.2.2. Teoría de transferencia de electrones en una célula.

Para que los electrones que son generados en la cadena respiratoria lleguen desde el interior de las células hasta una superficie del electrodo, se necesitan condiciones anaerobias, para explicar la transferencia de electrones al electrodo se han planteado diferentes mecanismos: **1**. transferencia directa con la participación de citocromos, **2.** transferencia con mediadores externos o producidos por el propio organismo y **3.** transferencia por medio de los nanocables bacterianos o pili. En la Figura 1 se muestran los tres mecanismos de transferencia de electrones (Gonzáles, 2015).

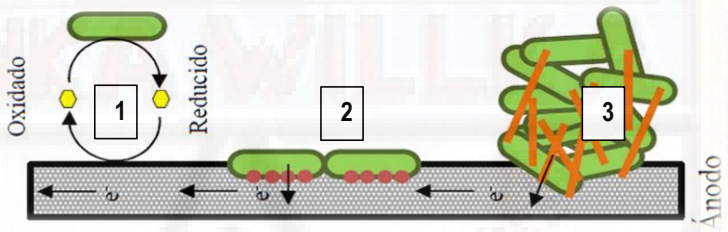


Figura 2. Mecanismos de transferencia de electrones.

Fuente: Gonzáles (2015)

a. **Transferencia directa con la participación de citocromos.** Este mecanismo es empleado por las bacterias electrogénicas, que son microorganismos que conservan la energía consiguiendo su crecimiento por la oxidación de compuestos orgánicos a CO_2 y con la transferencia directa de electrones al ánodo. Esto ha estado siempre relacionado con la presencia de citocromos C, que, distribuidos entre la membrana interna, periplasma y membrana externa, permiten transferir electrones desde el citoplasma hasta el exterior de la célula para respirar sustratos extracelulares; entre los más estudiados de esta clase se encuentran *Geobacter* y *Rhodoferax* una de las ventajas es la completa oxidación de la materia orgánica a CO_2 (Gonzáles, 2015).

b. **Transferencia con mediadores externos o producidos por el propio organismo.** Un mediador es un compuesto que puede interactuar con la célula, aceptar electrones, convertirlos a su estado reducido y donarlos al electrodo. Algunos microorganismos como la *Shewanella o Pseudomonas*

sintetizan sus mediadores, mientras que otros no lo hacen y es necesario adicionarlos, como para *Escherichia coli, o Bacillus*, los mediadores más comunes son: 2,6-diclorofenol y rojo neutro (Gonzáles, 2015).

c. **Transferencia por medio de nanocables bacterianos o pili.** Los nanocables proveen soporte estructural en la formación del biofilm y son esenciales en la generación de corriente, ya que son los encargados de formar una red eléctrica entre la célula y el electrodo para facilitar la transferencia de electrones, los nanocables permiten la participación activa de las células situadas en los límites exteriores del biofilm, estos pilis se han identificado en diferentes tipos de bacterias como: *G. sulfurreducens* o *Shewanella* (Gonzáles, 2015).

2.2.3. Teoría enzimática del tratamiento de las aguas residuales.

La teoría enzimática para la remoción de materia orgánica fue sustentada a través del trabajo de Weston y Eckenfelder (1955), ellos propusieron un fenómeno en el cual la formación de un complejo enzimático fue postulada como el responsable de la rápida remoción de la materia orgánica del agua residual, más tarde se incorporó el mecanismo de permeabilidad para fijar materia orgánica dentro de microorganismos; McCarty (1967) estableció que la remoción de materia orgánica debía ser por el metabolismo microbiano y que el almacenamiento puede observarse en el crecimiento microbiano cuando existe deficiencia de nutrientes (Ramirez, 2004).

2.3. Bases conceptuales.

2.3.1. Potencial de generación de energía eléctrica.

A. Potencial de generación.

Es la medición de la cantidad de energía eléctrica que contiene un material, y que es capaz de transmitir o ser medido. Considerando a los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural los materiales con mayor potencial eléctrico, es por ello que son la columna vertebral del sector energético mundial (Flores, 2013).

B. Energía.

La energía está definida como la capacidad para realizar un trabajo, existen diferentes formas de energía como la mecánica, la electricidad, la termina, etc.; todas procedentes de fuentes como el agua, plantas, la gravedad, el sol, los combustibles fósiles, el viento y etc; siendo las fósiles las más usadas (Medina y Zapata, 2017).

Energía hidráulica. La energía hidráulica aprovecha la energía potencial de una cantidad de agua situada en el cauce de algún río para convertirla en energía mecánica y posteriormente en electricidad (Huitzil, 2010).

Energía geotérmica. Esta energía se encuentra en el interior de la Tierra, la cual por presión es transportada a través de la roca y/o fluidos a la entrada de las turbinas de vapor y genera electricidad (Huitzil, 2010).

Energía eléctrica. Energía que se produce cuando se da el flujo de electrones a través de un conductor eléctrico (Medina y Zapata, 2017).

Energía química. Es una energía que esta almacenada en los enlaces químicos de las moléculas, se libera cuando reaccionan uno o varios productos químicos para formar otro u otros (Medina y Zapata, 2017).

Energía nuclear. Energía encontrada a nivel atómico, en el interior del núcleo, puede ser liberado mediante fusión (unión de átomos) o fisión (división de un átomo), transformándose así la materia en energía (Medina y Zapata, 2017).

C. Energía eléctrica.

Es el movimiento de electrones a través de los átomos de un material conductor. Los electrones circulan desde un polo negativo de un generador hasta el polo positivo de un aceptor, un conductor es cualquier material cuyo último nivel de la configuración electrónica de sus átomos contiene pocos

electrones, por lo que es sencillo el movimiento de estos (Pineda, 2015). Existen dos clases de corriente eléctrica clasificadas de acuerdo al sentido en que se mueven los electrones:

La corriente alterna: tiene un flujo de electrones que se mueve en un sentido a otro y cuyo valor de corriente es variable, es producida por los alternadores en las centrales eléctricas (Pineda, 2015).

La corriente continua: se caracteriza porque los electrones siempre se mueven en el mismo sentido y con una intensidad constante, es producida por las baterías, pilas, celdas fotovoltaicas y por ende por MFC (Pineda, 2015).

D. Electroquímica: relación entre la energía química y la energía eléctrica.

La electroquímica es una de las ramas de la química dedicada a estudiar la relación entre la energía química y la energía eléctrica, las reacciones químicas son las que eventualmente producen la energía eléctrica, entre los principios teóricos de la electroquímica se encuentran las reacciones de óxido-reducción o reacciones electroquímicas (Bermudez y Bernal, 2018).

E. Reacciones de óxido-reducción.

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de una celda electroquímica se denominan reacciones REDOX, en este tipo de reacciones se produce una transferencia de electrones entre dos especies lo que producen electricidad. La sustancia que se oxida es al mismo tiempo la que genera la reducción de otra sustancia, generalmente recibe el nombre de agente reductor; la sustancia que se reduce es la que provoca la oxidación de la otra sustancia, ésta recibe el nombre de agente oxidante (Bermudez y Bernal, 2018).

F. Celdas electroquímicas.

Una celda electroquímica es un dispositivo donde se obtiene la energía eléctrica a partir de reacciones químicas; en las celdas electroquímicas los

electrodos propician dichas reacciones de óxido-reducción, estas reacciones no requieren de una fuente externa de poder, por el contrario, el flujo de electrones que se experimenta es el que genera la corriente eléctrica (Bermudez y Bernal, 2018). En esta celda electroquímica la oxidación se lleva a cabo en la cámara anódica el electrodo es el ánodo, mientras que en la cámara catódica se lleva a cabo la reducción el electrodo es el cátodo, existe un circuito eléctrico externo donde se transfieren los electrones desde los electrodos (Bermudez y Bernal, 2018).

G. Celdas de combustible.

Las celdas de combustible funcionan en general utilizando hidrógeno y oxígeno, en este caso el hidrógeno es el agente reductor y el oxígeno el agente oxidante, este tipo de celda consta de dos electrodos (ánodo y cátodo); la reacción química es de tipo REDOX, el hidrógeno se encuentra en el ánodo mientras que el oxígeno en la parte del cátodo, en este caso es la membrana electrolítica la que separa las dos partes de la celda (Bermudez y Bernal, 2018). Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el interior de la celda son:

$$\textbf{Ánodo}: 2H_{2(g)} \rightarrow 4H^{+}{}_{(aq)} + 4e^{-} \qquad \textbf{Cátodo}: O_{2(g)} + 4H^{+}{}_{(aq)} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O_{(l)}$$

En la celda de combustible, el hidrógeno se encuentra en forma de gas y el oxígeno es suministrado por el aire; En el ánodo es donde el hidrógeno es ionizado por medio de una oxidación, donde queda en forma de protón, al llevar a cabo este proceso se libera simultáneamente un electrón que viaja hacia el cátodo. El protón por otra parte, atraviesa el electrolito o puente salino hacia el cátodo, En el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción, es decir que el oxígeno gana el electrón perdido por el hidrógeno formando agua junto con el protón que ha atravesado el electrolito, en una celda de combustible se genera agua, energía y en la mayor parte de las ocasiones, calor en forma de energía térmica (Bermudez y Bernal, 2018).

2.3.2. Eficiencia de tratamiento del agua residual.

a) Eficiencia de tratamiento.

El grado de eficiencia de tratamiento de las aguas residuales se define como: la reducción porcentual de indicadores apropiados, considerados en forma acumulativa o de determinadas sustancias; la determinación de la reducción porcentual se establece para el indicador especifico, como la relación entre la carga que fluye a la entrada del sistema y la correspondiente carga en el flujo de salida (Galvez, 2013). Estas determinaciones se realizan en lapsos apropiados para las observaciones. De este modo, la eficiencia se calcula como sigue:

$$\eta = \frac{F_E - F_S}{F_E}$$

Dónde: η = eficiencia en %, F_E = carga de entrada, F_S = carga de salida.

b) Agua Residual.

Toda comunidad genera residuos tanto solidos como líquidos. La fracción líquida (aguas residuales) es esencialmente el agua del que se desprende la comunidad una vez ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada, desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1995).

Es aquella agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión (MVCS, 2006).

c) Clasificación de las aguas residuales.

Agua residual doméstica: Agua de origen doméstico, comercial e institucional que contiene desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana (MVCS, 2006).

Agua residual municipal: Se puede incluir bajo esta definición a la mezcla de aguas residuales domésticas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial, siempre que estas cumplan con los requisitos para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (MVCS, 2006).

Agua residual industriales: Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (OEFA, 2014).

d) Tratamientos de aguas residuales.

Se conoce como operaciones unitarias aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos se conocen como operaciones unitarias; las operaciones y procesos unitarios se agrupan ende sí para constituir los así llamados tratamiento primario, secundario y terciario (o tratamiento avanzado) (Metcalf y Eddy, 1995).

El tratamiento primario: contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual (Metcalf y Eddy, 1995).

El tratamiento secundario: son proceses biológicos y químicos los que se emplean para eliminar la mayar parte de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1995).

El tratamiento terciario: se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias con el fin de eliminar otros componentes, tales como el nitrógeno y el fósforo, cuya reducción con tratamiento secundario no es significativa (Metcalf y Eddy, 1995).

e) Caracterización de aguas residuales.

Un estudio de caracterización de las aguas residuales deberá incluir suficiente información sobre los compuestos presentes, están generalmente orientados para proveer al ingeniero de proyecto entre otras de la información de base para: seleccionar y diseñar los procesos de tratamiento, necesidad de tratamientos previos para contrarrestar los efectos de toxicidad y determinar el grado de tratamiento necesario para satisfacer las normas de calidad para aguas receptoras (Carmona, 2008).

f) Características de las aguas residuales.

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental para la exploración de las infraestructuras de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medio ambiental (Metcalf y Eddy, 1995).

Características físicas del agua residual: la **temperatura** del agua es un parámetro muy importante dada su influencia en los procesos bilógicos, desarrollo de la vida acuática, reacciones químicas y velocidades de reacción, por otro lado, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría (Metcalf y Eddy, 1995).

Características químicas del agua residual: la **materia orgánica**, son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos, los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (50%), hidratos de carbono (40%), grasas y aceites (10%) y pequeña cantidad de urea y microrganismos (Metcalf y Eddy, 1995).

La **materia inorgánica**, **pH**, es una expresión para medir la concentración de ion hidrogeno en una solución, el intervalo de concentraciones adecuado para la proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico, el agua residual con concentraciones de ion hidrogeno inadecuadas presentan dificultades de tratamiento con procesos bilógicos, y el efluente puede modificar las aguas naturales (Metcalf y Eddy, 1995).

Medida del contenido orgánico: la **demanda química de oxigeno (DQO)**, el ensayo de DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio acido para la determinación del equivalente de oxigeno de la materia orgánica que puede oxidarse (Metcalf y Eddy, 1995).

2.3.3. Celdas de Combustible Microbiano (MFC).

a. Origen de las Celdas de Combustible Microbiano.

El primer reporte de una MFC, fue en 1912 con el Profesor Potter, de la Universidad de Durham en el Reino Unido, quien logró producir electricidad de una bacteria *E. coli*; sin mucha notoriedad, sin embargo retomaron importancia en los años 60 cuando la NASA se interesó en transformar desechos orgánicos en electricidad para su uso en viajes espaciales de larga duración (Gonzáles, 2015). Recientemente, se han llevado a cabo estudios que han demostrado la posibilidad de producir energía eléctrica a la vez que se logra el tratamiento de las aguas residuales (Gonzáles, 2015).

b. Definición de las Celdas de Combustible Microbiano.

La tecnología de MFC representa el más nuevo enfoque para generar electricidad mediante la degradación de la materia orgánica presente en aguas residuales usando bacterias (Logan, 2007). Una MFC es un sistema bioelectroquímico que utiliza bacterias para convertir la energía química presente en el sustrato en energía eléctrica, lo cual es posible bajo condiciones anaerobias, en la cual algunas bacterias transfieren los electrones producidos

en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (Franco y Ricaurte, 2018).

En una MFC, las bacterias degradan (oxidan) la materia orgánica, produciendo electrones que viajan a través de una serie de enzimas respiratorias en la célula y producen energía en forma de ATP, los electrones se liberan a un aceptor terminal de electrones (Logan, 2007). Por ejemplo, el oxígeno puede reducir los electrones y protones a agua a través de una reacción catalítica (Logan, 2007).

El esquema básico de una MFC comprende: las cámaras anódica y catódica las cuales están separadas por una membrana, las bacterias crecen en la cámara anódica, oxidando la materia orgánica y liberando electrones al electrodo (ánodo) y los protones a la solución (Logan, 2007). Por diferencia de carga, los electrones son transferidos a la cámara catódica a través de un circuito eléctrico externo que conecta el ánodo y el cátodo; mientras que los protones son transferidos a través de la membrana selectiva de protones a la cámara catódica (Calderón, 2017). El cátodo se rocía con aire para proporcionar oxígeno disuelto para las reacciones de los electrones, protones y oxígeno en la superficie del cátodo (Logan, 2007), con el fin de generar agua. La cámara anódica está en condiciones anaeróbicas, por lo que las bacterias se ven obligada a cambiar su aceptor natural de electrones a un aceptor insoluble; tal como un electrodo (ánodo) (Calderón, 2017). El sistema se muestra con una resistencia utilizada como control de carga para la energía generada, y la corriente se determina mediante un multímetro (Logan, 2007).

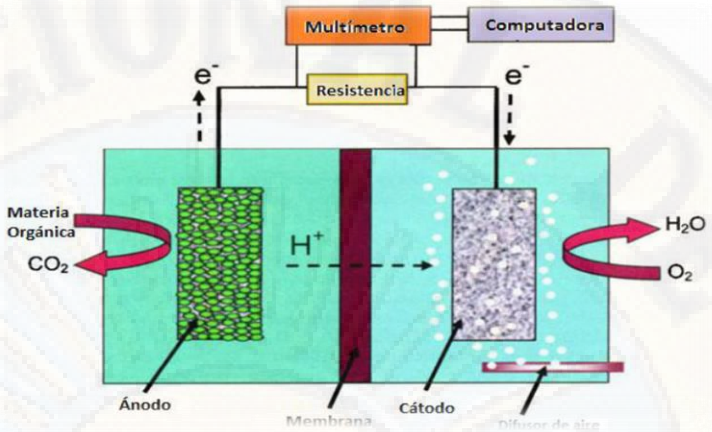


Figura 3. Esquema básico de una celda de combustible microbiano.

Fuente: Logan (2007)

La transferencia de electrones sobre el electrodo es directa con la participación de citocromos, no necesita de un agente mediador y gracias a los Pili, que se adhieren a los electrodos permiten que los electrones se transfieran al ánodo directamente (Romero y Vásquez, 2012).

c. Componentes de las Celdas de Combustible Microbiano.

Membrana de intercambio de protones (PEM): La membrana actúa como un separador y electrolito sólido, cuya función ideal es la de separar la reacción de la cámara anódica y catódica, en el sistema electroquímico mientras permite el transporte selectivo de protones del ánodo al cátodo, previniendo la difusión de oxígeno hacia la cámara anódica (Calderón, 2017).

La PEM más comúnmente utilizada es el Nafion 117; el código 117 se utiliza para distinguir el espesor (0.019 cm). Esta membrana fue desarrollada para su uso en una celda de combustible de hidrógeno y por lo tanto fue optimizada para crear un ambiente estable y conductor para altas concentraciones de protones (bajo pH) (Ñacato, 2018). Nafion es una membrana polimérica, que al hidratarse, los protones son débilmente atraídos a las regiones con alta negatividad electrónica, lo que permite que sean transportados con facilidad (Calderón, 2017).

Electrodos: Los electrodos lo conforman el ánodo en el compartimiento anódico y el cátodo en el compartimiento catódico, los materiales del ánodo y del cátodo son seleccionados en base a varias propiedades, tales como: gran área superficial, estabilidad química, bio compatibilidad (ánodo), y buena conductividad; como material del ánodo, el carbono es preferible a los metales como el cobre ya que este último es tóxico para las bacterias; así, el carbón y grafito granulado han demostrado ser muy eficaces; el cátodo es generalmente del mismo material que el ánodo, en algunos ensayos se utilizan catalizadores de platino para aumentar la tasa de reducción de oxígeno disuelto en el compartimento catódico (Saavedra, 2012).

La reacción en el ánodo, donde la bacteria interactúa con la materia orgánica (ejemplo: acetato) oxidándola completamente (Romero y Vásquez, 2012), es la siguiente:

$$C_2H_4O_2 + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 8H^+ + 8e^-$$

La reacción en el cátodo, donde el oxígeno puro reacciona con los protones y electrones, para formar agua (Romero y Vásquez, 2012), es la siguiente:

$$O_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow 4H_2O$$

Cámaras: La cámara catódica y anódica se suelen fabricar en acrílico o en vidrio, este material no afecta el rendimiento de la celda (Medina y Zapata, 2017).

Sustrato: Los sustratos empleados en las MFC para la producción de electricidad van desde los compuestos puros a las mezclas complejas de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Cervantes, 2011).

El acetato es un sustrato simple y es ampliamente utilizado como fuente de carbono para inducir a las bacterias electroquímicamente activas para lleven a cabo sus reacciones metabólicas y se reduzca el tiempo de aclimatación (Cervantes, 2011).

Las aguas residuales sintéticas con una composición definida se emplean, debido a que su pH, conductividad y fuerza iónica son fáciles de controlar (Cervantes, 2011).

Las aguas residuales industriales contienen un contenido alto de materia orgánica, representando un importante recurso rico en energía; las aguas residuales municipales contienen un contenido moderado de materia orgánica e inorgánico, y gran cantidad de microorganismo adicionales (Cervantes, 2011).

Resistencia externa: La resistencia externa afecta la eficiencia de las MFC mediante el control al flujo de electrones desde el ánodo al cátodo, una resistencia externa muy alta actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones (Llontop, 2018), la resistencia externa más usada y recomendada es la de 1000 Ω.

Circuito eléctrico externo: Es el conductor externo encargado de cerrar el circuito eléctrico en una MFC, ya que transporta los electrones desde el ánodo hacia el cátodo (Llontop, 2018). Desde luego se deben escoger metales con alta capacidad de conducción, no tóxicos y de fácil manejo (Llontop, 2018). Los más usados son los cables de cobre y de aluminio (Llontop, 2018). El acoplamiento que realiza el circuito eléctrico externo metálico al ánodo y al cátodo debe ser consistente y no susceptible de corrosión en el medio en que se sumerge, podría usarse acero inoxidable, pero no cobre debido a que la presencia de iones de cobre en la disolución, puede resultar toxico para las bacterias (Llontop, 2018).

d. Diseño de las Celdas de Combustible Microbiano.

Existen diversos diseños de MFC, la arquitectura se desarrolla en relación a los objetivos de la investigación.

Celda de dos Cámaras (Tipo H): Este es el diseño más simple y conocido de la MFC, consiste en dos cámaras unidas por un puente para la PEM, el cátodo es suspendido en agua y es rociado con aire por medio de una bomba, este sistema es el más utilizado por los investigadores que enfocan sus investigaciones únicamente en la producción energética (Calderón, 2017).

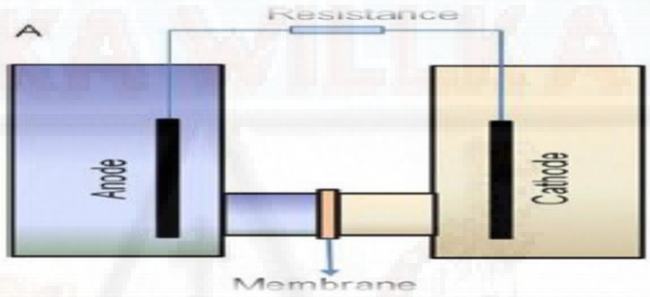


Figura 4. Celda de combustible microbiano de dos cámaras (tipo H).

Fuente: Bermudez y Bernal (2018)

Celda de una cámara: Son menos usadas que las anteriores debido a su alto costo y a su difícil ensamblaje, solo cuenta con cámara anódica (Medina y Zapata, 2017). Tiene la ventaja de menor costo en la operación ya que el cátodo no necesita aireación mecánica siendo el oxígeno presente en el aire el aceptor final de electrones (Bermudez y Bernal, 2018).

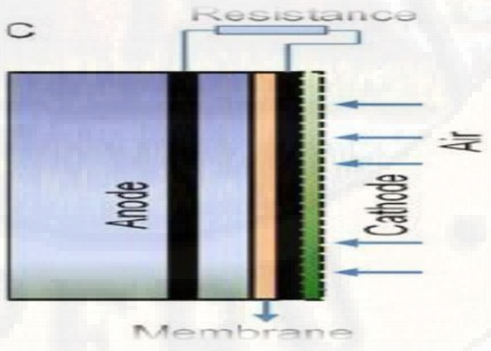


Figura 5. Celda de combustible microbiano de una cámara.

FUENTE: Bermudez y Bernal (2018)

Celdas de flujo ascendente: Este modelo consta de un cilindro de plexiglás dividido en dos secciones, siendo estas las cámaras anódicas y catódicas, el ánodo y el cátodo son de fieltro de carbono en forma de disco, este sistema es utilizado para investigaciones que enfocan en el tratamiento de agua residual, la alimentación ingresa por la parte inferior y sale por la parte superior de manera continua (Medina y Zapata, 2017).

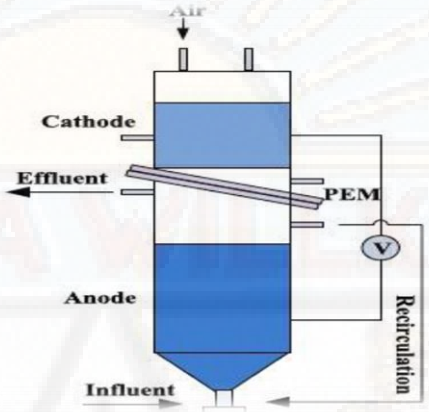


Figura 6. Celda de combustible microbiano de flujo ascendente.

Fuente: Bermudez y Bernal (2018)

e. Fuentes de microorganismos electrogénicos.

Los inóculos bacterianos oxidan la materia orgánica en la cámara anódica transfiriendo los electrones a un electrodo y pasando los protones a través de la membrana al compartimento catódico. Posteriormente, los electrones son cedidos a un aceptor de electrones en el cátodo, que suele ser el oxígeno. Las comunidades de bacterias que se desarrollan en la cámara anódica tienen unas funciones muy similares a las de los microorganismos metanogénicos. A diferencia de los metanogénicos, estas bacterias pueden transferir los electrones directamente a la superficie del electrodo (Gonzáles, 2015).

Inóculos de cultivos puros: Los inóculos con cultivos puros son llevadas a cabo por un único tipo de bacterias, generalmente *Shewanella putrfaciens, Escherichia coli, Geobacter sulfurredecens y Rhodoferax ferrireducens* (Franco y Ricaurte, 2018). Con estos cultivos es posible lograr un mayor

rendimiento eléctrico, pero presentan el problema de que se pueden contaminar fácilmente con otro tipo de bacterias (Gonzáles, 2015).

Inóculos mixtos o de consorcios bacterianos: Los inóculos con cultivos mixtos pueden llegar tratar mejor el agua residual; esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo, disminuye la preocupación por la posible contaminación del cultivo con otras bacterias, son más sencillos de operar y fáciles de controlar (Gonzáles, 2015). El inóculo bacteriano mixto es obtenido de pantanos, lodos anaeróbicos, aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, sedimentos marinos o sedimentos acuáticos (Calderón, 2017).

f. Rutas para la Generación de Energía Eléctrica.

Para que las bacterias oxiden la materia orgánica y se conserve la energía en forma de ATP, son necesarias dos rutas: la fermentación y la respiración (Medina y Zapata, 2017).

La fermentación: son donde ocurren los procesos de óxido-reducción en ausencia de aceptores terminales de electrones, estas reacciones la materia orgánica es balanceada internamente con liberación de energía (Medina y Zapata, 2017).

La respiración: es aquella en donde el oxígeno molecular sirve como aceptor terminal de electrones, siendo esta (fosforilación oxidativa), el mecanismo usado por las bacterias utilizadas en MFC (Medina y Zapata, 2017).

g. Sistemas transportadores de electrones.

En la cadena de transporte de electrones el ATP es proveniente del ciclo de Krebs, el electrón se forma entre el citoplasma y periplasma, el electrón atraviesa el periplasma gracias al citocromo c, el cual es el encargado de transportar los electrones hacia el ánodo (Medina y Zapata, 2017). El proceso anterior provoca un bombeo de protones (átomos de hidrógeno H+) hacia la

parte exterior de la membrana, los protones son bombeados fuera de la célula (Medina y Zapata, 2017).

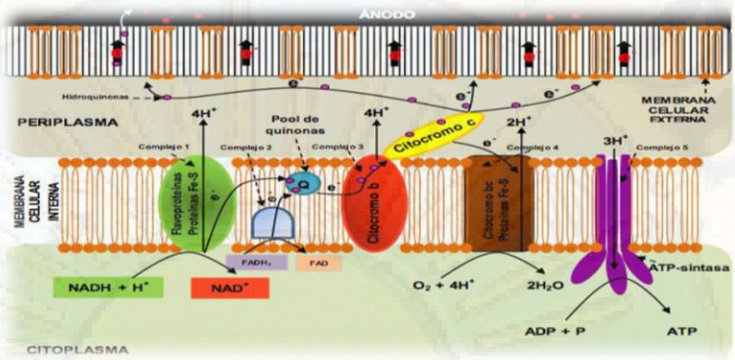


***Figura* 7**. Mecanismo de generación de protones y transferencia de electrones.

Fuente: Medina y Zapata (2017)

h. Fases de crecimiento microbiano.

El crecimiento se define como el incremento en el número de células microbianas en una población (Gonzáles, 2015) (Medina y Zapata, 2017). Hay cuatro fases las cuales son:

Fase de adaptación o latencia: es el período en el que los microorganismos se adaptan a las nuevas condiciones. En este período no se observa crecimiento microbiano, los microorganismos degradan la mínima cantidad de sustrato para mantenerse vivos (Gonzáles, 2015).

Fase exponencial: Se lleva a cabo la división celular que conlleva a la duplicación de las mismas (Medina y Zapata, 2017). El crecimiento de los microorganismos es exponencial, siendo la velocidad de crecimiento máxima (Gonzáles, 2015).

Fase estacionaria: Ocurre cuando el sustrato se agota (Medina y Zapata, 2017) se alcanza un estado estacionario, en el que la concentración de microorganismos se mantiene constante (Gonzáles, 2015).

Fase de muerte: Ocurre cuando las células deben permanecer vivas y metabólicamente activas, pero otras deben morir, esta fase es también exponencial, pero siendo más lenta que el crecimiento exponencial (Medina y Zapata, 2017).

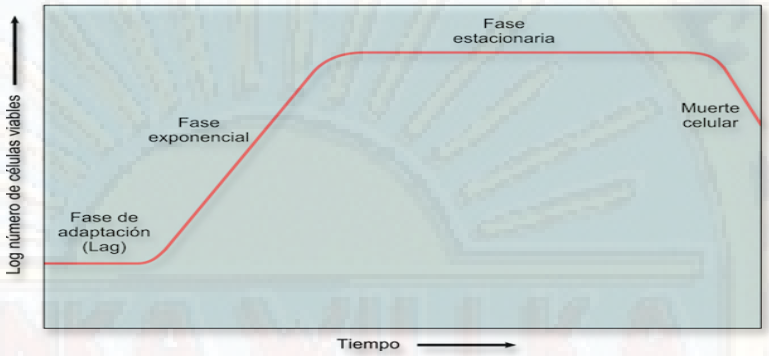


Figura 8. Curva de crecimiento bacteriano.

Fuente: Briceño (2015)

i. Factores ambientales que afectan el crecimiento microbiano.

Temperatura: Este factor afecta el crecimiento y la supervivencia microbiana cuando el límite es superado, las proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes pueden dañarse irreversiblemente; los microorganismos se pueden dividir en cuatro grupos según su temperatura optima: *psicrofilos* (< 20ºC), *mesofilos* (20ºC – 42ºC) *termófilos* (>40ºC) e *hipertermofilos* (>80ºC y 100ºC) (Medina y Zapata, 2017).

Acidez y alcalinidad (pH): se mide en una escala donde pH 7 es neutralidad, valores menores se consideran ácidos y valores mayores alcalinos; cada microorganismo tiene un pH optimo en el cual el crecimiento es más favorable, la mayoría de las bacterias crecen mejor en un rango de pH entre 6.5 y 7.5; normalmente el valor de pH de una MFC convencional oscila entre valores de 6.0 y 9.0 (Bermudez y Bernal, 2018).

Oxígeno: se pueden dividir en diversos grupos dependiendo del efecto de oxígeno. Los aerobios capaces de crecer en presencia de oxígeno, los anaerobios son aquellos que carecen de sistema respiratorio por ende no

pueden crecer en presencia de oxígeno, existen anaerobios facultativos que pueden tolerar el oxígeno y crecer en presencia de él, y anaerobios estrictos que mueren en presencia de oxígeno, estos últimos no toleran el oxígeno (Medina y Zapata, 2017).

Conductividad eléctrica: controla la presencia de electrones con vínculos débiles suspendidos en el agua residual; la conductividad depende de otros factores físicos además de la temperatura; la conductividad también es debido a las sales, minerales y iones electrolíticos presentes en el agua; el incremento de la conductividad en el agua residual facilita la transferencia de protones hacia la cámara catódica y, por ende, genera mayores densidades de potencia (Franco y Ricaurte, 2018).

2.4. Definición de términos.

a. **Afluente:** Agua residual que ingresa a una planta de tratamiento de las aguas residuales o proceso de tratamiento (MVCS, 2013).
b. **Biofilm o biopelícula:** Organizaciones microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a diferentes superficies gracias a la secreción de un ex polímero (Bermudez y Bernal, 2018).
c. **Cantidad de electricidad:** Número total de electrones que recorren un conductor (Flores, 2013).
d. **Caudal:** Cantidad de agua residual que pasa por una sección determinada en una unidad de tiempo (MVCS, 2013).
e. **Circuito eléctrico externo:** Camino a través del cual se desplazan los electrones, similar con al circuito hidráulico, la corriente de agua se produce por la diferencia de nivel existente, la corriente eléctrica se produce por una diferencia de potencial eléctrico (electrones) entre dos puntos unidos por un conductor (Flores, 2013).
f. **Citocromo C:** Proteína pequeña, que funciona como transportador electrónico mitocondrial entre los complejos respiratorios III y IV (Gonzáles, 2015).
g. **Corriente eléctrica**: Desplazamiento de electrones a lo largo de un cuerpo conductor (Flores, 2013).

h. **Densidad de potencia:** Cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo. La potencia de salida suele ser normalizada con respecto a la superficie del ánodo, debido a que es el lugar en donde se produce la reacción (Franco y Ricaurte, 2018).

i. **DQO (Demanda Química de Oxígeno):** Cantidad de oxidante que reacciona con la muestra bajo condiciones controladas, la cantidad de oxidante consumido es expresado en términos de su equivalente en oxígeno (MVCS, 2013).

j. **Efluente:** Agua residual que sale de un proceso de tratamiento (MVCS, 2013).

k. **Energía eléctrica:** Trabajo desarrollado en un circuito eléctrico en un determinado tiempo, es igual al producto de la potencia eléctrica por tiempo (Flores, 2013).

l. **Flujo continuo:** Circulación del agua de un recipiente a otro.

m. **Flujo estable o de biopila.** Permanencia del agua en un recipiente.

n. **Generador eléctrico:** Dispositivo que proporciona un desnivel eléctrico, esto es, la fuerza electromotriz (fem), necesaria para mantener el movimiento de los electrones. por tanto una diferencia de potencial (ddp), y los electrones en su recorrido, producen un trabajo (Flores, 2013).

o. **Inhibición:** Compuesto químico secretado o producido por una bacteria que mata o inhibe el crecimiento de los femas microorganismos**.**(Bermudez y Bernal, 2018).

p. **Intensidad de corriente:** Cantidad de electricidad que circula por un conductor en la unidad de tiempo (1 s), la unidad es el amperio (A) (Flores, 2013).

q. **La Ley de Ohm:** Menciona que la intensidad de corriente que circula por un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia que éste presenta (Flores, 2013).

r. **Límite Máximo Permisible (LMP):** Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (MVCS, 2013).

s. **MFC.** Acrónimo en inglés de *Microbial Fuel Cell* es un sistema bioelectroquímico que emplea el metabolismo de las bacterias para generar electricidad, además de tratar el agua residual (Gonzáles, 2015).

t. **mT o mili Tesla:** Tesla, es la unidad de inducción magnética (del Sistema Internacional de Unidades (SI), fue nombrada así en honor al ingeniero e inventor Nikola Tesla (Ñacato, 2018).

u. **Oxígeno disuelto:** Concentración de oxígeno en el agua que depende de la temperatura y la presión atmosférica, condicionante para el desarrollo de la vida acuática (MVCS, 2013).

v. **Pili bacteriano:** Término procedente del latín que es el plural de pilus (pelo). Son apéndices cortos, a modo de pelos, anclados en la membrana de ciertas bacterias, involucradas en la conjugación bacteriana (Bermudez y Bernal, 2018).

w. **Planta de Tratamiento de las aguas Residuales Municipales (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten la depuración de los parámetros contaminantes contenidos en las aguas residuales domésticas o municipales (MVCS, 2013).

x. **Potencia eléctrica:** Cantidad de trabajo desarrollada en la unidad de tiempo, en un circuito eléctrico es igual al producto de la tensión por la intensidad, su unidad es el vatio (W) (Flores, 2013).

y. **Protocolo:** Documento guía que contiene pautas, instrucciones y procedimientos establecidos para desarrollar una actividad específica (MVCS, 2013)

z. **Puente de intercambio de protones:** Dispositivo que conecta las dos celdas, es un medio iónico con una barrera semipermeable en cada uno de sus extremos; por medio de estas barreras pueden pasar pequeñas moléculas e iones (Bermudez y Bernal, 2018).

aa. **Resistencia eléctrica:** Dificultad que presenta un material al paso de la corriente eléctrica, se representa con la letra R y su unidad es el ohmio (Ω) (Flores, 2013).

bb. **Sinergia:** La acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales (Bermudez y Bernal, 2018).

cc. **Voltaje o diferencia de potencial:** También se conoce como tensión eléctrica, es el desnivel eléctrico existente entre dos puntos de un circuito (Flores, 2013). También, es la energía necesaria para pasar un coulomb de electrones de un lugar a otro (Ñacato, 2018).

2.5. Hipótesis.

2.5.1. Hipótesis general.

El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70% utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

2.5.2. Hipótesis específicas.

- El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.
- La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70% utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

2.6. Variables.

2.6.1. Variable Dependiente.

- Potencial de generación de energía eléctrica.
  - Voltaje.
- Eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales.
  - Eficiencia de remoción de DQO.

2.6.2. Variables Independientes.

- Composición de las Celdas de Combustible Microbiano (MFC).
  - Celda N° 01: 40% de inóculo bacteriano y 60% de sustrato.
  - Celda N° 02: 50% de inóculo bacteriano y 50% de sustrato.
  - Celda N° 03: 60% de inóculo bacteriano y 40% de sustrato.

2.7. Operacionalización de variables.

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unid.	Instrumento
Variable Dependiente (efectos o respuesta o medición):						
Potencial de generación de energía eléctrica	Es la acción que producen los electrones al trasladarse de un punto a otro, falta o exceso de electrones en un material. **Fuente:** Bosques y Suacedo (2005).	La medida de diferencias de potencial o voltaje se efectúa con un multímetro.	Parámetros de eléctricos.	Voltaje	mV	Multímetro
Variable Dependiente (efectos o respuesta o medición):						
Eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales.	Es la reducción porcentual de indicadores apropiados, considerados en forma acumulativa o de determinadas sustancias. **Fuente:** Galvez (2013)**.**	Se establece para el indicador específico, una relación entre la carga que fluye en el sistema y la correspondiente carga en el flujo de salida. Se calcula: $\eta = \frac{F_E - F_S}{F_E}$	Parámetros de tratamiento del agua residual.	Eficiencia de remoción de DQO.	%	Colorímetro
Variable Independiente (causa o pregunta o manipulación):						
Composición de las celdas de Combustible Microbiano (MFC).	Es un reactor bioelectroquímico capaz de convertir la energía química en energía eléctrica a través de reacciones químicas catalizadas por bacterias. **Fuente:** Romero, Adrian, y Lugo (2012).	Las mediciones del volumen del material que contiene el sustrato y el inóculo a utilizar en las MFC serán de manera simple mediante una probeta.	Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	m^3	Probeta
			Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	m^3	Probeta
			Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	m^3	Probeta

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Ámbito temporal y espacial.

3.1.1. Ámbito temporal.

La presente investigación empezó el mes de noviembre del 2018 con la adquisición de materiales para la ejecución de la tesis, mientras que el 03 de enero del 2019 se empezó con la etapa experimental, caracterización del agua residual, recolección del inóculo microbiano (lodo activo de descarga del camal municipal de Huancavelica) y sustrato (agua residual municipal de la cuidad de Huancavelica); del 03 hasta el 18 de enero se instaló el sistema y se inició la aclimatación (etapa 1), del 18 de enero al 08 de febrero se prosiguió con la pre-prueba (etapa 2) donde se identificaron los problemas de operación, desde el 11 de febrero hasta el 11 de marzo se realizó la adquisición de datos, donde se realiza el monitoreo de los parámetros en estudio y a partir de la cuarta semana de marzo hasta la tercera semana de julio se procesaron los datos y se redactó el informe final de tesis. La etapa experimental duró 03 meses y toda la investigación duró 09 meses.

Tabla 2

Cronograma de actividades.

Actividades					Año 2018																							Año 2019																		
			Noviembre					Diciembre					Enero					Febrero					Marzo				Abril						Mayo					Junio					Julio		
	1	2	3	4	5	1	2	1	2	3	4	5	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Adquisición de materiales para la ejecución	X	X	X	X	X																																								
Construcción de las celdas						X	X	X																																					
Prueba de las celdas y sus componentes								X	X	X																																			
Instalación de las celas para iniciar la pre prueba											X																																		
Caracterización del agua residual en campo (DQO)											X																																		
Recolección del inóculo microbiano y del sustrato											X																																		
Instalación del sistema e inicio de la aclimatación.											X	X	X																																
Evaluación de la pre-prueba													X	X	X	X	X																												
Adquisición de datos de Voltaje																		X	X	X	X	X	X																						
Análisis de la DQO de entrada en laboraría externo													X					X																											
Análisis de la DQO de salida en laboraría externo														X	X	X	X		X	X	X	X	X																						
Análisis e interpretación de datos																								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
Redacción del informe final de tesis																																				X	X	X	X	X	X	X	X		
Presentación del informe final de tesis																																												X	X

3.1.2. Ámbito espacial.

- **Trabajo de laboratorio:** La tesis se ejecutó en las instalaciones del laboratorio central de la Universidad Nacional de Huancavelica, específicamente en el laboratorio de Biología y Microbiología donde se midieron los variables en estudio. **Lugar:** Paturpampa, **Distrito:** Huancavelica, **Provincia:** Huancavelica.

Figura 9. Ubicación geográfica de la zona para pruebas experimentales.

Fuente: Google Earth Pro

- **Trabajo de campo:** El trabajo de campo se realizó para extraer la muestra de agua residual municipal, la cual fue obtenida del desarenador administrado por EPS EMAPA - Huancavelica, ubicado en el margen derecho del rio Ichu, a la altura del kilómetro 03 de la carretera Huancavelica - Huancayo.

Figura 10. Ubicación geográfica de la zona para tomar muestras.

Fuente: Google Earth Pro

3.2. Tipo de investigación.

Se utilizó el tipo de investigación aplicada, ya que según Hernández, Fernández, y Baptista (2014), los aportes de este tipo de investigación están dirigidos a iluminar la comprensión y/o resolución de problemas de algún fenómeno o aspecto de la realidad perteneciente al dominio de estudio de una disciplina científica; se caracteriza por que busca la aplicación de conocimientos (Hernández et al., 2014).

3.3. Nivel de investigación.

El nivel de investigación fue explicativo, debido a que la investigación pretende explicar las causas de los sucesos que se estudian, van más allá de la descripción de conceptos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables (Hernández et al., 2014).

3.4. Población, muestra y muestreo.

3.4.1. Población:

La población de la tesis es el caudal de aguas residuales municipales generadas por la ciudad de Huancavelica que es igual a 20 m^3/s, el cual es administrada por la EPS EMAPA - Huancavelica en el año 2019 (EMAPA, 2008).

3.4.2. Muestra:

Para realizar las respectivas pruebas experimentales, se tomó como muestra un caudal de 1000 mL/mes, se tomó una muestra pequeña debido a que los ensayos son a escala de laboratorio. La celda N° 01 requiere 300 mL, la celda N° 02 requiere 250 mL, la celda N° 03 requiere 200 mL y los restantes 250 mL se utilizaron para los demás análisis, se considera la muestra representativa, debido a que el agua residual de la ciudad de Huancavelica desemboca en el punto muestreado.

3.4.3. Muestreo:

El muestreo del agua residual para las pruebas experimentales fue no probabilístico y por conveniencia, debido a que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con el propósito del investigador (Hernández et al., 2014), las muestras del agua residual, fueron tomas de manera deliberada de un punto de descarga. Se pretende que los casos sean estadísticamente representativos de la población.

Para el muestreo, se tomó una muestra de 1000 mL a la salida del desarenador, siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de PTAR municipales aprobada con Resolución Ministerial N° 273-2013-Vivienda (Ver Apéndice 7); para posteriormente llevarlas a las instalaciones del laboratorio y realizar las respectivas pruebas experimentales (tratamiento por medio de celdas de combustible microbiano).

Una parte de la muestra, fue enviada al laboratorio "RCJ LABS UNIVERSAL" de la ciudad de Huancayo, para analizar la DQO de entrada y salida de cada celda. Las muestras no se analizaron en un laboratorio acreditado, debido a la lejanía de las mismas (ciudad de lima), y por el presupuesto limitado con el que se contaba; sin embargo, se puede asegurar que los resultados son confiables, pues se trabajó siguiendo los métodos recomendados para aguas residuales (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*).

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.5.1. Técnicas de recolección de datos.

Se usó la técnica de la experimentación para realizar una acción y después la técnica de la observación para examinar las consecuencias del experimento (Hernández et al., 2014), donde se trabajó con celda de combustible microbiano (MFC) compuestas por inóculo y sustrato para después medir el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales; manipulando el inóculo en proporciones de 40%, 50% y

60% y sustrato en proporciones de 40%, 50 y 60% hasta obtener un volumen conjunto del 100% equivalente a 500 mL por cada celda.

3.5.2. Diseño de investigación.

La selección del diseño de investigación más adecuado para la presente tesis fue en función al objetivo del experimento; en este sentido, se aplicó el diseño para comparar tres tratamientos, debido a que se construyeron 03 celdas de combustible microbiana, los cuales representan los 03 tratamientos a comparar, el diseño particular más representativo de esta rama es el diseño completamente al azar (DCA) (Gutiérrez y De La Vara, 2013).

El diseño completamente al azar (DCA), es el más simple de todos los diseños que se utilizan para comparar tres tratamientos, dado que solo considera dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio; se llama completamente al azar porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio, de manera que los posibles efectos se vayan repartiendo equivalentemente entre todos los tratamientos (Gutiérrez y De La Vara, 2013).

ANOVA para el diseño completamente al azar (DCA)

El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales para realizar las tres comparaciones. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuyen cada fuente de variación en el experimento; en el caso del DCA, se separan la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error; cuando la primera predomina “claramente” sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto significativo, o, dicho de otra manera, las medias son diferentes; cuando los tratamientos no predominan (contribuyen igual o menos que el error), se concluye que las medias son iguales (Gutiérrez y De La Vara, 2013).

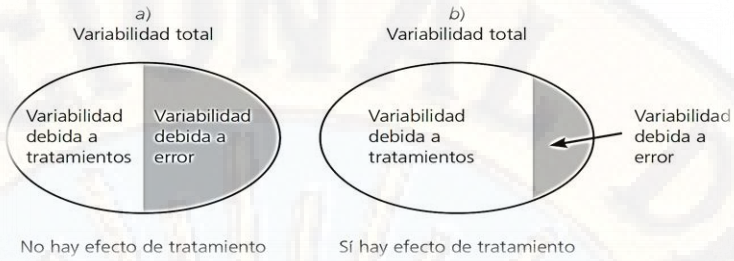


Figura 11. Separación de la variación total en sus componentes en un DCA.
Fuente: Gutiérrez y De La Vara (2013)**.**

El objetivo del análisis de varianza (ANOVA) en el DCA es probar la hipótesis de significancia de los tratamientos con respecto a la media de la correspondiente variable de respuesta (Gutiérrez y De La Vara, 2013).

$$H_a: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

$$H_o: \mu_1 = \mu_2 = \mu_k = \mu$$

Donde μ_i es el efecto del tratamiento i sobre la variable respuesta. Si se acepta H_o se confirma que los efectos sobre la respuesta de los k tratamientos son estadísticamente nulos, y en caso de rechazar se estaría concluyendo que al menos un efecto es significativo (Gutiérrez y De La Vara, 2013).

Para el estudio del potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales se utilizó el diseño de completamente al azar (DCA) cuyo modelo estadístico es el siguiente:

$$\boldsymbol{Y_i = \mu + T_i + e_i}$$

$$\boldsymbol{Z_i = \mu + T_i + e_i}$$

Dónde:

Y_i Se refiere al potencial de generación de energía eléctrica de las aguas residuales municipales en estudio.

Z_i Se refiere a la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales en estudio.

$\boldsymbol{u}$ Es la media general de la variable expuesta de cualquier unidad experimental.

T_i Es el efecto del tratamiento i, variando i de 1, 2 y 3.

e_{ij} Es la variable aleatoria error.

3.5.3. Parámetros de medición.

El desempeño de las celdas de combustible microbiana (MFC) fue evaluado a través del potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento del agua residual municipales. Para el potencial de generación, los factores de desempeño se establecieron midiendo los indicadores de voltaje. En cuanto a la eficiencia de tratamiento se midió en laboratorio el parámetro fisicoquímico de DQO, para luego calcular el porcentaje de remoción, con los cuales se caracteriza el comportamiento de la materia orgánica biodegradable y se determina la eficiencia de remoción de DQO de cada celda.

- **Voltaje (V):** es uno de los principales parámetros que se estudia cuando se habla del potencial de generación de energía eléctrica, sin embargo, una celda de combustible microbiana (MFC), aunque trabaje con los principios fundamentales de una celda de combustible convencional las mediciones y las formas de calcularlos es distinta; El voltaje se define como la cantidad de voltios que actúan o genera un aparato, prototipo o sistema eléctrico, puede medirse con diferentes tipos de instrumentos (Bermudez y Bernal, 2018) (Franco y Ricaurte, 2018).

$$V = I * R_{ext}$$

Dónde: V= voltaje en Voltios (V); I = intensidad de corriente en amperios (A) y R_{ext} = resistencia externa en ohmios (Ω)

El voltaje de una MFC no se comporta de la misma manera que una celda de combustible convencional, debido a la presencia de bacterias, entre el proceso biológico la bacteria se encuentra la colonización del electrodo mediante su crecimiento, generación de enzimas o estructuras para la transferencia y transporte de los electrones extracelularmente.

- **Intensidad de corriente eléctrica (I):** La intensidad es la cantidad de energía que circula a través del circuito:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Dónde: I = intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A); Q = Carga eléctrica en Culombios (C); t = Tiempo en segundos (s).

- **Potencia (P):** La potencia indica la cantidad de energía entregada o generada por la MFC en un tiempo determinado; cuanto mayor sea la potencia mayor es la energía eléctrica suministrada por la MFC; la potencia depende del voltaje de la celda y la corriente producida los cuales se vinculan mediante la ecuación de la Ley de Ohm (Franco y Ricaurte, 2018).

$$P = V * I = I^2 * R_{ext} = \frac{V^2}{R_{ext}}$$

Dónde: P = potencia en Watts (W); V= voltaje en Voltios (V); I = intensidad de corriente en amperios (A) y R_{ext} = resistencia externa en ohmios (Ω)

- **Densidad de potencia (DP):** La densidad de potencia es la cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo. La potencia de salida suele ser normalizada con respecto a la superficie del ánodo, debido a que es el lugar en donde se produce la reacción (Franco y Ricaurte, 2018).

$$DP = \frac{P}{A_{anodo}} = \frac{V^2}{A_{anodo} * R_{ext}}$$

Dónde: DP = densidad de potencia del ánodo en Watts por metro cuadrado (W/m^2) y $A_{ánodo}$ = área del ánodo (m^2)

- **Demanda química de oxigeno (DQO):** La DQO determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (Franco y Ricaurte, 2018).

- **Porcentaje de remoción de la DQO:** El porcentaje de remoción de la DQO determina la eficiencia de tratamiento del agua residual a partir de un valor de entrada y otro valor de salida, mediante la siguiente formula en términos porcentaje:

$$\eta = \frac{F_E - F_S}{F_E}$$

Dónde: η = eficiencia en porcentaje (%), FE = carga de entrada (mg/L o ppm), FS = carga de salida (mg/L o ppm).

3.5.4. Instrumentos de recolección de datos.

Para la presente investigación se utilizó como instrumento de recolección de datos los equipos de medición de parámetros: el voltaje (03 veces por dia) y los valores de DQO de ingreso y salida (01 vez por día), durante 28 días del mes de febrero (01 mes) para cada MFC, los instrumentos fueron los siguientes:

- **Multímetro PRASEK PREMIUM PR-75C:** para la captura de voltaje e intensidad de corriente.
- **Multiparametro Hach HQ40D:** Para determinar el pH, la Temperatura, Oxígeno disuelto y Conductividad eléctrica de agua residual a tratar.
- **Termómetro ambiental:** Para determinar la temperatura del ambiente.
- **Colorímetro:** En el laboratorio RCJ Labs Universal para determinar DQO.

Validez. El instrumento de recolección de datos, fue validada por el certificado calibración de los equipos utilizados (ver apéndice 2).

3.5.5. Instrumentos de recolección de datos de laboratorio.

El procedimiento para la construcción de las MFC, está detallado y esquematizado a paso a paso en el Apéndice 1. Mientras que, el procedimiento para la recolección de datos de laboratorio se realizó en dos etapas, estos son etapa de aclimatación y etapa de pre-prueba, los cuales se especifican a continuación.

a. Etapa de Aclimatación (etapa 1).

Esta etapa se inicia con la construcción y prueba del prototipo de MFC (detallado en el apéndice 1), seguidamente con la recolección de inóculo microbiano y sustrato, prosiguiendo con la caracterización del agua residual y por último la instalación del prototipo para inicial la aclimatación.

- **Dimensiones de las celdas.**

Se construyeron tres celdas tipo H de igual geometría y volumen en frascos de plástico de 500 mL cuadrado tipo rosca (7cm x 7cm x 10cm).

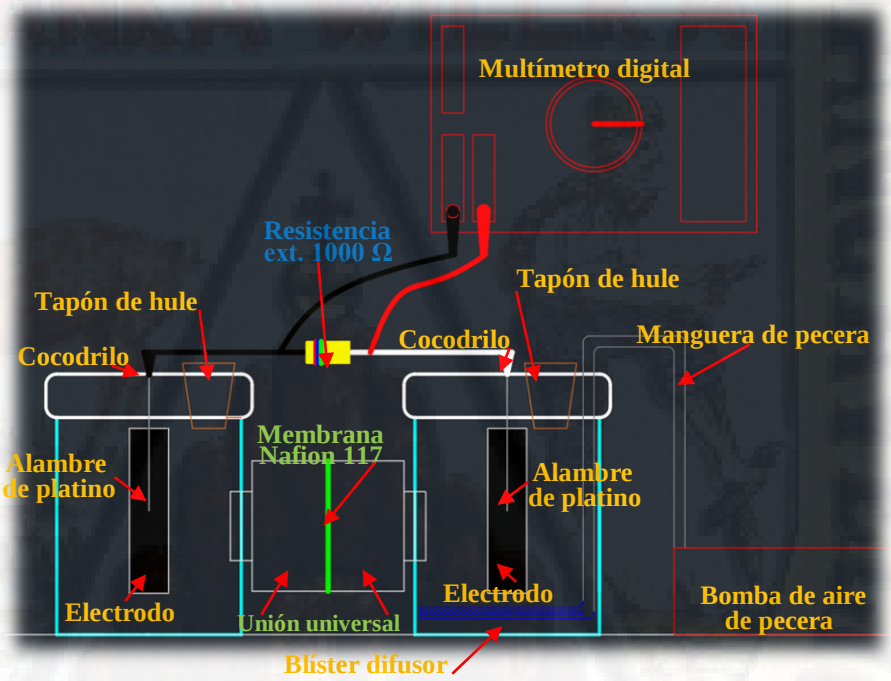


Figura 12. Diseño de los componentes de la MFC.

Figura 13. Construcción de los componentes de la MFC.

La cámara anódica: consta de 01 tapón de hule (1" de longitud, 1/2" de diámetro superior y 3/4" de diámetro interior) para mantener condiciones anaeróbicas, medir los factores ambientales intervinientes y ventilar la celda; 01 electrodo de tela de carbón de platino sobre Vulcan 0.03 mg/cm² al 20% de 3.5 cm por 8 cm para oxidar los electrones; y 10 cm de alambre de platino de 0.1 milímetro de diámetro para transportar los electrones.

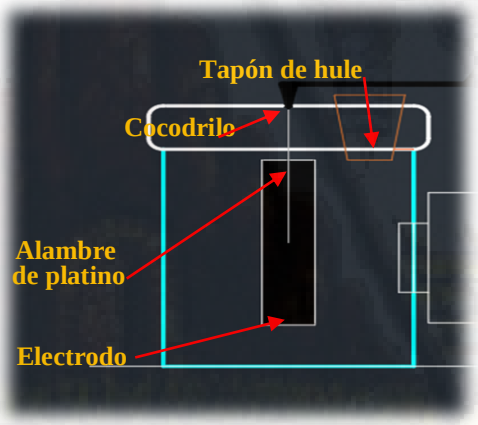


Figura 14. Componentes de la cámara catódica.

La cámara catódica: consta de 01 tapón de hule (1" de longitud, 1/2" de diámetro superior y 3/4" de diámetro interior) para monitorear los factores ambientales intervinientes y añadir agua destilada; 01 electrodo de tela de carbón de platino sobre Vulcan 0.03 mg/cm² al 20% de 3.5 cm por 8 cm para reducir los electrones; 10 cm de alambre de platino de 0.1 milímetro de

diámetro para transportar los electrones; y 01 sistema de aireación que consta de un blíster difusor color azul, 50 cm de manguera de 1/4" de pulgada conectada a una bomba de aire de pecera NS 350 (consumo: 5 watts, fuerza max: 400 L/H, frecuencia: 60/50Hz y voltaje: 220-240 V).

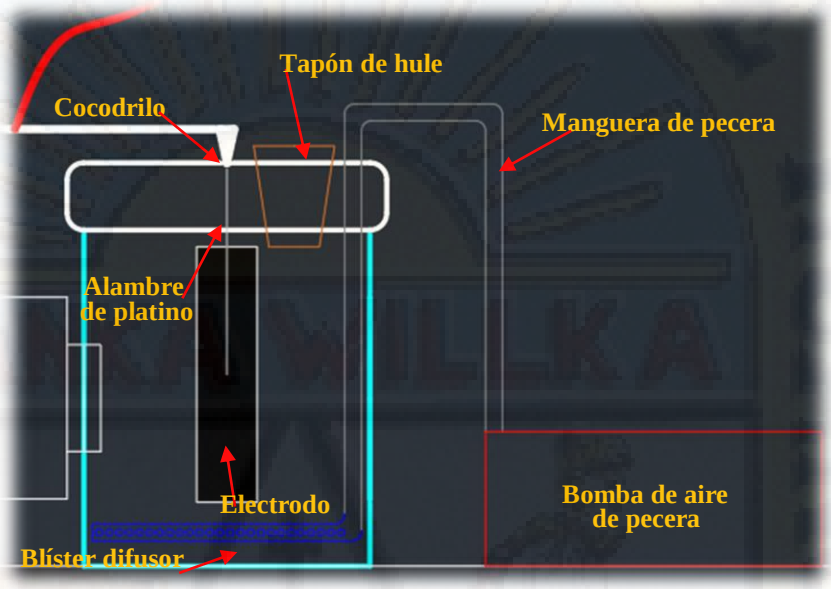


Figura 15. Componentes de la cámara anódica.

El puente de intercambio de protones: consta de 01 unión universal de PVC de 2” diámetro; 02 adaptadores universales de 2” de diámetro; y un disco de 2 cm de diámetro de membrana selectiva de protones Nafion 117 de 183 micrómetros de espesor para seleccionar el paso de protones de la cámara anódica a la catódica.

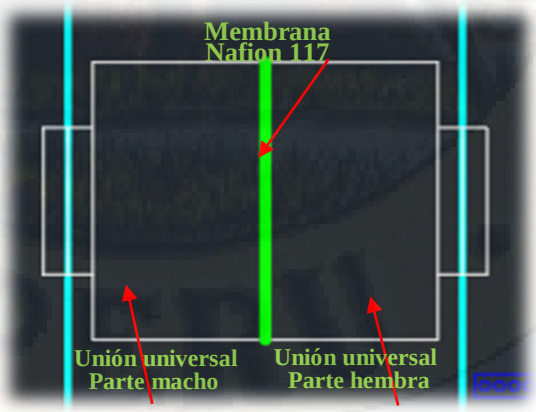


Figura 16. Componentes del puente de intercambio de protones.

El circuito eléctrico externo: consta de 02 conexión de cocodrilos medianos con sus respectivos cables de cobre de 0.1” de diámetro; y resistencias externas de 1000 Ω para controlar el paso de electrones todo ello conectado a un multímetro digital PRASEK PR-75C para la lectura y registro de datos.

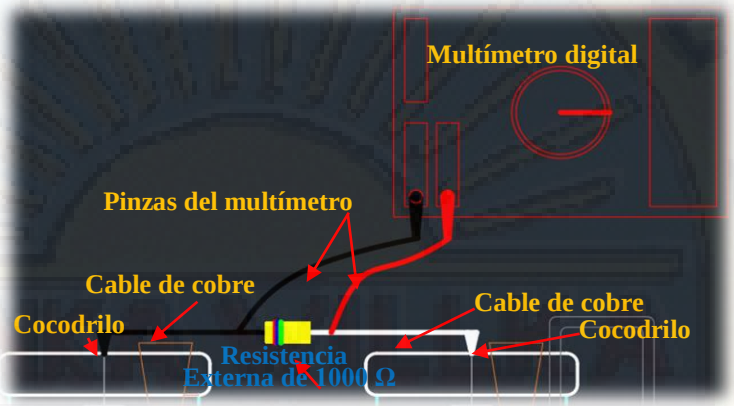


Figura 17. Componentes del circuito eléctrico externo.

- **Esterilización de las cámaras.**

La esterilización de las cámaras anódicas y catódicas de las MFC se realizó mediante la adición de alcohol de una concentración de 96 °C, no se utilizó la autoclave u horno para la esterilización debido a que, al probarse en estas, las cámaras resultaron por deformarse ante el calor, pues estas son de material plástico; por tal motivo, se decidió por alcohol por más que nos genere un error aleatorio, el cual se evidenciara en la prueba de hipótesis.

Figura 18. Esterilización de las cámaras anódicas y catódicas.

- **Activación de la membrana de intercambio de protones.**

La activación de la membrana se realizó con el objetivo de mejorar la conductividad de iones. La membrana de intercambio protónico (PEM por sus siglas en inglés) fue Nafion 117 de 183 micrómetros de espesor, adquirida de la empresa certificada y de calidad *Fuel Cell Store* de Estados Unidos, por ser la más usada en el campo de las MFC y se procedió a su activación según bibliografía encontrada. Se inició cortando la membrana Nafion 117 en discos según las dimensiones requeridas (2 cm de diámetro). El procedimiento de activación se llevó a cabo se llevó a cabo mediante "lavados" secuenciales a una temperatura de 100°C (Carmona, 2008).

1) Inmersión de la membrana en una solución de H_2O_2 al 30% (% v/v) durante 1 h con la intención de remover impurezas orgánicas de la superficie (Carmona, 2008).

2) Inmersión de la membrana en H_2O desionizada durante 1 h para hidratarla y remover impurezas que hayan quedado (Carmona, 2008).

3) Inmersión de la membrana en una solución de H_2SO_4 0.5M durante 1 h que removerá iones metálicos contaminantes (Carmona, 2008).

4) Inmersión de la membrana en H_2O desionizada durante 1h con lo cual se remueve el H_2SO_4 de la superficie y se hidrata la membrana (Carmona, 2008).

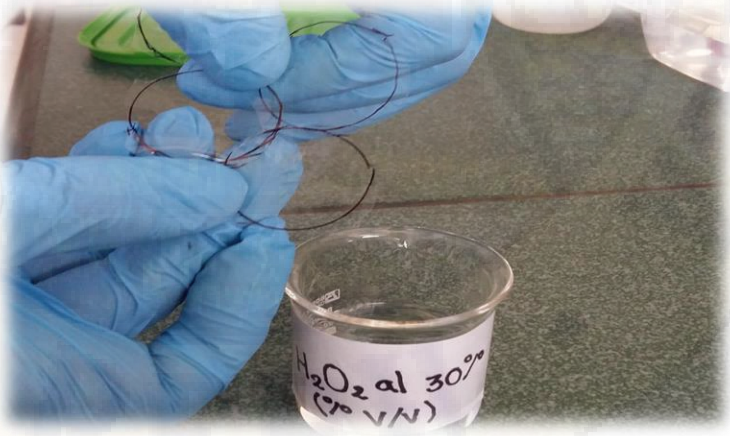


Figura 19. Activación de la membrana Nafion 117.

- **Prueba hidráulica.**

La prueba hidráulica consistió en encontrar las posibles fugas de agua del sistema, verificado una correcta impermeabilización mediante el aditivo Soldimix de 48 horas, luego de varias pruebas se logró impermeabilizar las cámaras de la MFC, y se comprobó la ausencia de fugas mediante un colorante rojo y un papel absorbente.

Figura 20. Prueba hidráulica de las cámaras.

- **Esterilización de los electrodos y conductores.**

La esterilización de los electrodos y conductores se realizó con el objetivo de crear un medio de crecimiento propicio para las bacterias electrogénicas. Los Electrodo fueron de Tela de Carbón de platino sobre Vulcan 0.03 mg/cm² al 20%, adquirida de la empresa certificada y de calidad *Fuel Cell Store* de Estados Unidos, por ser una de las más usadas en el campo de las MFC y se procedió a su activación una vez conectado a los conductores manteniéndola en agua destilada por 24 horas, se limpiaron con ácido clorhídrico 0.5 M y fueron lavados con agua destilada previas a su funcionamiento.

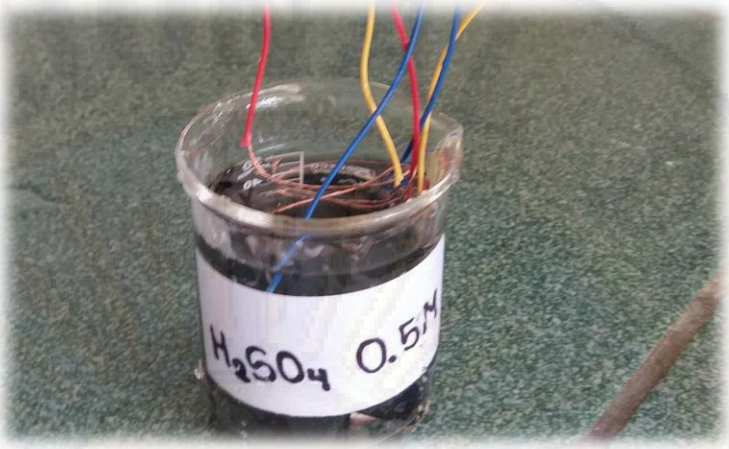


Figura 21. Esterilización de los electrodos y conductores.

Caracterización del agua residual.

La caracterización del agua residual municipal se realizó en el punto de descarga de aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica (Desarenador de EMAPA) el día 03 de enero de 2019, y se envió al laboratorio "RCJ LABS UNIVERSAL" para determinar la DQO inicial a tratar y hacer un análisis previo para su tratamiento mediante Celdas de Combustible Microbiano (MFC).

Tabla 3

Resultados de laboratorio de la caracterización del agua residual

Id muestra	**Parámetro**		**LMP (003-2010-MINAM) DQO (mg/L)**
	Fecha	**DQO (mg/L)**	
MC-01	03 - 01 - 19	258.5	200.0

Fuente: Resultados de análisis de DQO en el laboratorio "RCJ LABS UNIVERSAL"

El valor de la caracterización del agua residual municipal de la ciudad de Huancavelica indica que esta agua a la salida del desarenador (pre-tratamiento) supera por los Límites Máximos Permisibles D.S. 003-2010-MINAM, por lo tanto, implica una gran contaminación al rio Ichu. Por otra parte, esta agua residual es apta para un tratamiento secundario debido a que con una eficiencia de remoción del 70% propuesto por las MFC, serían más que suficientes para no causar impactos negativos al medio ambiente.

- **Recolección del inóculo microbiano.**

El inóculo bacteriano se recolectó del lodo activo de descarga ubicado afuera del camal municipal de Huancavelica un volumen de 1800 mL, el cual fue transportado en un recipiente de plástico estéril al laboratorio para su respectiva utilización, siguiendo el mismo protocolo de monitoreo que agua residual (Resolución Ministerial N° 273-2013-Vivienda).

Figura 22. Recolección del inóculo microbiano.

- **Recolección del sustrato.**

El sustrato se recolecto del mismo lugar donde se realizó la caracterización, en el punto de descarga de aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica (Desarenador de EMAPA), el cual fue extraído un volumen de 01 Litro y transportado al laboratorio en un recipiente de plástico estéril color ámbar de acuerdo a los protocolos (R.M. N° 273-2013-Vivienda).

Figura 23. Recolección del sustrato.

- **Periodo de aclimatación.**

Para poder conseguir una mejor estabilidad de las celdas, es necesario realizar una aclimatación previa al funcionamiento, para lograr que tanto el inóculo bacteriano, el sustrato y los electrodos estén adaptados y no se genere ningún tipo de contaminación, debido a este proceso el voltaje al inicio del monitoreo ya no registra valores cercanos a cero.

La aclimatación se inició una vez que los electrodos estaban esterilizados, del mismo modo el inóculo bacteriano y el sustrato estaban en el laboratorio; el procedimiento fue el siguiente:

1) En un recipiente estéril de plástico de 1.8 Litros de capacidad, se mezcló 0.8 Litros de inóculo microbiano (lodo negro) con 0.8 Litro de sustrato (agua residual municipal).
2) Una vez mezclados correctamente, se introdujeron los electrodos estériles y se cerró el recipiente herméticamente, para evitar el ingreso del oxígeno.
3) Realizado este procedimiento se procedió con el periodo de aclimatación por 15 días a temperatura ambiente, diariamente se destapo por 01 minuto para la ventilación de gases como el metano y para la agitación homogénea con una bagueta estéril.

Figura 24. Inicio del periodo de aclimatación.

b. Etapa de Pre-Prueba (etapa 2).

En esta etapa se realizan pruebas previas al funcionamiento de las celdas, para poder obtener información de posibles dificultades encontradas durante esta etapa se realiza la adquisición de datos de la pre-prueba y el análisis de formas de mejorar el funcionamiento, corrigiendo todos los errores encontrados.

- **Dificultades encontradas durante la etapa de pre-prueba.**

La primera dificultad encontrada durante la ejecución de la segunda etapa fue con el inóculo microbiano, el cual según bibliografía especializada al inicio se había considerado utilizar lodo activo de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Huancavelica denominado MILLPO – EMAPA, el cual resulto tener presencia de metales; y al combinarlas con las bacterias presentes en el agua residual terminaron por inhibirse mutuamente, debido a la posible gran cantidad de aluminio que contenía el lodo activo de PTAP (se evidencio formación de oxidación), por estas razones, se decidió cambiar de inóculo bacteriano por el inóculo de descarga de aguas residuales del camal municipal de Huancavelica.

Figura 25. Celdas inoculadas con lodo activo de PTAP.

La siguiente dificultad fue por el uso de conductores de cobre, al utilizarlos durante una semana sumergidos al agua, estos se oxidaron, desprendieron el óxido y contaminaron el inóculo bacteriano, entre otros efectos, los conductores terminaron por romperse y paralizar el transporte de electrones por el circuito eléctrico externo; este problema se solucionó comprando

alambres de platino, los cuales según bibliografía son buenos conductores y no tóxicos para las bacterias.

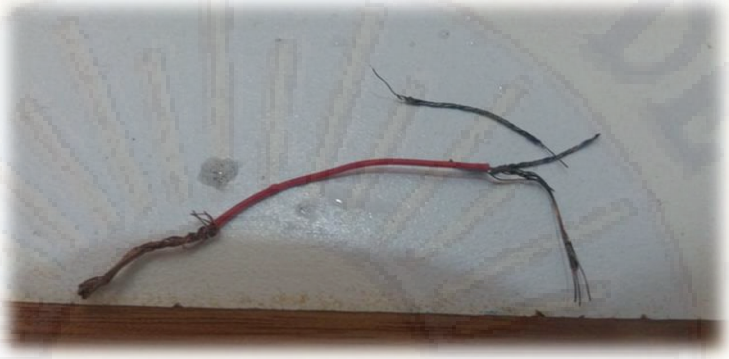


Figura 26. Conductores de aluminio oxidados y rotos.

La siguiente dificultad fue con la adquisición de datos de potencial de generación de energía eléctrica, en un inicio se consideró utilizar un sensor de voltaje y amperaje, el cual adquiere los datos cada 2 minutos, sin embargo, termino por registrar valores erróneos, debido a que el mínimo valor que podía registrar el sensor era de 1.5 voltios, y las celdas solo generan alrededor de 0.5 voltios, razón por la cual se decidió remplazar el uso de los sensores por un multímetro digital.

Figura 27. Error al adquirir datos con sensor de voltaje y amperaje.

La ultima dificultad de consideración se evidencio al momento de esterilizar las cámaras anódicas y catódicas, las cuales son de material plástico y cuando fueron sometidas a una alta temperatura del horno de esterilización

terminaron por deformarse, debido al gran calor presente, razón por la cual se decidió esterilizar todos los componentes con alcohol puro de 96°C.

Figura 28. Deformación de las cámaras por someter a excesivo calor.

3.6. Técnicas y procesamiento de análisis de datos.

3.6.1. Técnica de análisis de datos.

Siendo la presente investigación un diseño para comparar tres tratamientos, los tratamientos corresponden a cada celda, se instaló 03 celdas de combustible microbiano (MFC).

En cada celda se colocó un volumen de 500mL equivale al 100% de contenido:

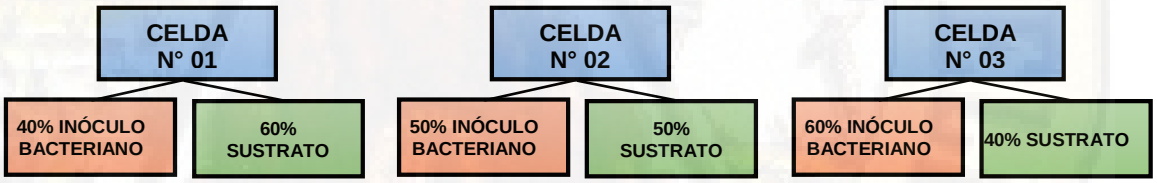


Figura 29. Tratamientos usados en los experimentos.

Se comparó los 03 tratamientos, los cuales tienen diferentes proporciones de inóculo y sustrato, para identificar la celda con el mejor comportamiento de potencial de generación energía eléctrica, medida en mV y la celda con la mejor eficiencia de tratamiento de agua residual municipal, medida en eficiencia de remoción de DQO.

3.6.2. Procesamiento de datos.

El procesamiento de datos se realizó mediante los programas computacionales SAS para la prueba de hipótesis y Excel 2016 para manejo de datos, ambos en su versión de prueba gratuita.

Se recopilo los datos analizados creando una matriz para cada variable dependiente para la etapa de contrastación de hipótesis. Utilizando el análisis de varianza de ANOVA con un Diseño Completamente al Azar (DCA) simple y la prueba de Tukey para determinar entre que tratamientos hay significancia estadística e identificar si alguna celda supera el valor planteado en la Hipótesis planteada, se trabajó con un nivel de significancia de 0.05.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de información.

En la presente tesis, se detallan los resultados del potencial de generación de energía eléctrica (voltaje) y de la eficiencia de tratamiento del agua residual municipal (eficiencia de remoción de DQO); evaluados en las 03 celdas de combustible microbiano (MFCs) y en las 04 semanas de tiempo de monitoreo.

4.1.1. Potencial de generación de energía eléctrica (Voltaje).

- En la tabla 4, se presentan los voltajes de la primera semana obtenidos de las 03 celdas de combustible microbiana (MFCs), en función al tiempo de monitoreo a partir del día 01 al 07, realizándose tres monitoreos por día en los 07 días de evaluación, haciendo un total de 21 datos de voltaje por celda.

Tabla 4

Voltaje en la semana 01 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

Voltaje en la semana 01 (celda 1, celda 2 y celda 3)						
Celda	Composición	Fi	Unidad	Media	Límite Máximo	Limite Mínimo
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	21	mV	371.43 [b]	420	291
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	21	mV	521.24 [a]	571	463
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	21	mV	355.38 [b]	435	314

Se determino el voltaje en la primera semana en miliVoltios (mV), donde la celda N° 02, es significativamente superior con una media de 521.24 mV, estadisticamente superior a la celda N° 01 y 03.

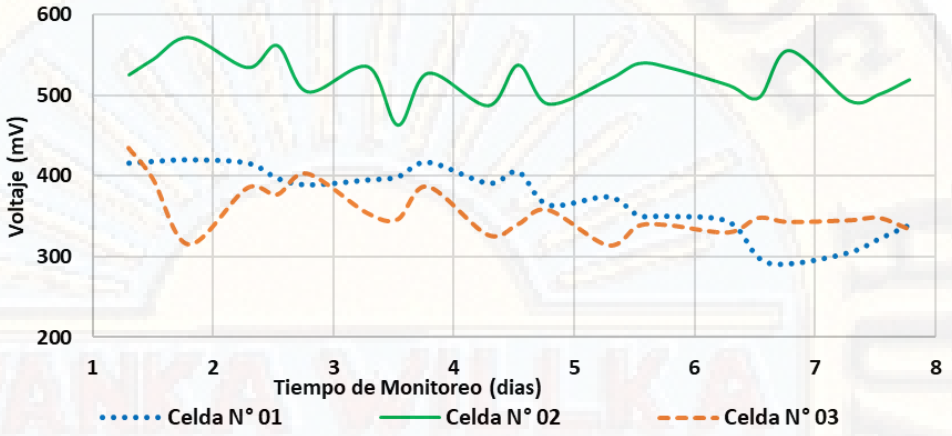


Figura 30. Resultados del voltaje en la semana 01 de las MFCs.

Como se puede observar en la figura 30, en la primera semana, la mejor tendencia es para la celda N° 02 donde hubo igual cantidad de sustrato (agua residual municipal) e inóculo bacteriano (lodo activo), el cual al encontrarse en un punto óptimo generó más energía eléctrica, debido a ello, se presentan los mejores resultados de potencial de generación de energía eléctrica (voltaje).

- Asimismo, la tabla 5, presenta los voltajes de la segunda semana obtenidos de las 03 celdas de combustible microbiana (MFCs), en función al tiempo de monitoreo a partir del día 08 al 14, se realizo tres monitoreos por dia (07:00 horas, 13:00 horas y 19:00 horas).

Tabla 5

Voltaje en la semana 02 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

Voltaje en la semana 02 (celda 1, celda 2 y celda 3)						
Celda	Composición	Fi	Unidad	Media	Límite Máximo	Limite Mínimo
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	21	mV	354.86 [b]	399	285
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	21	mV	393.10 [a]	521	311
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	21	mV	375.43 [ab]	451	323

Se determino el voltaje en la segunda semana en miliVoltios (mV), donde la celda N° 02, obtuvo el mayor voltaje con 393.10 mV, estadísticamente iguales a la celda N° 03 con 375.43 mV.

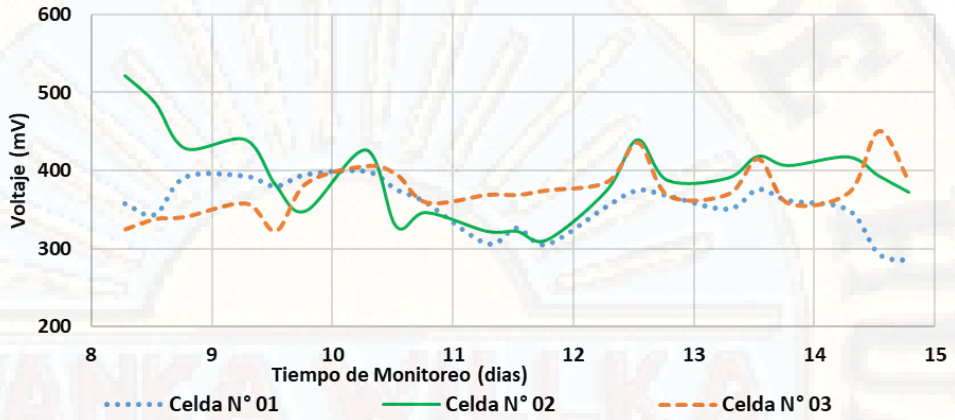


Figura 31. Resultados del voltaje en la semana 02 de las MFCs.

Se aprecia en la figura 31, en la segunda semana, las mejores tendencias que además son estadísticas iguales las presentan las celdas N° 02 y 03 donde hubo mayor cantidad de sustrato que inóculo, de los cuales generaron energía eléctrica, presentándose ligeramente mayores valores de potencial de generación de energía eléctrica (voltaje).

- En la tabla 6, se presentan los voltajes de la tercera semana obtenidos de las 03 celdas de combustible microbiana (MFCs), en función a su respectivo tiempo de monitoreo, se evaluó a partir del día 15 al 21, con tres monitoreos por día.

Tabla 6

Voltaje en la semana 03 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

Voltaje en la semana 03 (celda 1, celda 2 y celda 3)						
Celda	Composición	Fi	Unidad	Media	Límite Máximo	Limite Mínimo
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	21	mV	337.10 [a]	406	274
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	21	mV	304.81 [a]	503	151
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	21	mV	241.62 [b]	364	151

Se determino el voltaje en la tercera semana en miliVoltios (mV), donde la celda N° 01 (40% inóculo y 60% sustrato) y la celda N° 02 (50% inóculo y 50% sustrato) son estadisticamente iguales; y obtubieron los mayores voltaje de 337.10 mV y 304.81 mV respectivamente.

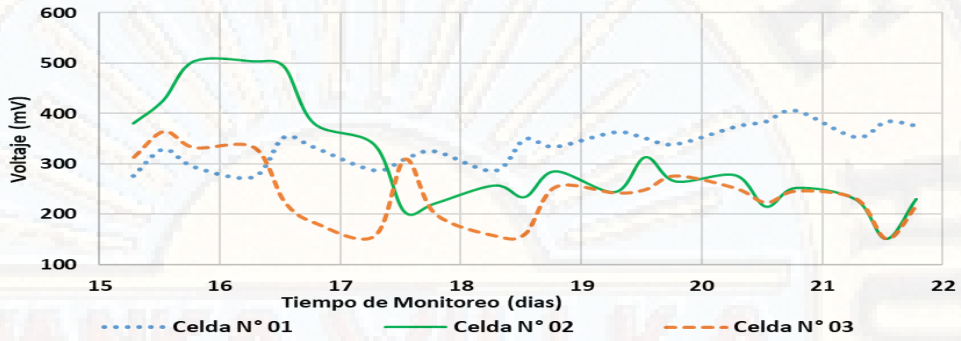


Figura 32. Resultados del voltaje en la semana 03 de las MFCs.

Se aprecia en la figura 32, que en la tercera semana las mejores tendencias son para las celdas N° 01 y 02 debido a que contienen mayor proporción de sustrato que inóculo, de los cuales se generan mayor cantidad de energía eléctrica, mientras que la celda N° 03 tienen a decrecer debido a que contiene menor porción de sustrato que inóculo, observando un agotamiento de sustrato para generar energía eléctrica.

- Los voltajes de la cuarta semana (tabla 7) obtenidos de las 03 celdas de combustible microbiana (MFCs), en función a su respectivo tiempo de monitoreo evaluados del día 22 al 28, con tres monitoreos por día.

Tabla 7

Voltaje en la semana 04 de las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

Voltaje en la semana 04 (celda 1, celda 2 y celda 3)						
Celda	Composición	Fi	Unidad	Media	Límite Máximo	Limite Mínimo
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	21	mV	388.10 [a]	388.10	349
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	21	mV	196.48 [c]	196.48	99
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	21	mV	234.71 [b]	234.71	156

Se determino el voltaje en la cuarta semana en miliVoltios (mV), donde la celda N° 01, obtuvo el mayor voltaje y fue estadisticamente superior con 388.10 mV en comparacion con las celdas N° 02 y 03.

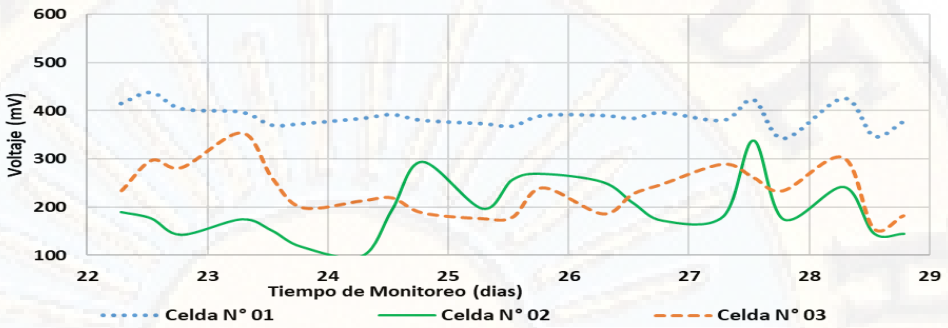


Figura 33. Resultados del voltaje en la semana 04 de las MFCs.

Como se puede observar en la figura 33, en la cuarta semana la mejor tendencia es para la celda N° 01, porque contiene mayor porcentaje sustrato inicial y a largo plazo genera los mejores resultados de potencial de generación de energía eléctrica (voltaje), debido a que la poca cantidad de bacterias de esta celda, recién empiezan a genera mayor voltaje debido a su reproducción y suficiente alimento.

- Adicionalmente, se presenta la tabla 8, en la cual se compara el comportamiento del voltaje obtenido de las 03 celdas de combustible microbiano (MFCs) a lo largo de las 04 semanas del tiempo de monitoreo.

Tabla 8

Voltaje en las 03 Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

				Voltaje en las en las 03 MFCs			
MFCs	Composición	fi	Unidad	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	84	mV	371.43^{b}	354.86^{b}	337.10^{a}	388.10^{a}
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	84	mV	521.24^{a}	393.10^{a}	304.81^{a}	196.48^{c}
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	84	mV	355.38^{b}	375.43^{ab}	241.62^{b}	234.71^{b}

Medias con letras diferentes en una misma columna, son estadisticamente significativas (diferentes).

Se determino el voltaje de las 04 semanas en miliVoltios (mV), donde la celda N° 02 a la primera semana, obtuvo estadisticamente el mayor voltaje de 521.24 mV.

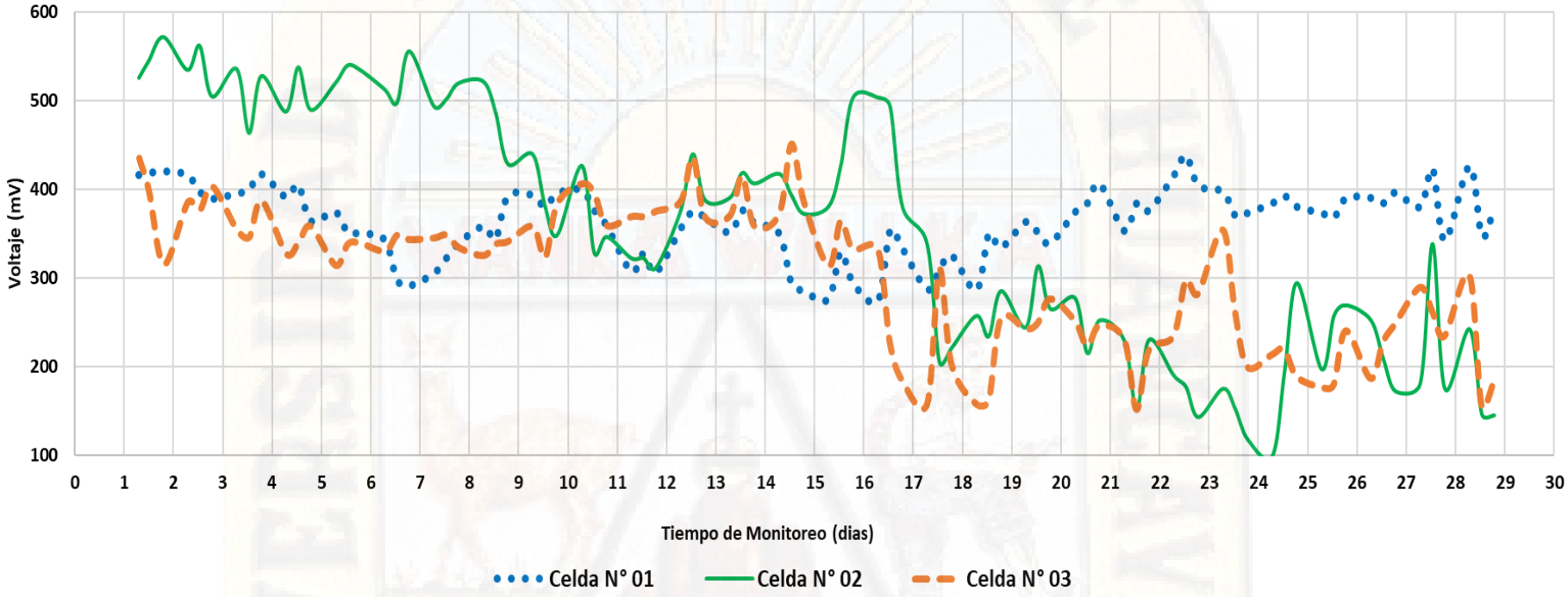


Figura 34. Resultados del voltaje en las 03 MFCs.

Como se puede observar en la figura 34, En la celda N° 01 se aprecia una tendencia del voltaje más constante a lo largo del tiempo de monitoreo sin superar un límite máximo de 438 mV en la última semana ni un límite mínimo de 274 mV en la penúltima semana; a razón que esta celda, presenta mayor porcentaje de sustrato que inóculo, y por ende la poca cantidad de bacterias iniciales tienen suficiente alimento para generar electricidad por más tiempo, considerando que estas también se reproducen y generan más energía eléctrica.

Mientras tanto, en la celda N° 02, se observa como máximo valor de voltaje a 571 mV en la primera semana y un mínimo de 99 mV en la última semana, presentando una tendencia decreciente; debido a que el porcentaje de inóculo bacteriano y sustrato están en igual proporción y generan más energía eléctrica desde el inicio del tiempo de monitoreo y a medida que transcurre el tiempo las bacterias agotan el sustrato, mueren y dejan de generar energía eléctrica.

Por último, en la celda N° 03, se evidencia un comportamiento lineal en las dos primeras semanas; y un descenso del voltaje en las dos últimas semanas, registrándose un máximo voltaje de 451 mV en la segunda semana y un mínimo de 151 mV en la tercera semana; esto debido a que la celda cuenta con menor porcentaje de sustrato y por ende las bacterias generan voltaje hasta agotar el poco sustrato y desciende por la falta de la misma, a medida que pasa el tiempo de monitoreo.

Cabe resaltar, que en las tres celdas se aprecia un descenso en la generación de voltaje, los cuales concuerdan con dos factores principalmente: la proporción de inóculo bacteriano y el agotamiento del sustrato (materia orgánica) al transcurrir el tiempo; y también a los factores ambientales intervinientes debido a la muerte de las bacterias y la presencia de oxígeno disuelto en la cámara anódica.

4.1.2. Eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (Eficiencia de remoción de DQO).

- En la tabla 9, se muestra la demanda química de oxigeno (DQO) en la semana 01 obtenidas de las 03 celdas de combustible microbiano (MFCs), a partir de las cuales se determina las eficiencias de remoción de DQO, tomando como punto de entrada la DQO al inicio de la semana y como punto de salida la DQO promedio de la semana luego del tratamiento; por otra parte, se comparó la DQO de salida con el LMP (D.S 003-2010 MINAM), el tiempo de monitoreo fue a partir del día 01 al 07, realizándose un monitoreo por día en los 07 días de evaluación, haciendo un total de 07 datos de eficiencia de remoción de DQO por celda.

Tabla 9

DQO en la semana 01 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)

Demanda química de oxigeno (mg/L) en las MFCs en la semana 01						
MFC	fi	Composición	Punto de entrada a la celda (*mg/L*)	Punto de salida de la celda (*mg/L*)	Eficiencia de remoción de DQO promedio (%)	D.S 003-2010 MINAM LMP (*mg/L*)
Celda N° 01	7	40% inóculo y 60% sustrato	259.00	213.39	17.61 [b]	200
Celda N° 02	7	50% inóculo y 50% sustrato	259.00	143.09	44.75 [a]	200
Celda N° 03	7	60% inóculo y 40% sustrato	259.00	155.52	39.95 [ab]	200

Se determinó la DQO de salida de la semana 01 en miligramos por litro (mg/L), cumpliendo los LMP en la Celda N° 02 y 03 con 143.09 mg/L y 155.52 mg/L, respectivamente.

Mientras tanto, la eficiencia de remocion de DQO de la semana 01, muestra que la celda N° 02 y 03, son significativamente superiores con promedios de 44.75% y 39.95%, respectivamente; y estadisticamente la celda N° 01 es similar a la celda N° 03, afinando que tambien presenta resultados eficientes para esta semana.

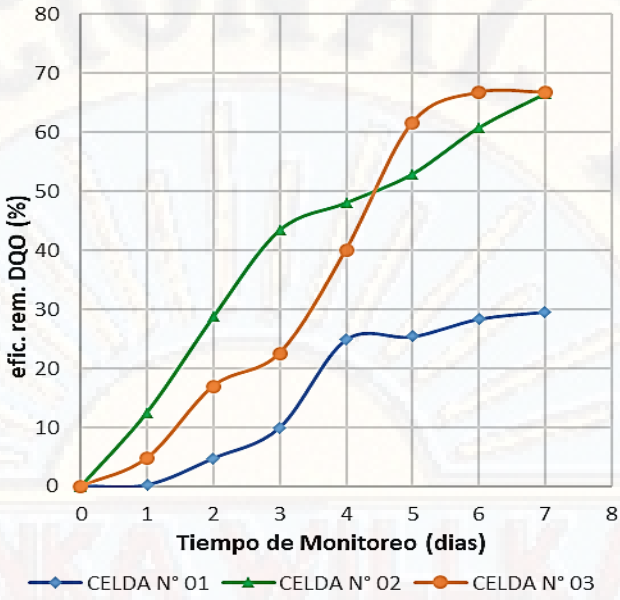


Figura 35. Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 01 de las MFCs.

Como se puede observar en la figura 35, en la primera semana la mejor tendencia es para la celda N° 02 y 03, debido a que contienen mayor proporción de inóculo bacteriano lo cual favoreció la degradación de la materia orgánica (DQO), por lo tanto, presentan los mejores resultados de eficiencia de tratamiento de agua residual municipal (eficiencia de remoción de DQO).

- Del mismo modo, en la tabla 10, se muestra la demanda química de oxigeno (DQO) en la semana 02 obtenidas de las celdas de combustible microbiano (MFCs), a partir de las cuales se determina las eficiencias de remoción de DQO, tomando como punto de entrada la DQO al inicio de la semana y como punto de salida la DQO promedio de la semana después del tratamiento; por otra parte, se comparó la DQO de salida con el LMP (D.S 003-2010 MINAM), el tiempo de monitoreo fue a partir del día 08 al 14, se realizó un monitoreo por día (a las 13:00 horas).

Tabla 10

DQO en la semana 02 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)

Demanda química de oxigeno (mg/L) en las MFCs en la semana 02						
MFC	fi	Composición	Punto de entrada a la celda (*mg/L*)	Punto de salida de la celda (*mg/L*)	Eficiencia de remoción de DQO promedio (%)	D.S 003-2010 MINAM LMP (*mg/L*)
Celda N° 01	7	40% inóculo y 60% sustrato	182.25	167.62	8.03 [a]	200
Celda N° 02	7	50% inóculo y 50% sustrato	86.55	84.73	2.10 [b]	200
Celda N° 03	7	60% inóculo y 40% sustrato	86.05	85.55	0.58 [b]	200

Se determino la DQO de salida de la semana 02 en miligramos por litro (mg/L), cumpliendo los LMP en toda las celdas de combustible microbiana (MFCs).

Entretanto, la eficiencia de remocion de DQO de la semana 02, muestra que la celda N° 01, obtuvo la mejor eficiencia de remocion de DQO con 8.03 %, estadisticamente superior a las celda N° 02 y 03 con promedios de 2.10 % y 0.58 %, respectivamente.

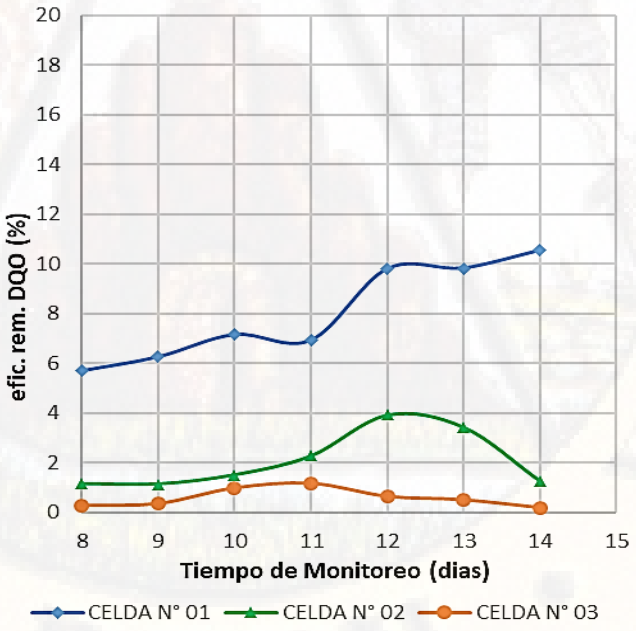


Figura 36. Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 02 de las MFCs.

Se aprecia en la figura 36, que en la segunda semana la mejor tendencia es para la celda N° 01, donde hubo mayor cantidad de sustrato que inóculo, y a la larga la poca cantidad de bacterias empiezan a degradar esa gran cantidad de sustrato, presentando los mejores resultados de eficiencia de tratamiento de agua residual municipal (eficiencia de remoción de DQO), siendo relativamente bajas.

- En la tabla 11, se muestra la demanda química de oxigeno (DQO) de la semana 03 obtenidas de las celdas de combustible microbiano (MFCs), a partir de las cuales se determina las eficiencias de remoción de DQO, tomando como punto de entrada la DQO al inicio de la semana y como punto de salida la DQO promedio luego del tratamiento al cabo de la semana, se comparó la DQO de salida con el LMP (D.S 003-2010 MINAM), el tiempo de monitoreo se evaluó a partir del día 15 al 21, con un monitoreo por día.

Tabla 11

DQO en la semana 03 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)

Demanda química de oxigeno (mg/L) en las MFCs en la semana 03

MFC	fi	Composición	Punto de entrada a la celda (*mg/L*)	Punto de salida de la celda (*mg/L*)	Eficiencia de remoción de DQO promedio (%)	D.S 003-2010 MINAM LMP (*mg/L*)
Celda N° 01	7	40% inóculo y 60% sustrato	163.05	157.67	3.30 [a]	200
Celda N° 02	7	50% inóculo y 50% sustrato	85.45	85.21	0.28 [b]	200
Celda N° 03	7	60% inóculo y 40% sustrato	85.89	85.29	0.70 [b]	200

Se determino la DQO de salida de la semana 03 en miligramos por litro (mg/L), cumpliendo en esta semana todos los LMP en las celdas de combustible microbiana (MFCs).

Mientras tanto, la eficiencia de remocion de DQO de la semana 03, evidencia que la celda N° 01, obtuvo la mayor eficiencia de remocion de DQO con 3.30%, estadisticamente superior a las celda N° 02 y 03, siendo todas las celdas 01, 02 y 03 relativamente bajas en la remoción de DQO.

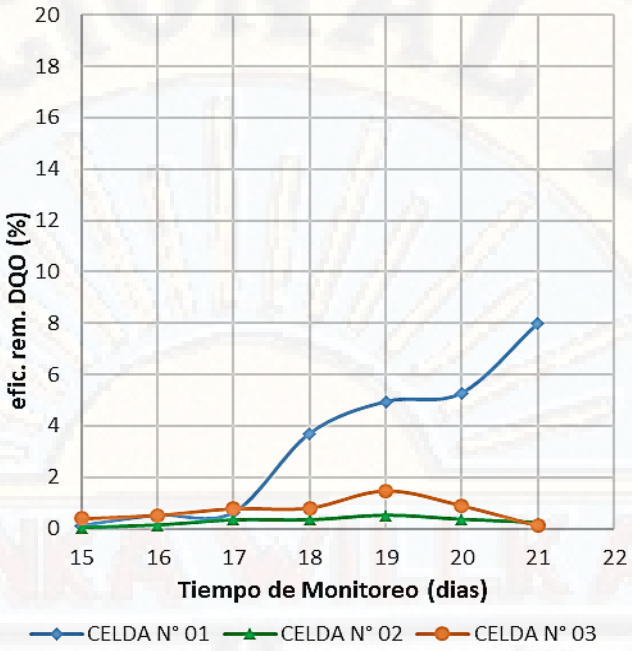


Figura 37. Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 03 de las MFCs.

Se aprecia de la figura 37, que en la tercera semana la mejor tendencia es para la celda N° 01, debido a que la mayor porción de sustrato que contiene esta celda no se degrado en la primera semana por la poca cantidad de inóculo y en las últimas semanas recién se evidencia que las bacterias empiezan a degradar la gran cantidad de sustrato presente en la celda 01.

- La demanda química de oxigeno (DQO) en la semana 03 (tabla 12) obtenidas de las celdas de combustible microbiano (MFCs), a partir de las cuales se determina las eficiencias de remoción de DQO, tomando como punto de entrada la DQO al inicio de la semana, como punto de salida la DQO promedio luego del tratamiento. Los límites máximos permisibles (LMP) del Decreto Supremo N° 003-2010 MINAM, nos permitió evaluar los resultados de DQO de salida evaluando del día 22 al 28, con un monitoreos por día.

Tabla 12

DQO en la semana 04 de las Celdas de Combustible Microbiana (MFCs)

Demanda química de oxigeno (mg/L) en las MFCs en la semana 04						
MFC	Fi	Composición	Punto de entrada a la celda (*mg/L*)	Punto de salida de la celda (*mg/L*)	Eficiencia de remoción de DQO promedio (%)	D.S 003-2010 MINAM LMP (*mg/L*)
Celda N° 01	7	40% inóculo y 60% sustrato	150.05	133.16	11.26 [a]	200
Celda N° 02	7	50% inóculo y 50% sustrato	85.25	84.95	0.35 [b]	200
Celda N° 03	7	60% inóculo y 40% sustrato	85.80	85.05	0.87 [b]	200

Se determino la DQO de salida de la semana 04 en miligramos por litro (mg/L), cumpliendo tambien en esta semana todos los LMP en las celdas de combustible microbiana (MFCs).

Entonces, la eficiencia de remocion de DQO de la semana 04, evidencia que la celda N° 01 tambien presentó la mayor eficiencia de remocion de DQO con 11.26 %, estadisticamente superior a las celda N° 02 y 03, aunque todas relativamente presentan eficiencias bajas.

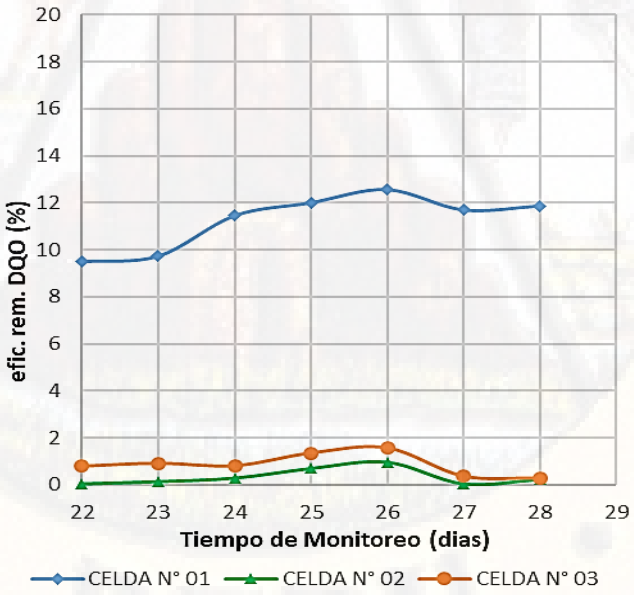


Figura 38. Resultados de eficiencia de remoción de DQO en la semana 04 de las MFCs.

Como se puede observar en la figura 38, en la cuarta semana la mejor tendencia es para la celda N° 01, porque presenta mayor proporción de sustrato que inóculo, debido a la degradación lenta de la primera semana, se muestra más claramente que la poca cantidad de bacterias iniciales (semana 01) degradaron parte del sustrato de la celda y en las últimas semanas empiezan a degradar mejor la DQO.

- Adicionalmente, se presenta la tabla 13, en la cual se compara el comportamiento de la eficiencia de remoción de DQO obtenido de las 03 celdas de combustible microbiano (MFCs) a lo largo de todo el tiempo de monitoreo (04 semanas).

Tabla 13

Eficiencia de remoción de DQO en las 03 Celdas de Combustible Microbiano (MFCs)

Eficiencia de remoción de DQO en las 03 MFCs							
MFCs	Composición	fi	Unidad	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04
Celda N° 01	40% inóculo y 60% sustrato	28	%	17.61 [b]	8.03 [a]	3.30 [a]	11.26 [a]
Celda N° 02	50% inóculo y 50% sustrato	28	%	44.75 [a]	2.10 [b]	0.28 [b]	0.35 [b]
Celda N° 03	60% inóculo y 40% sustrato	28	%	39.95 [ab]	0.58 [b]	0.70 [b]	0.87 [b]

Medias con letras diferentes en una misma columna, son estadisticamente significativas (diferentes).

Se determino la eficiencia de remocion de DQO de las 04 semanas, donde la celda N° 02 y 03 a la semana 01, obtubieron estadisticamente las mayores eficiencia con 44.75% y 39.95%, respectivamente.

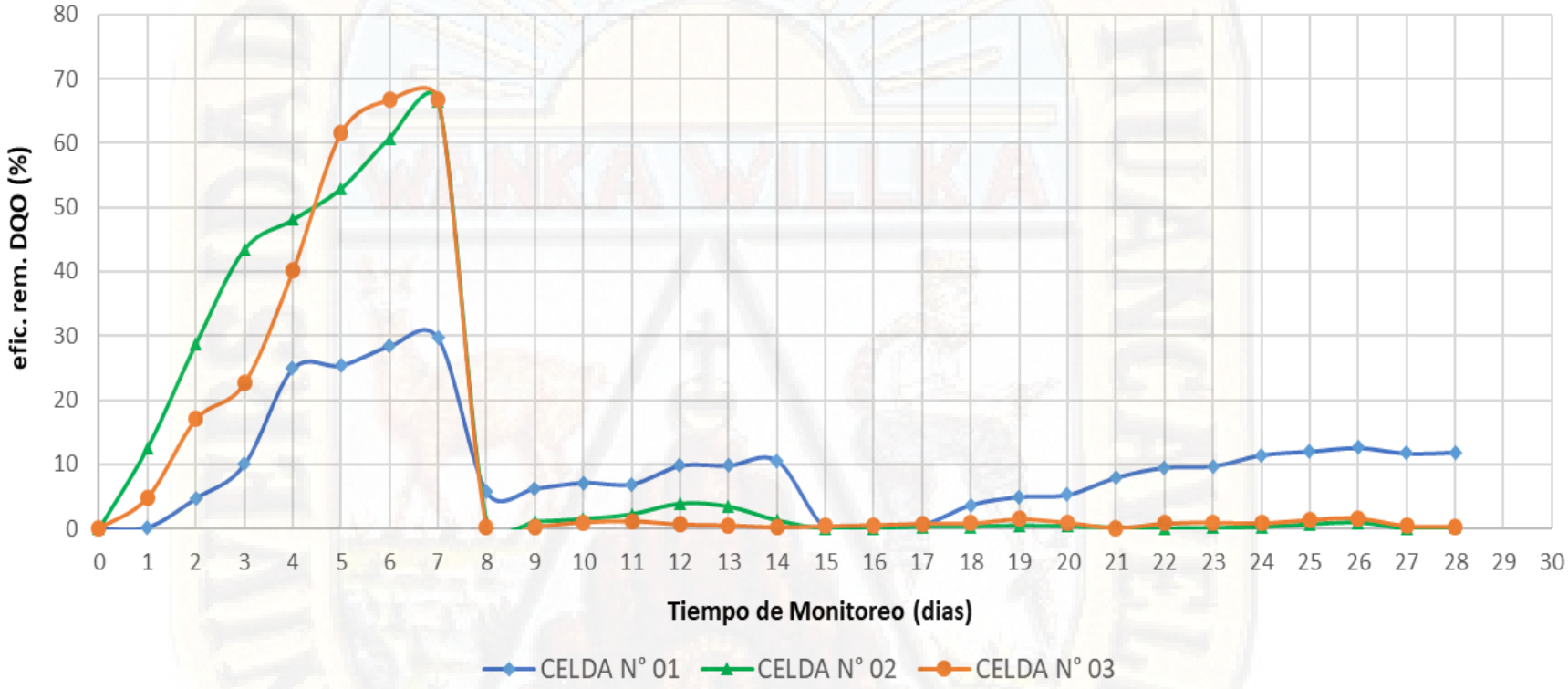


Figura 39. Resultados de eficiencia de remoción de DQO en las 03 MFCs.

Como se puede observar en la figura 39, las eficiencias de remoción de la demanda química de oxigeno (DQO) obtenidas de las 03 celdas de combustible microbiano (MFCs) por semana, a lo largo del tiempo de monitoreo, evidenciando que, en la primera semana, se lograron las mayores eficiencias en las 03 celdas, debido al metabolismo de las bacterias de degradar rápido la materia orgánica (DQO) en los primeros días de tratamiento.

Apreciando, que en la primera semana la celda N° 01, tuvo un comportamiento más bajo que la celda N° 02 y 03, esto asociado probablemente a una lenta actividad bacteriana a consecuencia de la gran proporción de sustrato presente en esta celda; sin embargo, a partir de la segunda semana de manera tardía se empieza a notar como la poca cantidad de bacterias empiezan a reproducirse y a consumir mayor cantidad de sustrato.

Cabe resaltar, que el aparente descenso drástico al cabo de la primera semana de las 03 celdas; son debido a que, la DQO de ingreso para la segunda semana es diferente al de la primera semana (ver tabla 10), además se evidencia que, a partir de la segunda semana, existe poca remoción de DQO, causado por el desbalance de inóculo y sustrato; los cuales empiezan a consumir los demás nutrientes presentes en el agua residual (materia inorgánica). También se resalta que al inicio del monitoreo la eficiencia de remoción de DQO es 0 % debido a que este valor representa la entrada al sistema en el cual no se realiza tratamiento alguno.

Es así que, cada celda mostro una particularidad de eficiencia de remoción de DQO a medida que transcurre el tiempo evaluado en función a la composición de inóculo y sustrato. Se observar que en los primeros días de la semana 01 la mayor degradación de DQO en la celda N° 02 y 03. El comportamiento de la degradación de DQO, se sopeso en el aumento de inóculo y la reducción de sustrato en el transcurso del tiempo de monitoreo.

4.2. Prueba de hipótesis.

Hernández et al., (2014) señala que en el proceso cuantitativo las hipótesis se someten a una prueba para determinar si son apoyadas o refutadas, de acuerdo con lo que el investigador observa. La contratación de hipótesis se resume a 6 pasos, y estando en el último paso, se tiene ya la posibilidad de tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula, se ha optado por seguir estos pasos para el contraste de la hipótesis:

a. Formular la hipótesis nula y alterna de acuerdo al problema.
b. Escoger un nivel de significancia α.
c. Escoger el estadígrafo de prueba más apropiado.
d. Establecer la región crítica.
e. Calcular valores de la prueba estadística de una muestra aleatoria de tamaño "n".
f. Rechazar la hipótesis nula (Ho) si el estadígrafo tiene un valor en la región crítica y no rechazar (aceptar) si el estadígrafo tiene un valor en la región de aceptación.

4.2.1. Contrastación de hipótesis para el potencial de generación de energía eléctrica (voltaje).

A. Test de normalidad.

- **Test de normalidad para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 01**

Tabla 14
Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 01

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.193239	Pr > A-Sq	0.06382

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling ya que tiende a ser más efectiva para detectar desviaciones cuando la muestra es diferenciada; en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 01 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.0638 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 02**

Tabla 15
Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 02

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.466375	Pr > A-Sq	0.2476

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 02 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.2476 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 03**

Tabla 16
Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 03

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.415247	Pr > A-Sq	>0.2500

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 03 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor >0.2500 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 04**

Tabla 17
Test de normalidad del voltaje en las MFCs - semana 04

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.701748	Pr > A-Sq	0.7201

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 04 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.7201 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

B. Prueba de homogeneidad de varianzas.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza del voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 01**

Tabla 18
Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 01

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de voltaje de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	11912615	5956307	3.03	0.0856
Error	60	1.1784E8	1963962		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene porque se ha encontrado que este estadístico de prueba para igualdad de variancias es robusto bajo condiciones de poca normalidad, en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda 2 y Celda 3) para la semana 01 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0856 es mayor que 0.05.

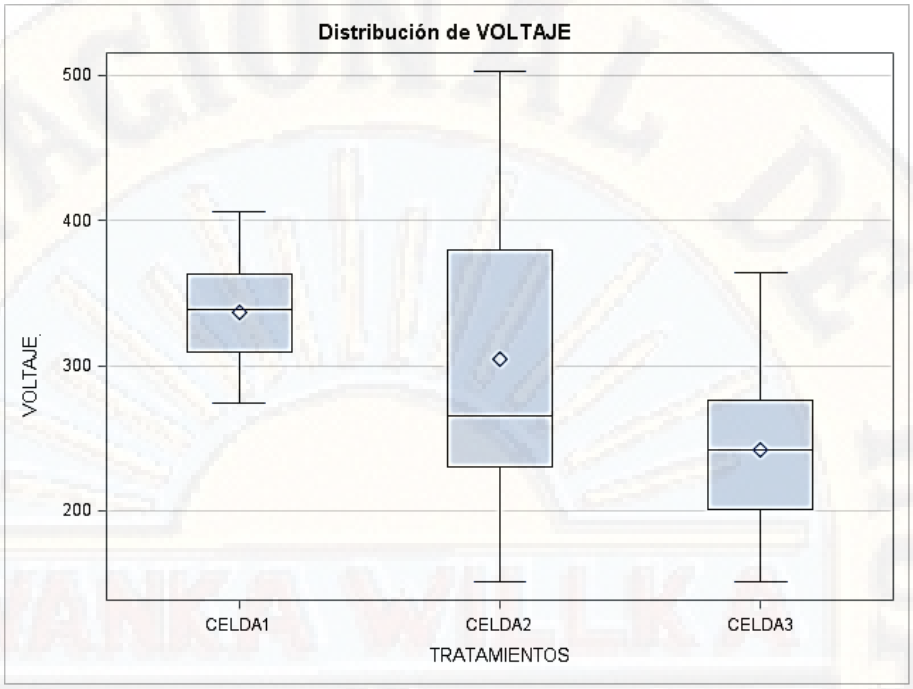


Figura 40. Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 01.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza del voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 02**

Tabla 19

Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 02

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de voltaje de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	43581198	21790599	3.33	0.0525
Error	60	3.9261E8	6543479		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda2 y Celda 3) para la semana 02 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0525 es mayor que 0.05.

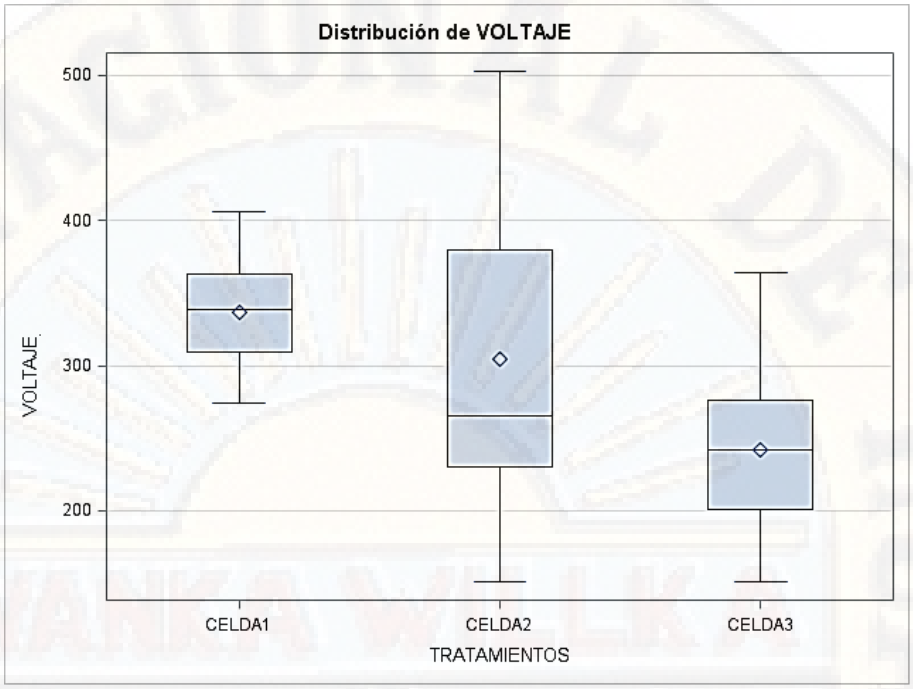


Figura 41. Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 02.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza del voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 03**

Tabla 20

Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 03

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de voltaje de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	9.1178E8	4.5589E8	7.51	0.0512
Error	60	3.6437E9	60727960		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda2 y Celda 3) para la semana 03 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0512 es mayor que 0.05.

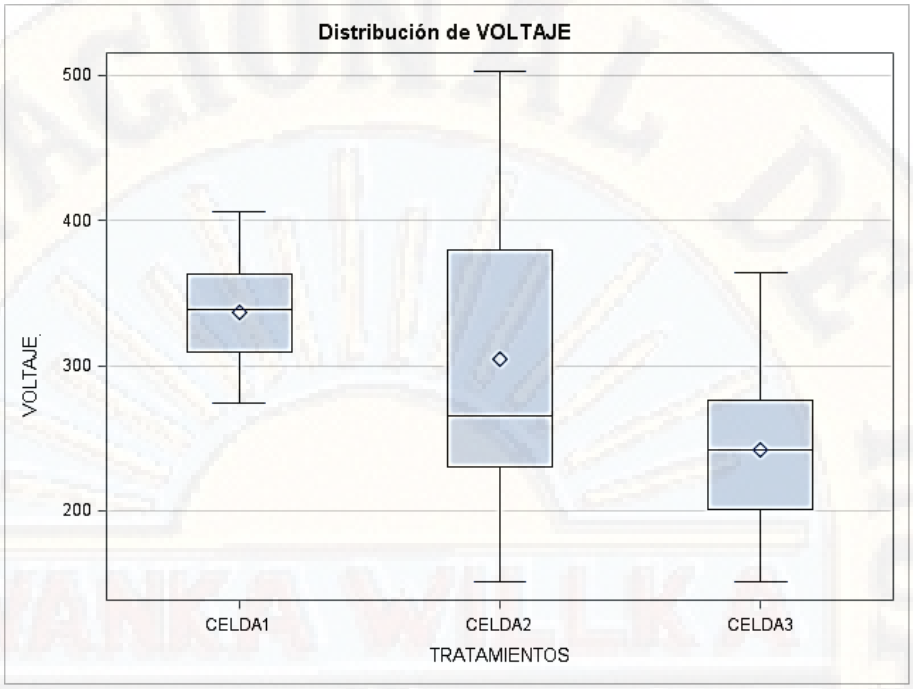


Figura 42. Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 03.

Test de levene para homogeneidad de varianza del voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 04

Tabla 21

Test de Levene para la homogeneidad de varianzas del voltaje en las MFCs - semana 04

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de voltaje de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	89259281	44629640	3.97	0.0641
Error	60	6.7509E8	11251576		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de voltaje en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda2 y Celda 3) para la semana 04 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0641 es mayor que 0.05.

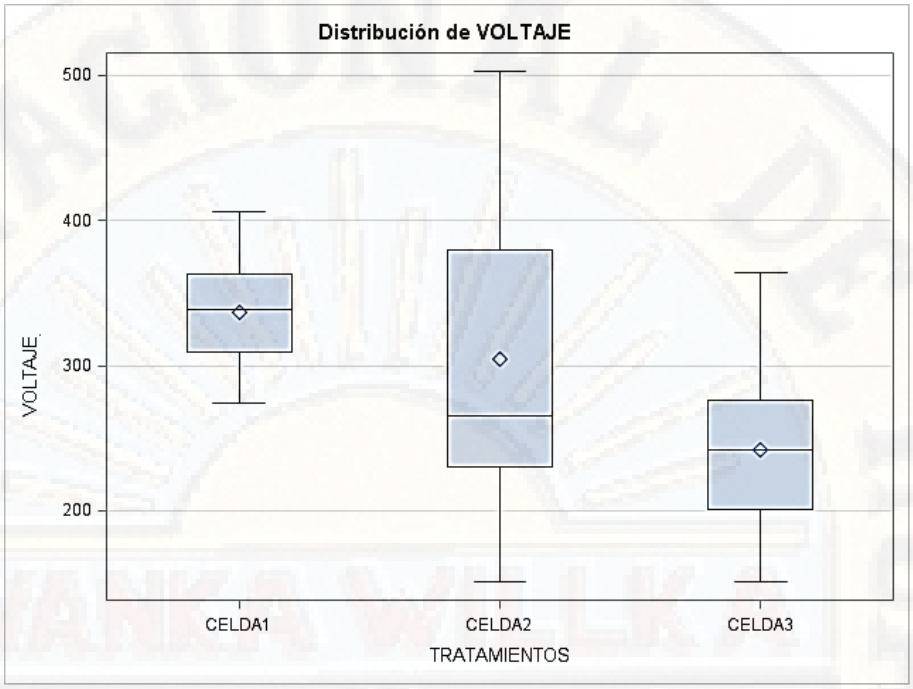


Figura 43. Gráfica de cajas para el voltaje de las 03 MFCs - semana 04.

C. Formulación de hipótesis estadísticas.

Hipótesis alterna (Ha): El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

Hipótesis nula (Ho): El potencial de generación de energía eléctrica será inferior a 500 mV utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

D. Nivel de significancia.

La presente tesis se trabajó con un error de 5 %; es decir $\alpha = 0.05$, y con un nivel de confianza de 95 %, es decir con $1 - \alpha = 0.095$.

E. Estadístico de prueba.

El estadístico de prueba utilizado fue la F de Fisher para el análisis de varianza ANOVA y la prueba de Tukey, para analizar la comparación de medias (Hernández et al., 2014).

F. Valor crítico y regla de decisión.

Para la prueba de una cola con α = 0.05, en la tabla de Fisher tenemos los valores críticos de F, α, V1, V2:

- F_{tabla} = F (0.05, 2, 60) = 3.15
- $F_{cal} \leq F_{tabla}$; se acepta la hipótesis nula
- $F_{cal} \geq F_{tabla}$; se rechaza la hipótesis nula.

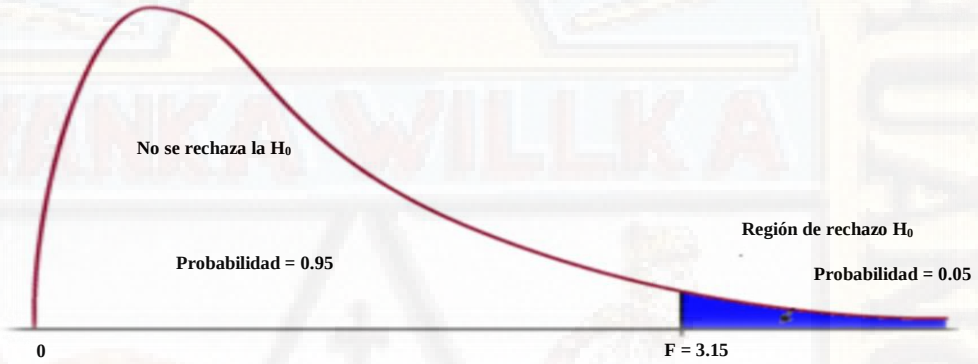


Figura 44. Valores críticos para aceptar o rechazar la hipótesis nula del voltaje.

G. Calculo de los estadígrafos de prueba.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para la dimensión Voltaje por semanas.

Análisis de varianza (ANOVA) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 01.

Tabla 22

Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 01

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	351463.079	175731.540	151.23	< 0.0001
Error	60	69719.905	1161.998		
Total corregido	62	421182.984			

Según la prueba de Fisher el voltaje fue significativo, Pr = <0.0001 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre los voltajes de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 01.**

Tabla 23

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - Semana 01

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Voltaje - Semana 1	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	60
Error de cuadrado medio	1161.998
Valor crítico del rango estudentizado	3.39857
Diferencia significativa mínima	25.281

Tabla 24

Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 01

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media (mV)	N	Tratamientos
A	521.24	21	CELDA 2
B	371.43	21	CELDA 1
B	355.38	21	CELDA 3

En la tabla anterior, se observa las medias de los voltajes de la semana 01 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFCs), donde se observa que la celda 2 obtuvo una media de 521.24 mV de Voltaje, por lo cual siendo es más óptimo y mejor que las celdas 1 y 3. También se observa que la celda 2 es la única que supera Delta (Diferencia significativa mínima) de 25.28 por tanto la celda 2, es la más óptima en la generación de energía eléctrica (Voltaje), tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 02.**

Tabla 25
Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 02

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	15382.127	7691.064	4.46	0.0156
Error	60	103433.524	1723.892		
Total corregido	62	118815.651			

Según la prueba de Fisher el voltaje fue significativo, Pr = 0.0156 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre los voltajes de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 02.**

Tabla 26
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - Semana 02

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Voltaje - Semana 2	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	60
Error de cuadrado medio	1723.892
Valor crítico del rango estudentizado	3.39857
Diferencia significativa mínima	30.792

Tabla 27
Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 02

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento		Media (mV)	N	Tratamientos
	A	393.10	21	CELDA 2
B	A	375.43	21	CELDA 3
B		354.86	21	CELDA 1

En la tabla anterior, se observa las medias de los voltajes de la semana 02 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFCs), donde se observa que la celda 2 obtuvo una media de 393.10 mV de Voltaje, por lo cual siendo es más óptimo y mejor que las celdas 1 y 3. También se observa que la celda 2 es la única que supera Delta (Diferencia significativa mínima) de 30.792 por tanto la celda 2, es la más óptima en la generación de energía eléctrica (Voltaje), tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 03.**

Tabla 28

Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 03

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	99057.746	49528.873	9.15	0.0003
Error	60	324866.000	5414.433		
Total corregido	62	423923.746			

Según la prueba de Fisher el voltaje fue significativo, Pr = 0.0003 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre los voltajes de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 03.**

Tabla 29

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - semana 03

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Voltaje _ Semana 3	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	60
Error de cuadrado medio	5414.433
Valor crítico del rango estudentizado	3.39857
Diferencia significativa mínima	54.571

Tabla 30

Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 03

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media (mV)	N	Tratamientos
A	337.10	21	CELDA 1
A	304.81	21	CELDA 2
B	241.62	21	CELDA 3

En la tabla anterior, se observa las medias de los voltajes de la semana 03 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFCs), donde se observa que la celda 1 obtuvo una media de 337.10 mV de Voltaje, por lo cual siendo es más óptimo y mejor que las celdas 2 y 3. También se observa que la celda 3 es la única que supera Delta (Diferencia significativa mínima) de 54.571 por tanto la celda 1, es la más óptima en la generación de energía eléctrica (Voltaje), tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 04.**

Tabla 31
Resumen de la prueba de ANOVA de voltaje para las MFCs - semana 04

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	431940.095	215970.048	96.03	<0.0001
Error	60	134939.333	2248.989		
Total corregido	62	566879.429			

Según la prueba de Fisher el voltaje fue significativo, Pr = <0.0001 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre los voltajes de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para el voltaje en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 04.**

Tabla 32
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para voltaje - semana 04

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Voltaje - Semana 4	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	60
Error de cuadrado medio	2248.989
Valor crítico del rango estudentizado	3.39857
Diferencia significativa mínima	35.171

Tabla 33
Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 04

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media (mV)	N	Tratamientos
A	388.10	21	CELDA 1
B	234.71	21	CELDA 3
C	196.48	21	CELDA 2

En la tabla anterior, se observa las medias de los voltajes de la semana 04 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFCs), donde se observa que la celda 1 obtuvo una media de 388.10 mV de Voltaje, por lo cual siendo es más óptimo y mejor que las celdas 2 y 3. También se observa que la celda 1, 2 y 3 superan Delta (Diferencia significativa mínima) de 35.171 por tanto la celda 1, es la más óptima en la generación de energía eléctrica (Voltaje), tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

H. Decisión estadística.

Rechazo la hipótesis nula (Ho) y acepto la hipótesis alterna (Ha). Debido que el valor de ANOVA es significativo, la prueba de tuckey nos demuestra que existe diferencia entre las celdas y la celda que genera mayor voltaje es la celda 2 con una media de 521.24 mV^{A} (en la primera semana) significativamente superior con un delta 25.28 mayor que las celdas 1 y 3 por lo tanto se afirma que: **El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV utilizando la celda de combustible microbiana (MFC) N° 02 en la semana 01 en la ciudad de Huancavelica.** Demostrando que existe diferencia entre los tratamientos de las celdas 1, 2 y 3, del voltaje para validar el grado de significancia estadística un alfa de 0.05 %.

4.2.2. Eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO).

A. Test de normalidad.

- **Test de normalidad para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 01**

Tabla 34

Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 01

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.468022	Pr > A-Sq	0.2312

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 1 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.2312 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 02**

Tabla 35

Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 02

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.398034	Pr > A-Sq	0.1976

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 2 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.1976 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 03**

Tabla 36
Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 03

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.278731	Pr > A-Sq	0.3277

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 3 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.3277 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

- **Test de normalidad para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 04**

Tabla 37
Test de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 04

Tests para normalidad				
Test	Estadístico		p valor	
Anderson Darling	A-Sq	0.992663	Pr > A-Sq	0.1259

Se realizó el test de normalidad con el estadístico de Anderson Darling en cual resulto que los datos de eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) en la semana 4 muestran un comportamiento normal. Debido a que el valor 0.1259 es mayor que 0.05 por tanto cumple con los supuestos de normalidad.

B. Prueba de homogeneidad de varianzas.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza de la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs).**

Tabla 38
Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de la eficiencia de remoción de DQO de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	0.00681	0.00340	3.52	0.0913
Error	18	0.0174	0.000968		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de Eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda 2 y Celda 3) para la semana 01 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0513 es mayor que 0.05.

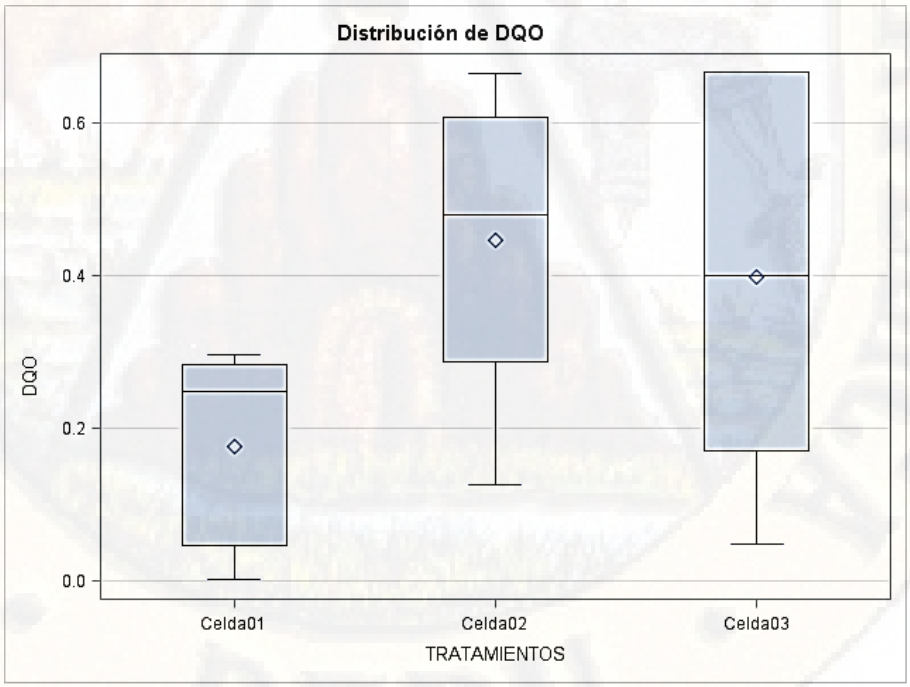


Figura 45. Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 01.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza de la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 02.**

Tabla 39
Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 02

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de la eficiencia de remoción de DQO de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	3.719E-7	1.859E-7	10.61	0.0509
Error	18	3.153E-7	1.752E-8		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de Eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda 2 y Celda 3) para la semana 02 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0509 es mayor que 0.05.

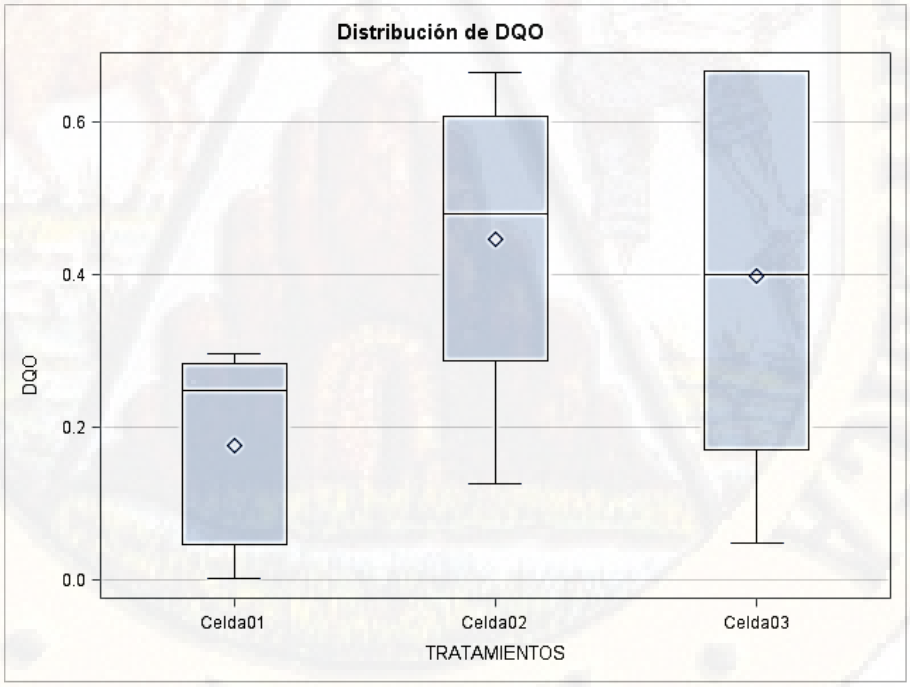


Figura 46. Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 02.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza de la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 03.**

Tabla 40

Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 03

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de la eficiencia de remoción de DQO de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	2.679E-6	1.34E-6	7.98	0.0533
Error	18	3.021E-6	1.679E-7		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de Eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda 2 y Celda 3) para la semana 03 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0533 es mayor que 0.05.

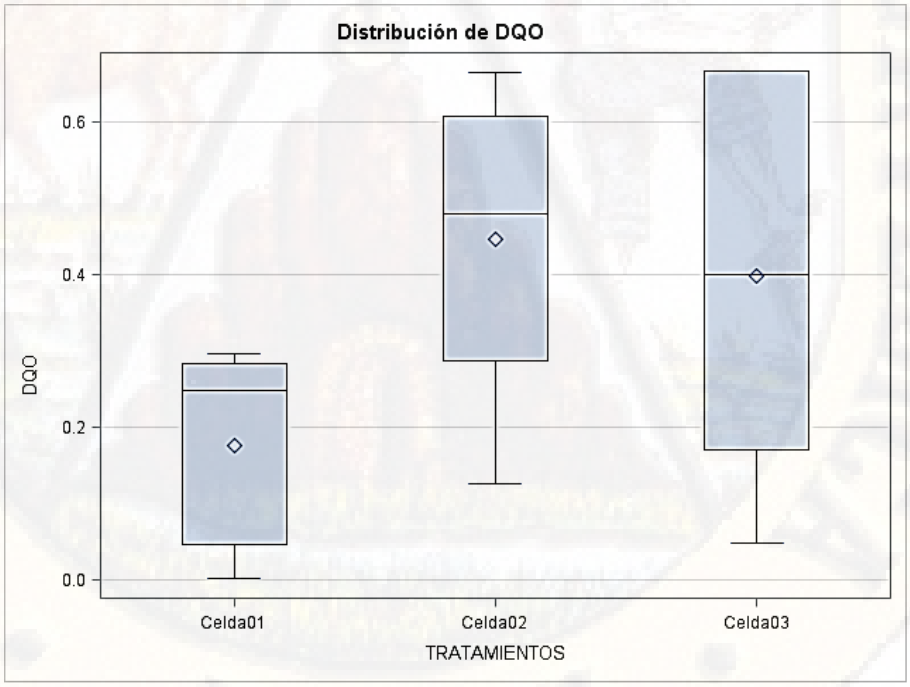


Figura 47. Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 03.

- **Test de levene para homogeneidad de varianza de la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) - semana 04.**

Tabla 41
Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la eficiencia de remoción de DQO en las MFCs - semana 04

Test de Levene para homogeneidad de la varianza de la eficiencia de remoción de DQO de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	5.005E-8	2.502E-8	5.07	0.0680
Error	18	8.892E-8	4.94E-9		

Se realizó el test de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene en cual resulto que los datos de Eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana MFCs (Celda 1, Celda 2 y Celda 3) para la semana 04 presentan homogeneidad de varianzas. Debido a que el valor 0.0680 es mayor que 0.05.

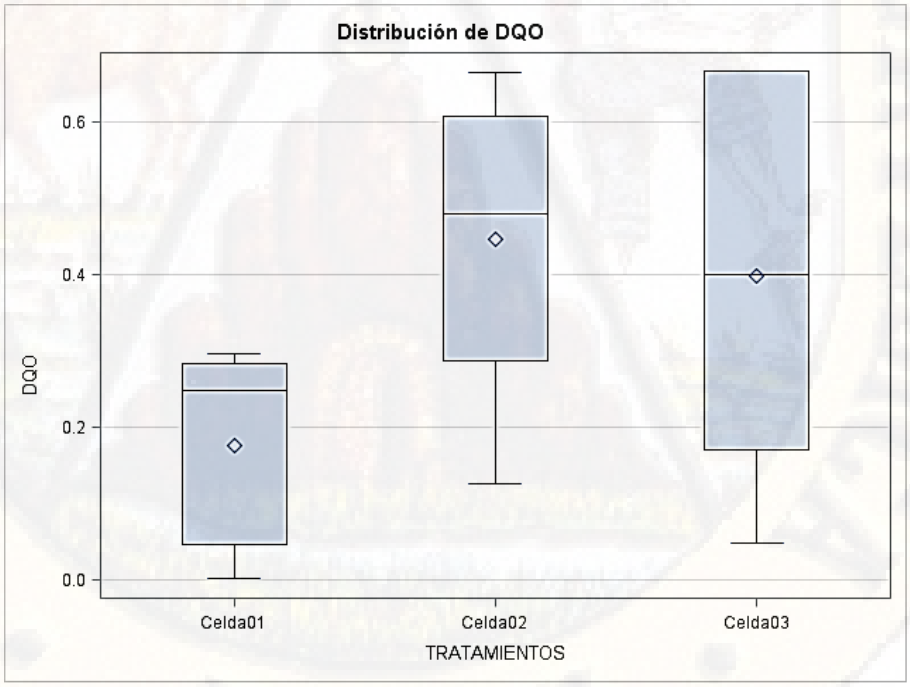


Figura 48. Gráfica de cajas para la eficiencia de remoción de DQO de las 03 MFCs - semana 04.

C. Formulación de hipótesis estadísticas.

Hipótesis alterna (Ha): La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior a 70 % utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

Hipótesis nula (Ho): La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será inferior a 70 % utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

D. Nivel de significancia.

La presente tesis se trabajó con un error de 5 %; es decir $\alpha = 0.05$, y con un nivel de confianza de 95 %, es decir con $1 - \alpha = 0.095$.

E. Estadístico de prueba.

El estadístico de prueba utilizado fue la F de Fisher para el análisis de varianza ANOVA y la prueba de Tukey, para analizar la comparación de medias (Hernández et al., 2014).

F. Valor crítico y regla de decisión.

Para la prueba de una cola con $\alpha = 0.05$, en la tabla de Fisher tenemos los valores críticos de F, α, V1, V2:

- $F_{tabla} = F\ (0.05, 2, 18) = 3.55$
- $F_{cal} \leq F_{tabla}$; se acepta la hipótesis nula
- $F_{cal} \geq F_{tabla}$; se rechaza la hipótesis nula.

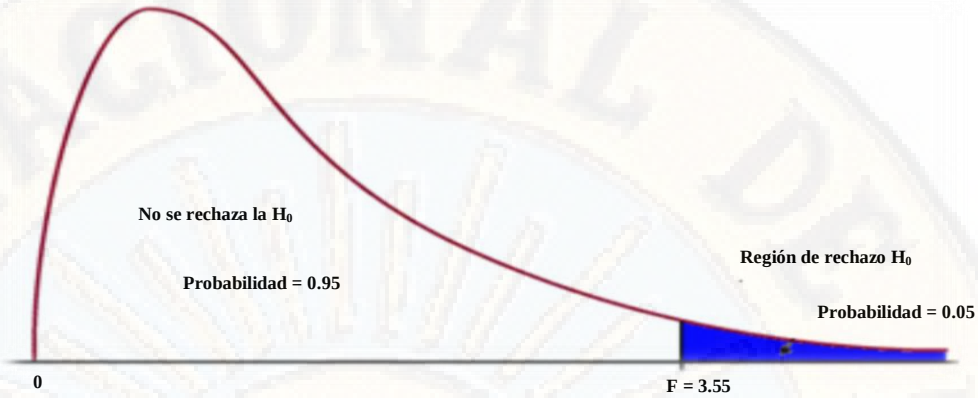


Figura 49. Valores críticos para aceptar o rechazar la hipótesis nula de la eficiencia de remoción de DQO.

G. Calculo de los estadígrafos de prueba.

Se realizó el análisis de varianza de ANOVA para la dimensión eficiencia de remoción de DQO por semanas.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 01.**

Tabla 42
Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 01

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	0.2937966	0.1468983	3.79	0.0423
Error	18	0.6974173	0.0387454		
Total corregido	20	0.9912140			

Según la prueba de Fisher la eficiencia de remoción de DQO fue significativa, Pr = 0.0423 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre las eficiencias de remoción de DQO de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 01.**

Tabla 43

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 01

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Eficiena de remoción de DQO - Semana 1	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	18
Error de cuadrado medio	0.03875
Valor crítico del rango estudentizado	3.60930
Diferencia significativa mínima	0.2685

Tabla 44

Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 01

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento		Media	N	Tratamientos
	A	0.4475	7	CELDA 2
B	A	0.3996	7	CELDA 3
B		0.1761	7	CELDA 1

En la tabla anterior, se observa las medias de eficiencia de remoción de DQO por de la semana 01 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFC), donde se observa que la celda 2 y 3 obtuvieron medias de 0.4475 y 0.3996 respectivamente de eficiencia de remoción de DQO, por lo cual presentan las mejores eficiencias a comparación de la celda 1. También se observa que la celda 2 y 3 son las únicas que superan Delta (Diferencia significativa mínima) de 0.269 por tanto las celdas 2 y 3, son las más óptimas en la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO) con 0.4475 y 0.3996 tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 02.**

Tabla 45

Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 02

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	0.0216354	0.0108177	60.90	<0.0001
Error	18	0.0031976	0.0001776		
Total corregido	20	0.0248330			

Según la prueba de Fisher la eficiencia de remoción de DQO fue significativa, Pr = <0.0001 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre las eficiencias de remoción de DQO de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 2.**

Tabla 46
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 02

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Eficiena de remoción de DQO - Semana 2	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	18
Error de cuadrado medio	0.000177644
Valor crítico del rango estudentizado	3.60930
Diferencia significativa mínima	0.0182

Tabla 47
Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 02

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamientos
A	0.0803	7	CELDA 1
B	0.0210	7	CELDA 2
B	0.0058	7	CELDA 3

.

En la tabla anterior, se observa las medias de eficiencia de remoción de DQO por de la semana 02 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFC), donde se observa que la celda 1 obtuvieron medias de 0.0803 de eficiencia de remoción de DQO, por lo cual presenta la mejor eficiencia a comparación de las celdas 2 y 3. También se observa que la celda 1 es la única que superan Delta (Diferencia significativa mínima) de 0.018 por tanto las celda 1, es la más óptima en la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO) con 0.0803 tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 03.**

Tabla 48
Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 03

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	0.0037495	0.0018747	6.14	0.0093
Error	18	0.0054952	0.0003052		
Total corregido	20	0.0092447			

Según la prueba de Fisher la eficiencia de remoción de DQO fue significativa, Pr = 0.0093 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre las eficiencias de remoción de DQO de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 03.**

Tabla 49
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 03

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Eficiena de remoción de DQO - Semana 3	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	18
Error de cuadrado medio	0.000305
Valor crítico del rango estudentizado	3.60930
Diferencia significativa mínima	0.0238

Tabla 50
Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 03

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamientos
A	0.0330	7	CELDA 1
B	0.0070	7	CELDA 3
B	0.0028	7	CELDA 2

En la tabla anterior, se observa las medias de eficiencia de remoción de DQO por de la semana 03 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFC), donde se observa que la celda 1 obtuvieron medias de 0.0330 de eficiencia de remoción de DQO, por lo cual presenta la mejor eficiencia a comparación de las celdas 2 y 3. También se observa que la celda 1 es la única

que superan Delta (Diferencia significativa mínima) de 0.0238 por tanto las celda 1, es la más óptima en la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO) con 0.0330 tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

- **Análisis de varianza (ANOVA) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 04.**

Tabla 51
Resumen de la prueba de ANOVA de eficiencia de remoción de DQO para las MFCs – semana 04

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamientos	2	0.0529988	0.0264994	461.63	<0.0001
Error	18	0.0010332	0.0000574		
Total corregido	20	0.0540321			

Según la prueba de Fisher la eficiencia de remoción de DQO fue significativa, Pr = <0.0001 menor que 0.05; por tanto, se deduce que existe diferencia estadística significativa entre las eficiencias de remoción de DQO de cada celda de combustible microbiano (MFC).

- **Prueba de Tuckey (HSD) para la eficiencia de remoción de DQO en las celdas de combustible microbiana (MFCs) – semana 04.**

Tabla 52
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para eficiencia de remoción de DQO - Semana 04

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Eficiena de remoción de DQO - Semana 3	
Alpha	0.05
Grados de error de libertad	18
Error de cuadrado medio	0.0000574046
Valor crítico del rango estudentizado	3.60930
Diferencia significativa mínima	0.0103

Tabla 53
Prueba de Tukey para las 03 celdas de combustible microbiano - semana 04

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamientos
A	0.1126	7	CELDA 1
B	0.0873	7	CELDA 3
B	0.0035	7	CELDA 2

En la tabla anterior, se observa las medias de eficiencia de remoción de DQO por de la semana 04 obtenido de las celdas de combustible microbiano (MFC), donde se observa que la celda 01 obtuvieron medias de 0.1126 de eficiencia de remoción de DQO, por lo cual presenta la mejor eficiencia a comparación de las celdas 2 y 3. También se observa que la celda 1 es la única que superan Delta (Diferencia significativa mínima) de 0.013 por tanto la celda 01, es la más óptima en la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO) con 0.1126 tal como se muestra en la prueba de Tuckey de rango estudentizado.

H. Decisión estadística.

Acepto la hipótesis nula (Ho) y rechazo la hipótesis alterna (Ha). Debido que el valor de ANOVA es significativo, la prueba de tuckey nos demuestra que existe diferencia entre las celdas y ninguna celdas sobrepasan el 70 % de eficiencia de remoción de DQO, pero si se obtienen medias de 44.75 %, 39.96 % y 17.61 % para las celdas 1, celda 2 y celda 3 respectivamente (semana 01); por lo tanto, se afirma que: **La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será inferior a 70 % utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.** Demostrando que existe diferencia entre los tratamientos de las celdas 1, 2 y 3, de la eficiencia de remoción de DQO para validar el grado de significancia estadística un alfa de 0.05 %.

4.2.3. Conclusiones de la prueba de hipótesis.

Según el análisis de varianza de ANOVA para ambos parámetros, se deduce que existe diferencia estadística significativa debido a que todos los P valores (Pr) son menores que 0.05, es por esa razón que se aplica la prueba de Tukey para identificar cuáles son los tratamientos diferentes y mejores por semana.

Según la prueba de Tukey, los resultados del potencial de generación de energía eléctrica de las celdas N° 02 en la primera semana los mejores resultados (voltaje medio de 521.24 mV), y los resultados de eficiencia de tratamiento del agua residual

municipal de las celdas N° 02 y 03 en la primera semana presentan los mejores resultados (eficiencia de remoción de DQO medio de 44.75 % y 39.96 %). Por lo tanto, con un nivel de confianza de 95% se asegura que: Los mejores resultados de la tesis (en cuanto al potencial de generación de energía eléctrica y a la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales) se logra utilizando la celda N° 02 en la semana 01 en la ciudad de Huancavelica, por cumplir con ambos parámetros como mejor tratamiento.

Mientras que para el potencial de generación de energía eléctrica se rechaza la hipótesis nula (Ho) afirmando que: El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica. Por otro lado, para la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales se acepta la hipótesis nula (Ho) afirmando que: La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será inferior a 70 % utilizando celdas de combustible microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

4.3. Discusión de resultados.

4.3.1. Potencial de generación de energía eléctrica.

Bermudez y Bernal (2018); y Ñacato (2018) obtuvieron máximos voltajes a las primeras horas de operación de sus sistemas (294.17 mV para la *P. Aeruginosa* a las 15 horas y 607.67 mV para agua sintética de rango alto a las 20 horas), de la misma forma que sucedió en la presente investigación, en la cual a la primera semana (luego de 12 horas) se generó el máximo voltaje de 521.24 mV en la celda N° 02. En la investigación de Ñacato (2018) y en la presente tesis se utilizaron fuente de microorganismos mixtos es por ello que se generaron mayores voltajes que el de Bermudez y Bernal (2018) debido a la sinergia entre todo el consorcio microbiano. Cabe mencionar que las bacterias pasaron por una etapa de aclimatación para la formación del biofilm, debido a ello se generó voltajes altos en los primeros días. Saavedra (2012) no realizo la etapa de aclimatación, es ello que al inicio de la operación el voltaje de la celda resultó muy cercano a cero y como punto de máximo voltaje a circuito abierto fue 460 mV a las 507 horas (21 días), por ello, es importante realizar una aclimatación de al menos 15 días.

Ñacato (2018) relaciona los bajos voltajes obtenidos en un tiempo de 20 horas con la curva de crecimiento bacteriano, que consta de una fase de adaptación, seguida de la fase exponencial en cuya etapa las bacterias y biomasa crecen, y por consiguiente consumen la mayor parte del sustrato, posteriormente empieza la fase estacionaria, y finalmente la fase de muerte celular, en la que se detiene la generación de voltaje y la degradación de materia orgánica. De igual forma en la presente investigación las bacterias pasaron por las cuatro fases del crecimiento microbiano, pero en la solo se observaron 2 (fase exponencial y fase estacionaria), debido a que en la etapa de aclimatación las bacterias pasaron por una etapa de aclimatación, y no se logró evidenciar la fase de muerte debido a que el tiempo de monitoreo fue corto, se recomienda evaluar las celdas hasta obtener valores de voltaje iguales a cero, lo cual simbolizaría la fase de muerte.

Como evidencia de la importancia de la medición de los factores ambientales son: El investigadores Gonzáles (2015) que generó los menores voltaje que las demás investigaciones, este oscilo entre 8 y 32 mV, en sus celdas fotosintéticas en la fase lumínica, este autor menciona que las variaciones de voltajes se dan debido a la concentración de oxígeno en cual es variable. Medina y Zapata (2017) lograron generar 386 mV de voltaje con bacterias E. coli a un pH de 6.5 y a una temperatura ambiente de 37 °C. Buitrón y Pérez (2011) alcanzo generar un voltaje máximo de 660 mV en la celda de 120 mL, debido a que en el arranque de las celdas aclimato el ánodo por tres semanas y es posible que este aumento en el voltaje haya sido debido a un mejor crecimiento microbiano, pero también se observó la acidificación de la cámara anódica a medida que se consumía la materia orgánica, y por ende presencio una fuerte caída de la generación del voltaje; mientras tanto, en la presente tesis el pH se mantuvo prácticamente constante (6.89 – 7.86) debido a ello los voltajes no oscilaron tanto. El voltaje de las MFC, según lo reportado en la bibliografía, alcanzan valores entre 8 a 660 mV, sin importar la configuración del circuito (abierto o cerrado). El resultado del voltaje obtenido en la presente tesis cumple esta condición. Demostrándose que todas las celdas alcanzaron valores aceptables (celda N° 01 = 388.10 mV en la semana 04, celda N° 02 = 521.24 mV en la semana 01 y la celda N° 03 = 375.43 mV en la semana 02).

4.3.2. Eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales.

En la presente tesis, se analizaron los resultados en 04 semanas, en la primera semana de monitoreo en las 03 celdas de combustible microbiana (MFCs), se presentaron las mayores eficiencias de remoción de DQO y también las mayores diferencias en la desviación estándar respecto al resto de las semanas, debido a la mayor actividad bacteriana; resultados similares presentaron Franco y Ricaurte (2018) quienes analizaron también en 04 semanas, observando que en las semanas 03 y 04 se presentaron mayores diferencias en la variabilidad respecto a las semanas 01 y 02, pues en las dos últimas semanas se presentó: mayor cantidad de sustrato, mayor remoción de DQO y mayor actividad bacteria, mientras que en la dos primeras se tubo menor cantidad de sustrato. Observando de ello, que mientras se tenga mayor cantidad de sustrato, se tendrá mayor remoción de DQO, mayor actividad bacteriana y ello generará mayor variabilidad en los resultados; un valor inesperado y excepción mostro la celda N° 02 el cual sin poseer la mayor cantidad de sustrato genero buenas eficiencias de remoción de DQO y mucho mejores voltajes, ello debido a que la celda presenta un punto óptimo de sustrato e inóculo.

En la primera semana de monitoreo, las celdas N° 02 y 03 presentan las mayores eficiencias de remoción de DQO promedio de 44.75% y 39.95%, respectivamente, mientras que la celda N° 01 presenta 17.60%; mientras que en las demás semanas las eficiencias de remoción de DQO caen a valores cercanos al 10 %. Similar a lo registrado por Franco y Ricaurte (2018) quienes en las semanas 03 y 04 se observan una eficiencia de remoción en DQO de 10% en promedio, mientras que en las semanas 01 y 02 ascendió a 60%, resaltando la importancia de la DQO de entrada.

Según Llontop (2018) a medida que se reduce la materia orgánica (DQO), se incrementa el voltaje, sin embargo, en la presente investigación existe tal relación solo hasta la primera semana, pasado este tiempo el inóculo bacteriano deja de consumir la materia orgánica (DQO) del agua residual, empezando a consumir otros nutrientes del agua residual (materia inorgánica), esto se evidencio debido a que, pasado la primera semana no existe remoción de DQO y se siguió generando energía eléctrica (voltaje) aunque en menor cantidad.

Bermudez y Bernal (2018) lograron remover un máximo 12.24 % de DQO con *P. aeruginosa* a las 30 horas y Medina y Zapata (2017) lograron remover un máximo de DQO de 11.53 % con *E. coli* a las 24 horas, comparando con los resultados obtenidos en la presente tesis, es evidente que el porcentaje de remoción de DQO de estos autores es muy bajo, en primer lugar se debe a que en sus investigaciones el tiempo de operación fue muy corto (30h y 24h), por otra parte los materiales usados en los estudios también influyen en la remoción de materia orgánica, materiales tales como electrodos modificados o membranas de intercambio protónico como Nafion.

El investigador que logro remover mayor cantidad de DQO (84.04%) fue Ñacato (2018) en agua residual de rango alto (1000 mg/L) y a 95 mT, esto se da porque el campo magnético que mejora el metabolismo microbiano, y por lo tanto las bacterias consumen mayor cantidad de materia orgánica en menos tiempo (93 horas).

La DQO determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Para tratamiento secundarios la remoción de DQO varía entre 40% a 90% dependiendo del tipo de sistema (Metcalf y Eddy, 1995). El resultado de la eficiencia de remoción de DQO obtenido en la presente tesis cumple esta condición en la celda N° 02 y 03. Demostrándose que dos celdas alcanzaron valores promedios aceptables (celda N° 01 = 17.61%, celda N° 02 = 44.75% y celda N° 03 = 39.95%) dentro del rango reportado por bibliografía y por ende la tecnología de MFC puede ser considerado como tratamiento secundario, pues cumple con las condiciones de remoción de DQO y opera con microorganismos.

Conclusiones

- ✓ Los mejores resultados en cuanto al potencial de generación de energía eléctrica y a la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales se logró utilizando la celda N° 02 en la ciudad de Huancavelica, por cumplir con ambos parámetros como mejor tratamiento, con un nivel de confianza del 95%.
- ✓ El potencial de generación de energía eléctrica es superior a 500mV utilizando la celda de combustible microbiano (MFC) N° 02 a la primera semana en la ciudad de Huancavelica, con un nivel de confianza del 95%.
- ✓ La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales no supera al 70% en ninguna de las celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica, con un nivel de confianza del 95%.

Recomendaciones

- Se utilizó la celda de tipo H la cual es utilizada para generar mayor cantidad de energía eléctrica, en el caso de querer tratar mejor las aguas residuales y generar menor cantidad de energía utilizar las celdas de flujo ascendente.
- Es importante impermeabilizar correctamente las celdas, puesto que en la primera prueba hubo muchas fugas con el tiempo, debido a se había usado de soldemix de 2 horas, es recomendable utilizar soldemix de 24 horas.
- No utilizar materiales oxidables para los electrodos, debido a que se deteriorar y rompen, causando probablemente contaminación al medio de crecimiento bacteriano.
- No utilizar lodo de PTAP pues contiene demasiada concentración de aluminio y son tóxicos para microorganismo del agua residual, es por ello que en la primera fase se oxido todo el sistema.
- Al momento de tomar datos con el multímetro, desconectar la resistencia que une los dos sistemas, debido a que el multímetro tiene su propia resistencia interna, pues cuando están conectados ambos el voltaje se distorsiona totalmente.
- También es importante medir el pH en la cámara catódica, pues un incremento en él puede disminuir significativamente la generación de corriente de la celda.
- Se recomienda enviar las muestras a un laboratorio acreditado para validad mejor los resultados, y en lo posible reducir los tiempos de envió a los laboratorios.
- Se recomienda utilizar un mediador como azul de metileno, para incrementar el transporte de electrones.
- Se recomienda recomendar el uso de imanes y la utilización de la celda de combustible microbiano de una cámara, en el caso que se quiera ahorrar costo y generar más energía eléctrica.
- Se recomienda utilizar materiales resistentes al calor para la construcción de las celdas de combustible mironiano, debido a que al esterilizar las piezas en la autoclave no se deformen, y se evite errores en la lectura de datos.

Referencias bibliográficas

Bermudez, M. A., & Bernal, E. D. (2018). Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica. Retrieved from http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf

Bosques, J. L., & Suacedo, L. (2005). Electricidad Básica. *Facultad de Trabajo Social de La UNLP*, 107. Retrieved from http://www.trabajosocial.unlp.edu.ar/uploads/docs/electricidad_basica_ii.pdf

Briceño, K. (2015). ¿Qué es la Curva de Crecimiento Bacteriano? Características Principales - Lifeder. *Lifeder*. Retrieved from https://www.lifeder.com/curva-crecimiento-bacteriano/

Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). 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.

Calderón, H. M. (2017). Generación y acumulación de energía eléctrica utilizando sistemas de Celdas de Combustible Microbianas (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP “La Tomilla”- Arequipa, 1–114.

Carmona, A. A. (2008). Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H2, 132. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15755.90400

Cervantes, C. (2011). Biodegradación De Aguas Residuales Y Producción De Electricidad En Una Celda De Combustible Microbiana, 87.

EMAPA, H. (2008). Plan Maestro Optimizado de la Empresa Prestadora de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado, 1–106.

Falcón, A., Lozano, J. E., & Juárez, K. (2009). Bioelectricidad. *BioTecnologia*, *13*(3), 62–78.

Flores, M. (2013). Conocimientos básicos de electricidad, 44. Retrieved from http://ricardoprieto.es/mediapool/61/615322/data/TECNOLOGIA_ELECTRICA0001.pdf

Franco, L. I., & Ricaurte, S. A. (2018). Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez.

Galvez, C. (2013). Eficiencia de la PTAR de San Lucas Sacatepequez, Sacatepequez, 98.

Gonzáles, A. (2015). Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas, 1–410.

Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2013). *Análisis y diseño de experimentos*. (Mc Graw Hill, Ed.), *Análisis y Diseño de Experimentos* (Tercera ed).

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Huitzil, T. E. (2010). Generación de electricidad empleando Geobacter Sulfurreducens. Retrieved from http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7309/1/TESIS.pdf

INEI. (2018). Perfil Sociodemográfico del Perú CENSO NACIONAL 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas, 1–644. Retrieved from https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/index.html

Jibaja, S. J. (2018). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas a partir de tiosulfato utilizando cepas de Acidithiobacillus ferrooxidans, 106.

Llontop, E. O. (2018). Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxigeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana.

Logan, B. E. (2007). Microbial Fuel Cells. In *Biochemical Engineering and Biotechnology* (pp. 527–555). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63357-6.00018-3

Medina, S. A., & Zapata, M. J. (2017). Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de dqo en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio. *Universitas Nusantara PGRI Kediri*, *01*, 1–7. Retrieved from http://www.albayan.ae

Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. *McGraw-Hill*. https://doi.org/10.1036/0070418780

MINEM. (2015). *Plan nacional de electrificación rural (PNER) periodo 2016 - 2025*. *Republica Del Peru*. Retrieved from http://www.minem.gob.pe/_publicaSector.php?idSector=12

MVCS. (2006). Reglamento nacional de edificaciones. *El Peruano*, 1–439. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

MVCS. (2013). Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

Ñacato, D. C. (2018). Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch. Retrieved from http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf

OEFA. (2014). Fiscalización ambiental en aguas residuales. *Biblioteca Nacional Del Perú N° 2014-05991*, 42. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Osinerming. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú*. Lima. https://doi.org/978-612-47350-0-4

OTASS. (2015). EMAPA Huancavelica informe final de evaluación 2013-2015.

Pineda, K. M. (2015). Producción de energía eléctrica en una Celda de Combustible Microbiana empleando Cascarilla de Arroz (Oryza sativa) como sustrato y Licor Ruminal Bovino como inóculo microbiano.

Pistonesi, C., Haure, J. L., & D`Elmar, R. (2010). Energía a partir de las aguas residuales. *EdUTecNe*, 1–63.

Ramirez, E. (2004). Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida, 46–81. Retrieved from

http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Información Tecnológica*, *24*(6), 17–28. https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004

Rojas, M. C. (2017). Análisis de la eficiencia de la generación eléctrica de un agente biológico en un sistema bioelectroquímico, 93.

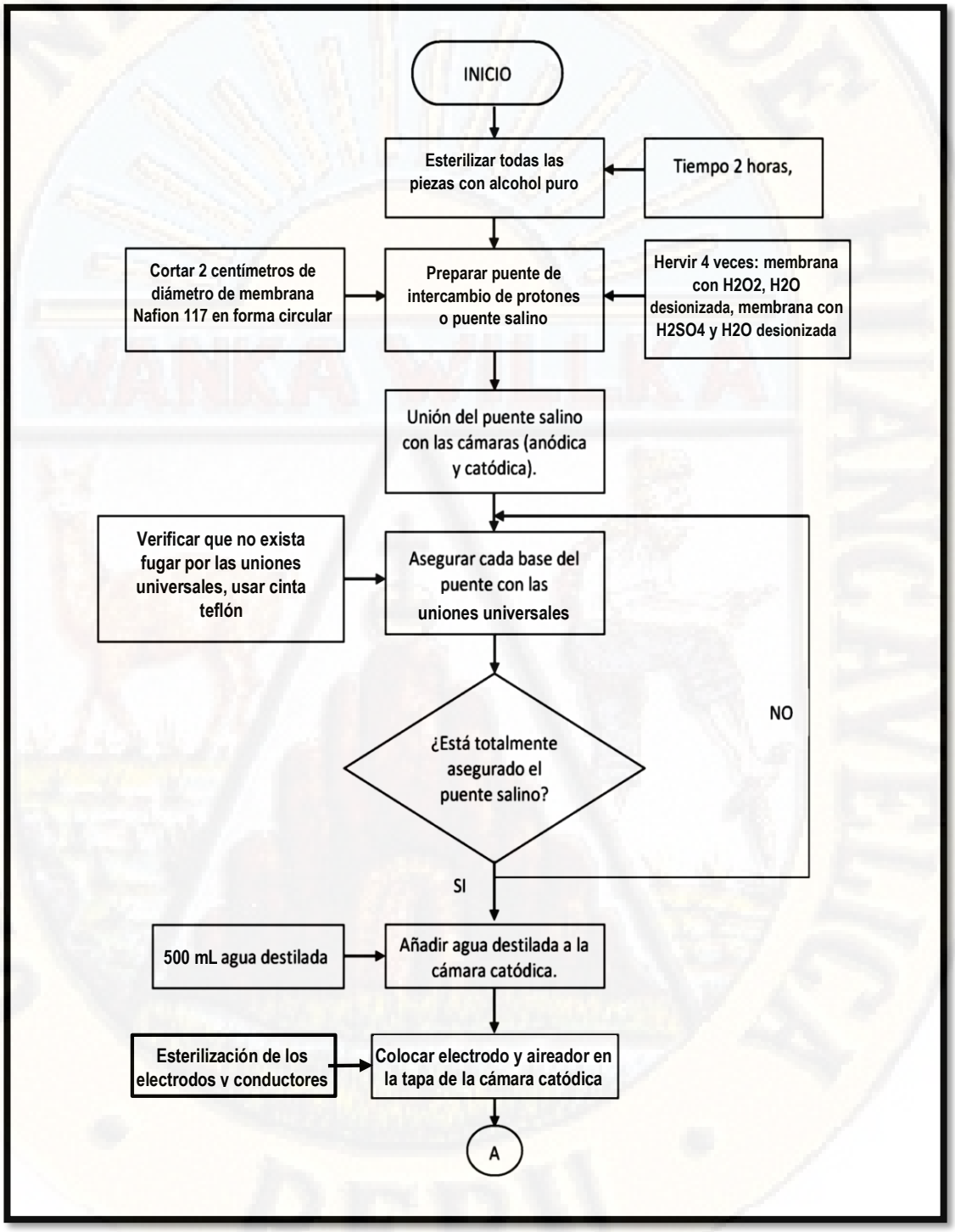
Romero, A., Adrian, J., & Lugo, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, (32), 118–143. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10

Romero, A., & Vásquez, J. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, (32), 118–143. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10

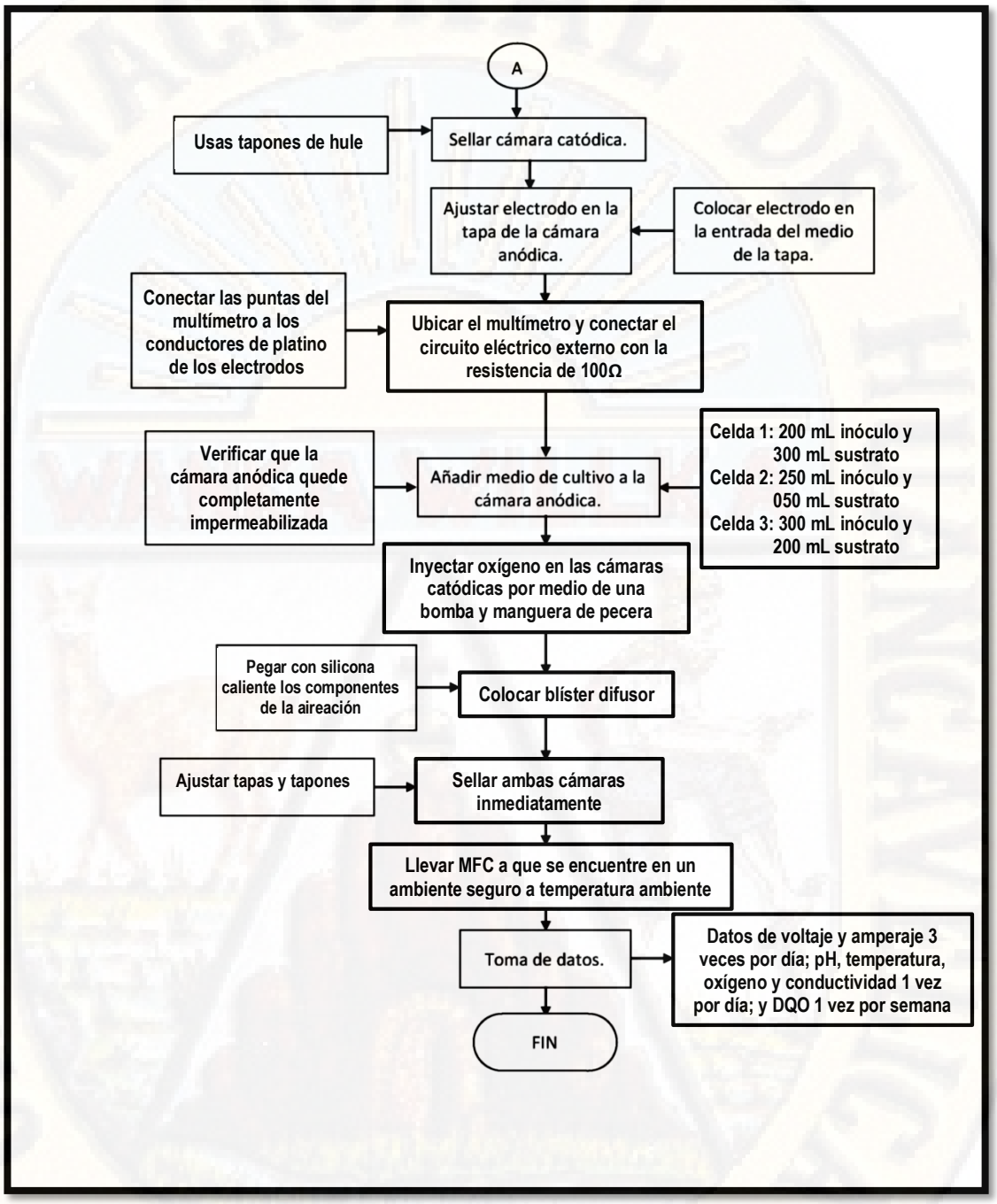
Saavedra, I. M. (2012). Diseño de una celda de combustible microbiológica con uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro, 57.

Apéndice

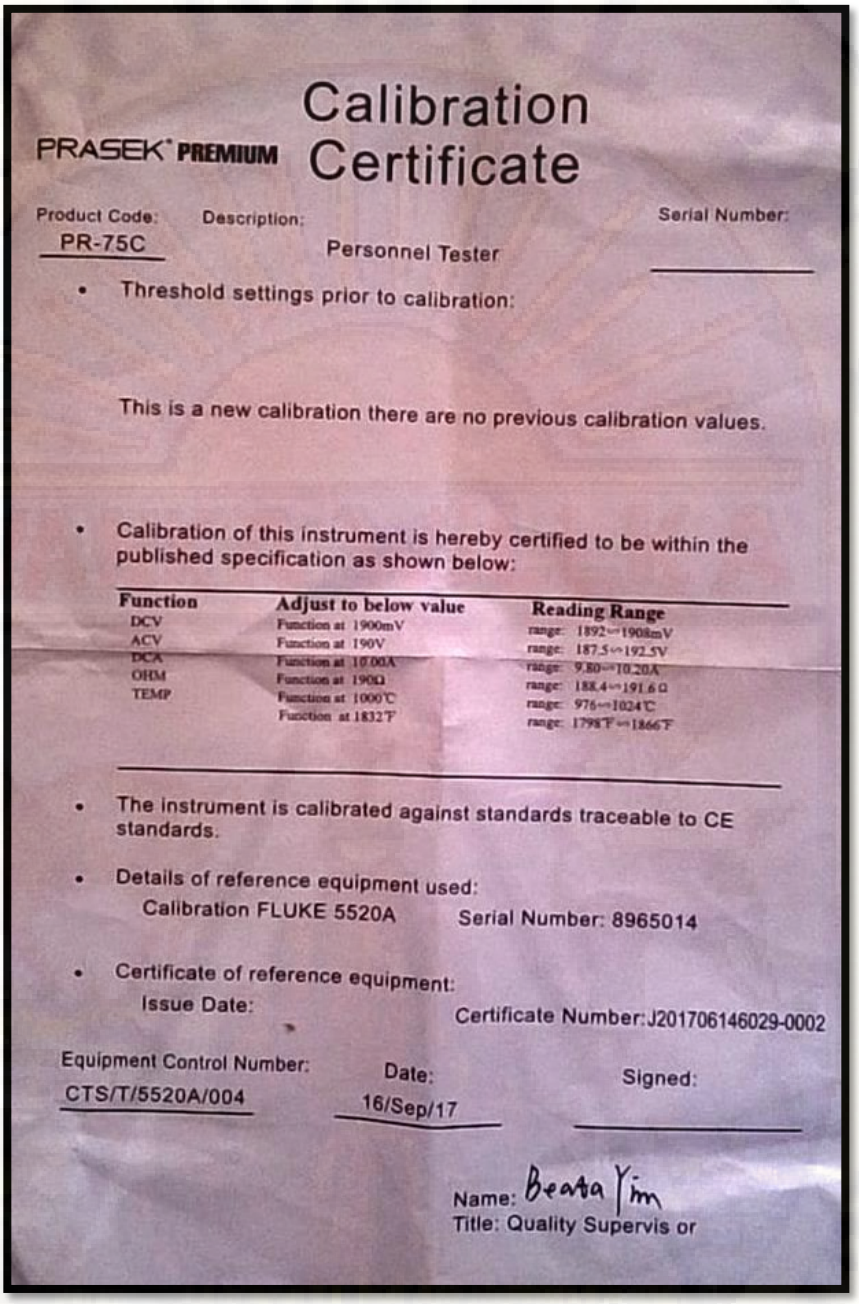
Apéndice 1. Esquema del procedimiento de construcción del prototipo de la MFC a detalle.



Apéndice 1. Esquema del procedimiento de construcción del prototipo de la MFC a detalle (continuación).



Apéndice 2. Certificado de calibración.



PRASEK® PREMIUM

Calibration Certificate

Product Code: PR-75C

Description: Personnel Tester

Serial Number: _____

- Threshold settings prior to calibration:

This is a new calibration there are no previous calibration values.

- Calibration of this instrument is hereby certified to be within the published specification as shown below:

Function	Adjust to below value	Reading Range
DCV	Function at 1900mV	range: 1892~1908mV
ACV	Function at 190V	range: 187.5~192.5V
DCA	Function at 10.00A	range: 9.80~10.20A
OHM	Function at 190Ω	range: 188.4~191.6Ω
TEMP	Function at 1000℃	range: 976~1024℃
	Function at 1832℉	range: 1798℉~1866℉

- The instrument is calibrated against standards traceable to CE standards.
- Details of reference equipment used:
  Calibration FLUKE 5520A Serial Number: 8965014
- Certificate of reference equipment:
  Issue Date: Certificate Number: J201706146029-0002

Equipment Control Number: CTS/T/5520A/004

Date: 16/Sep/17

Signed: _____

Name: Beata Yim

Title: Quality Supervis or

Apéndice 3. Reporte de análisis de laboratorio "RCJ LABS UNIVERSAL".

RCJ LABS UNIVERSAL

SERVICIO ANALISIS DE MINERALES,
SUELO AGRICOLA Y MEDIO AMBIENTE

REPORTE DE ANALISIS

Análisis Solicitado por : Braulio Ccora Repuello

Tipo de muestra : Muestras de Agua Residual Municipal de Huancavelica

Número de Muestras : 10 Muestras

Fecha de recepción : 03/01/2019

Fecha de inicio : 03/01/2019

Fecha de finalización : 11/03/2019

Tipo de ensayo : Instrumentación

ID. MUESTRAS LABORATORIO	ID. MUESTRAS CLIENTE	PARAMETROS			
Parámetros Unidad		FECHA DE ANALISIS	DQO mg/L	DQO mg/L	DQO mg/L
Tiempos de cuantificación: 165 min			N°01	N°02	N°03
MA-19/00042	MC-01	03-01-19	258.5	258.5	258.5

RCJ LABS UNIVERSAL

Oficina y Laboratorio:
Carretera Central Km 8.9 San Agustín de Cajas – Huancayo - Junin.
Referencia: Frente al Instituto A.A.C.D.de Cajas

Apéndice 4. Tabla de registro de datos de todos los parámetros en el laboratorio de la UNH.

REGISTRO DE DATOS PROYECTO DE TESIS TRATAMIENTO Y GENERACIÓN DE ENERGIA ELECTRICA DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA (ETAPA 3)									
DIA	Hora	Parametro	CELDA N° 01		CELDA N° 02		CELDA N° 03		
			Anodo	Catodo	Anodo	Catodo	Anodo	Catodo	T° (Amb) °C
12/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	416		525		435		14
		Amperaje (µA)	27		4		5		
	01:00 p. m.	pH	7.11	7.64	6.89	7.44	6.99	7.64	14
		Temp (°C)	13.45	12.54	13.56	12.43	13.15	13.16	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.13	0.00	6.48	0.00	6.21	
		Cond Elect (µS/cm)	715.14	132.78	744.65	42.15	751.18	126.71	
		Voltaje (mV)	418		544		397		
		Amperaje (µA)	30		5		6		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	420		571		315		15
		Amperaje (µA)	31		7		11		
13/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	416		534		385		14
		Amperaje (µA)	31		9		18		
	01:00 p. m.	pH	7.15	7.49	7.07	7.64	7.15	7.54	14
		Temp (°C)	13.51	13.45	13.64	13.64	13.40	13.64	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.56	0.00	6.51	0.00	6.21	
		Cond Elect (µS/cm)	751.88	154.48	751.48	48.78	751.48	134.87	
		Voltaje (mV)	397		561		377		
		Amperaje (µA)	32		10		18		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	389		504		403		14
		Amperaje (µA)	33		9		21		
14/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	395		535		354		14
		Amperaje (µA)	33		13		19		
	01:00 p. m.	pH	7.26	7.54	7.13	7.43	7.11	7.48	14
		Temp (°C)	13.25	13.43	13.41	12.43	13.74	13.54	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.53	0.00	6.15	0.00	6.15	
		Cond Elect (µS/cm)	764.48	184.18	756.48	48.14	715.18	154.48	
		Voltaje (mV)	399		463		346		
		Amperaje (µA)	36		16		19		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	417		527		387		15
		Amperaje (µA)	39		16		19		
15/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	391		487		327		14
		Amperaje (µA)	38		17		22		
	01:00 p. m.	pH	7.23	7.02	7.11	7.57	7.05	7.70	14
		Temp (°C)	13.20	12.80	13.20	13.10	13.20	12.80	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.88	0.00	6.85	0.00	6.91	
		Cond Elect (µS/cm)	764.00	197.80	774.00	56.20	763.00	164.40	
		Voltaje (mV)	405		537		340		
		Amperaje (µA)	42		19		29		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	364		489		358		14
		Amperaje (µA)	35		19		28		
16/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	374		519		314		14
		Amperaje (µA)	39		21		23		
	01:00 p. m.	pH	7.13	8.01	7.22	7.98	7.10	8.02	14
		Temp (°C)	13.42	13.01	13.70	13.10	13.70	13.00	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.13	6.88	0.03	6.89	0.04	6.91	
		Cond Elect (µS/cm)	761.00	209.10	769.00	67.80	789.00	176.50	
		Voltaje (mV)	351		539		338		
		Amperaje (µA)	36		22		25		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	350		534		339		14
		Amperaje (µA)	31		24		24		

17/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	343		512		330		14
		Amperaje (µA)	38		26		25		
	01:00 p. m.	pH	7.36	8.01	7.39	8.00	7.11	8.14	14
		Temp (°C)	13.20	12.90	13.30	13.00	13.60	12.80	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.72	0.00	6.82	0.00	6.83	
		Cond Elect (µS/cm)	758.00	221.00	759.00	81.90	789.00	186.40	
		Voltaje (mV)	298		497		348		
		Amperaje (µA)	29		25		30		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	291		555		343		14
		Amperaje (µA)	32		29		31		
18/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	305		493		345		14
		Amperaje (µA)	36		28		30		
	01:00 p. m.	pH	7.47	8.06	7.42	8.05	7.15	8.08	14
		Temp (°C)	12.90	12.60	12.90	12.80	12.90	12.50	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.01	6.86	0.00	6.88	0.00	6.92	
		Cond Elect (µS/cm)	742.00	233.00	754.00	90.60	775.00	194.60	
		Voltaje (mV)	322		501		348		
		Amperaje (µA)	32		29		28		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	339		519		334		14
		Amperaje (µA)	28		31		22		
19/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	358		521		325		14
		Amperaje (µA)	29		32		21		
	01:00 p. m.	pH	7.64	8.24	7.45	8.02	7.18	7.89	14
		Temp (°C)	13.05	12.82	13.41	12.64	13.15	12.43	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.84	0.00	6.85	0.00	6.93	
		Cond Elect (µS/cm)	764.00	214.00	751.00	115.00	784.00	218.00	
		Voltaje (mV)	344		486		338		
		Amperaje (µA)	18		24		20		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	392		428		341		14
		Amperaje (µA)	12		28		18		
20/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	393		439		358		14
		Amperaje (µA)	14		25		22		
	01:00 p. m.	pH	7.51	8.40	7.51	7.90	7.20	7.33	14
		Temp (°C)	13.20	12.80	13.90	12.90	13.30	12.70	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.74	0.00	6.88	0.02	6.93	
		Cond Elect (µS/cm)	745.00	249.00	744.00	118.20	778.00	219.80	
		Voltaje (mV)	380		381		323		
		Amperaje (µA)	4		26		24		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	395		348		384		14
		Amperaje (µA)	8		24		23		
21/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	399		426		406		14
		Amperaje (µA)	8		26		24		
	01:00 p. m.	pH	7.61	8.15	7.56	7.96	7.20	8.12	14
		Temp (°C)	12.90	12.60	12.90	12.60	13.00	12.50	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.81	0.00	6.82	0.00	6.88	
		Cond Elect (µS/cm)	741.00	323.00	732.00	124.40	760.00	199.50	
		Voltaje (mV)	376		328		395		
		Amperaje (µA)	18		24		32		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	359		346		359		14
		Amperaje (µA)	20		27		28		
22/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	307		322		369		14
		Amperaje (µA)	16		25		34		
	01:00 p. m.	pH	7.56	8.12	7.54	8.02	7.22	8.02	14
		Temp (°C)	12.90	12.50	13.00	13.00	13.00	12.50	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.04	6.88	0.00	6.52	0.00	6.91	
		Cond Elect (µS/cm)	741.00	320.00	701.00	124.20	786.00	197.90	
		Voltaje (mV)	327		322		369		
		Amperaje (µA)	16		25		34		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	306		311		375		14
		Amperaje (µA)	44		29		34		
23/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	355		375		386		14
		Amperaje (µA)	42		31		37		
	01:00 p. m.	pH	7.73	7.20	7.61	8.17	7.29	8.18	14
		Temp (°C)	13.50	13.20	13.70	13.20	13.60	12.70	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.64	0.00	6.81	0.00	6.93	
		Cond Elect (µS/cm)	726.00	342.00	722.00	133.40	777.00	203.90	
		Voltaje (mV)	375		439		436		
		Amperaje (µA)	52		32		44		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	368		387		368		14
		Amperaje (µA)	40		31		39		

24/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	351		390		370		14
		Amperaje (µA)	48		31		41		
	01:00 p. m.	pH	7.73	8.03	7.64	8.26	7.27	8.25	14
		Temp (°C)	13.50	13.50	14.00	13.40	13.70	13.00	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.18	6.37	0.09	6.64	0.10	6.83	
		Cond Elect (µS/cm)	727.00	347.00	747.00	114.30	775.00	209.10	
		Voltaje (mV)	376		418		415		
		Amperaje (µA)	50		33		45		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	362		406		358		14
		Amperaje (µA)	49		30		41		
25/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	350		417		372		14
		Amperaje (µA)	45		34		43		
	01:00 p. m.	pH	7.61	7.24	7.53	8.11	7.27	8.11	14
		Temp (°C)	13.80	13.50	13.50	13.30	13.00	12.80	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.46	6.87	0.00	6.83	0.00	6.90	
		Cond Elect (µS/cm)	723.00	360.00	634.00	146.40	766.00	213.00	
		Voltaje (mV)	294		393		451		
		Amperaje (µA)	40		32		53		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	285		372		386		14
		Amperaje (µA)	40		31		45		
26/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	276		380		313		14
		Amperaje (µA)	42		25		37		
	01:00 p. m.	pH	7.58	8.09	7.51	8.04	7.31	8.05	14
		Temp (°C)	13.90	13.50	13.90	13.60	13.00	13.50	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.00	6.64	0.00	6.54	0.00	6.19	
		Cond Elect (µS/cm)	615.00	348.00	615.00	178.00	714.00	246.00	
		Voltaje (mV)	329		426		364		
		Amperaje (µA)	53		35		43		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	294		503		332		14
		Amperaje (µA)	20		44		42		
27/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	274		503		332		14
		Amperaje (µA)	20		44		42		
	01:00 p. m.	pH	7.34	8.25	7.65	8.14	7.16	8.09	14
		Temp (°C)	13.60	13.40	14.10	14.00	13.80	13.50	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.13	6.80	0.02	6.60	0.38	6.72	
		Cond Elect (µS/cm)	709.00	379.00	666.00	162.20	746.00	249.00	
		Voltaje (mV)	353		493		225		
		Amperaje (µA)	61		43		28		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	333		380		183		14
		Amperaje (µA)	58		18		22		
28/02/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	287		338		157		14
		Amperaje (µA)	49		29		19		
	01:00 p. m.	pH	7.47	7.58	7.73	8.20	7.27	7.91	14
		Temp (°C)	13.70	13.30	13.80	13.50	13.60	13.30	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.73	6.70	0.13	6.69	0.45	6.66	
		Cond Elect (µS/cm)	703.00	391.00	668.00	166.10	752.00	257.00	
		Voltaje (mV)	309		205		309		
		Amperaje (µA)	54		17		22		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	325		221		201		14
		Amperaje (µA)	52		18		25		
01/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	286		257		157		14
		Amperaje (µA)	51		41		19		
	01:00 p. m.	pH	7.55	8.25	7.93	8.25	7.35	8.30	14
		Temp (°C)	13.50	14.20	14.10	13.80	13.90	13.30	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.39	6.71	0.06	6.73	0.27	6.66	
		Cond Elect (µS/cm)	643.00	401.00	668.00	168.90	742.00	246.00	
		Voltaje (mV)	349		234		161		
		Amperaje (µA)	53		21		22		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	334		285		254		14
		Amperaje (µA)	50		26		33		
02/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	363		244		242		14
		Amperaje (µA)	55		23		32		
	01:00 p. m.	pH	7.50	8.19	7.73	8.25	7.27	7.36	14
		Temp (°C)	14.00	13.60	14.40	13.90	13.60	14.10	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.31	6.81	0.13	6.57	0.00	6.69	
		Cond Elect (µS/cm)	701.00	410.00	669.00	174.10	753.00	269.00	
		Voltaje (mV)	351		313		249		
		Amperaje (µA)	59		30		34		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	339		265		276		14
		Amperaje (µA)	62		24		35		

03/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	374		277		251		14
		Amperaje (µA)	64		25		32		
	01:00 p. m.	pH	7.59	8.34	7.88	8.08	7.31	8.30	14
		Temp (°C)	13.90	13.30	14.10	13.70	13.90	13.30	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.30	6.70	0.15	6.42	0.35	5.90	
		Cond Elect (µS/cm)	698.00	410.00	630.00	189.20	720.00	310.00	
		Voltaje (mV)	384		215		223		
		Amperaje (µA)	66		20		29		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	406		252		246		14
		Amperaje (µA)	72		24		32		
04/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	353		229		230		14
		Amperaje (µA)	66		20		25		
	01:00 p. m.	pH	7.54	7.43	7.59	7.78	7.26	7.36	14
		Temp (°C)	13.50	13.10	13.70	13.14	13.70	13.20	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.26	6.74	1.71	6.78	0.01	6.67	
		Cond Elect (µS/cm)	677.00	337.00	665.00	148.40	743.00	195.80	
		Voltaje (mV)	384		151		151		
		Amperaje (µA)	62		14		16		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	376		230		218		14
		Amperaje (µA)	56		19		22		
05/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	415		190		234		14
		Amperaje (µA)	64		15		24		
	01:00 p. m.	pH	7.59	7.96	7.61	7.99	7.33	8.00	14
		Temp (°C)	13.80	13.20	13.30	13.70	13.90	13.20	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.15	6.68	0.18	6.67	0.00	6.61	
		Cond Elect (µS/cm)	672.00	351.00	662.00	153.40	746.00	203.60	
		Voltaje (mV)	438		177		297		
		Amperaje (µA)	69		14		30		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	404		143		282		14
		Amperaje (µA)	70		13		28		
06/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	397		175		354		14
		Amperaje (µA)	64		14		23		
	01:00 p. m.	pH	7.51	7.96	7.56	8.06	7.34	7.92	14
		Temp (°C)	13.50	12.90	13.50	13.30	13.30	12.80	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.26	6.76	1.12	6.75	0.13	6.71	
		Cond Elect (µS/cm)	657.00	368.00	653.00	157.60	728.00	210.00	
		Voltaje (mV)	370		152		261		
		Amperaje (µA)	71		13		27		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	373		118		199		14
		Amperaje (µA)	66		9		21		
07/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	384		99		213		14
		Amperaje (µA)	67		9		24		
	01:00 p. m.	pH	7.56	7.68	7.61	7.93	7.39	7.82	14
		Temp (°C)	13.70	13.10	13.80	13.80	13.40	12.90	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.19	6.71	1.30	6.67	0.38	6.81	
		Cond Elect (µS/cm)	649.00	321.00	656.00	162.30	723.00	217.20	
		Voltaje (mV)	392		195		219		
		Amperaje (µA)	67		18		23		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	380		294		188		14
		Amperaje (µA)	64		26		20		
08/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	373		197		176		14
		Amperaje (µA)	63		30		20		
	01:00 p. m.	pH	7.70	7.83	7.75	7.40	7.36	8.16	14
		Temp (°C)	13.40	13.10	13.40	13.70	13.90	13.00	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.89	6.73	2.09	6.70	0.18	6.65	
		Cond Elect (µS/cm)	639.00	434.00	653.00	165.80	719.00	221.00	
		Voltaje (mV)	368		257		179		
		Amperaje (µA)	67		22		19		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	390		269		240		14
		Amperaje (µA)	59		24		22		
09/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	390		252		186		14
		Amperaje (µA)	61		18		27		
	01:00 p. m.	pH	7.86	7.90	7.75	8.16	7.25	8.26	14
		Temp (°C)	14.10	13.50	13.50	13.70	13.60	13.60	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.04	6.63	0.30	6.73	0.00	6.60	
		Cond Elect (µS/cm)	638.00	487.00	649.00	167.90	729.00	230.00	
		Voltaje (mV)	384		209		227		
		Amperaje (µA)	65		20		24		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	396		172		248		14
		Amperaje (µA)	64		15		26		
10/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	380		181		289		14
		Amperaje (µA)	63		16		33		
	01:00 p. m.	pH	7.83	8.36	7.49	8.42	7.27	8.35	14
		Temp (°C)	13.20	13.10	13.30	13.50	13.40	13.10	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.77	6.73	0.44	6.66	0.00	6.63	
		Cond Elect (µS/cm)	857.00	447.00	650.00	165.90	723.30	227.00	
		Voltaje (mV)	423		338		262		
		Amperaje (µA)	78		33		32		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	342		175		234		14
		Amperaje (µA)	64		22		32		
11/03/2019	07:00 a. m.	Voltaje (mV)	426		242		303		14
		Amperaje (µA)	63		20		17		
	01:00 p. m.	pH	7.64	7.77	7.50	8.20	7.36	8.07	14
		Temp (°C)	13.40	12.90	13.50	13.40	13.60	12.90	
		Oxig Disuelto (mg/L)	0.25	6.71	2.06	6.67	0.06	6.57	
		Cond Elect (µS/cm)	626.00	560.00	642.00	173.90	720.00	233.00	
		Voltaje (mV)	347		146		156		
		Amperaje (µA)	62		15		33		
	07:00 p. m.	Voltaje (mV)	378		145		182		14
		Amperaje (µA)	69		13		30		

Apéndice 5. DATA BASE Análisis estadístico de voltaje por semanas.

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA VOLTAJE - SEMANAS 1

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET VOLTAJE_SEMANA1;
CARDS;
CELDA1      1     416   CELDA2      1     525   CELDA3      1     435
CELDA1      2     418   CELDA2      2     544   CELDA3      2     397
CELDA1      3     420   CELDA2      3     571   CELDA3      3     315
CELDA1      4     416   CELDA2      4     534   CELDA3      4     385
CELDA1      5     397   CELDA2      5     561   CELDA3      5     377
CELDA1      6     389   CELDA2      6     504   CELDA3      6     403
CELDA1      7     395   CELDA2      7     535   CELDA3      7     354
CELDA1      8     399   CELDA2      8     463   CELDA3      8     346
CELDA1      9     417   CELDA2      9     527   CELDA3      9     387
CELDA1      10    391   CELDA2      10    487   CELDA3      10    327
CELDA1      11    405   CELDA2      11    537   CELDA3      11    340
CELDA1      12    364   CELDA2      12    489   CELDA3      12    358
CELDA1      13    374   CELDA2      13    519   CELDA3      13    314
CELDA1      14    351   CELDA2      14    539   CELDA3      14    338
CELDA1      15    350   CELDA2      15    534   CELDA3      15    339
CELDA1      16    343   CELDA2      16    512   CELDA3      16    330
CELDA1      17    298   CELDA2      17    497   CELDA3      17    348
CELDA1      18    291   CELDA2      18    555   CELDA3      18    343
CELDA1      19    305   CELDA2      19    493   CELDA3      19    345
CELDA1      20    322   CELDA2      20    501   CELDA3      20    348
CELDA1      21    339   CELDA2      21    519   CELDA3      21    334
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL VOLTAJE_SEMANA1 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA VOLTAJE - SEMANAS 2

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET VOLTAJE_SEMANA2;
CARDS;
CELDA1      1     358   CELDA2      1     521   CELDA3      1     325
CELDA1      2     344   CELDA2      2     486   CELDA3      2     338
CELDA1      3     392   CELDA2      3     428   CELDA3      3     341
CELDA1      4     393   CELDA2      4     439   CELDA3      4     358
CELDA1      5     380   CELDA2      5     381   CELDA3      5     323
CELDA1      6     395   CELDA2      6     348   CELDA3      6     384
CELDA1      7     399   CELDA2      7     426   CELDA3      7     406
CELDA1      8     376   CELDA2      8     328   CELDA3      8     395
CELDA1      9     359   CELDA2      9     346   CELDA3      9     359
CELDA1      10    307   CELDA2      10    322   CELDA3      10    369
CELDA1      11    327   CELDA2      11    322   CELDA3      11    369
CELDA1      12    306   CELDA2      12    311   CELDA3      12    375
```

```
CELDA1      13    355   CELDA2      13    375   CELDA3      13    386
CELDA1      14    375   CELDA2      14    439   CELDA3      14    436
CELDA1      15    368   CELDA2      15    387   CELDA3      15    368
CELDA1      16    351   CELDA2      16    390   CELDA3      16    370
CELDA1      17    376   CELDA2      17    418   CELDA3      17    415
CELDA1      18    362   CELDA2      18    406   CELDA3      18    358
CELDA1      19    350   CELDA2      19    417   CELDA3      19    372
CELDA1      20    294   CELDA2      20    393   CELDA3      20    451
CELDA1      21    285   CELDA2      21    372   CELDA3      21    386
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL VOLTAJE_SEMANA2 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA VOLTAJE - SEMANAS 3

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET VOLTAJE_SEMANA3;
CARDS;
CELDA1      1     276   CELDA2      1     380   CELDA3      1     313
CELDA1      2     329   CELDA2      2     426   CELDA3      2     364
CELDA1      3     294   CELDA2      3     503   CELDA3      3     332
CELDA1      4     274   CELDA2      4     503   CELDA3      4     332
CELDA1      5     353   CELDA2      5     493   CELDA3      5     225
CELDA1      6     333   CELDA2      6     380   CELDA3      6     183
CELDA1      7     287   CELDA2      7     338   CELDA3      7     157
CELDA1      8     309   CELDA2      8     205   CELDA3      8     309
CELDA1      9     325   CELDA2      9     221   CELDA3      9     201
CELDA1      10    286   CELDA2      10    257   CELDA3      10    157
CELDA1      11    349   CELDA2      11    234   CELDA3      11    161
CELDA1      12    334   CELDA2      12    285   CELDA3      12    254
CELDA1      13    363   CELDA2      13    244   CELDA3      13    242
CELDA1      14    351   CELDA2      14    313   CELDA3      14    249
CELDA1      15    339   CELDA2      15    265   CELDA3      15    276
CELDA1      16    374   CELDA2      16    277   CELDA3      16    251
CELDA1      17    384   CELDA2      17    215   CELDA3      17    223
CELDA1      18    406   CELDA2      18    252   CELDA3      18    246
CELDA1      19    353   CELDA2      19    229   CELDA3      19    230
CELDA1      20    384   CELDA2      20    151   CELDA3      20    151
CELDA1      21    376   CELDA2      21    230   CELDA3      21    218
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL VOLTAJE_SEMANA3 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA VOLTAJE - SEMANAS 4

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET VOLTAJE_SEMANA4;
CARDS;
CELDA1      1     415   CELDA2      1     190   CELDA3      1     234
CELDA1      2     438   CELDA2      2     177   CELDA3      2     297
CELDA1      3     404   CELDA2      3     143   CELDA3      3     282
CELDA1      4     397   CELDA2      4     175   CELDA3      4     354
CELDA1      5     370   CELDA2      5     152   CELDA3      5     261
CELDA1      6     373   CELDA2      6     118   CELDA3      6     199
CELDA1      7     384   CELDA2      7     99    CELDA3      7     213
CELDA1      8     392   CELDA2      8     195   CELDA3      8     219
CELDA1      9     380   CELDA2      9     294   CELDA3      9     188
CELDA1      10    373   CELDA2      10    197   CELDA3      10    176
CELDA1      11    368   CELDA2      11    257   CELDA3      11    179
CELDA1      12    390   CELDA2      12    269   CELDA3      12    240
CELDA1      13    390   CELDA2      13    252   CELDA3      13    186
CELDA1      14    384   CELDA2      14    209   CELDA3      14    227
CELDA1      15    396   CELDA2      15    172   CELDA3      15    248
CELDA1      16    380   CELDA2      16    181   CELDA3      16    289
CELDA1      17    423   CELDA2      17    338   CELDA3      17    262
CELDA1      18    342   CELDA2      18    175   CELDA3      18    234
CELDA1      19    426   CELDA2      19    242   CELDA3      19    303
CELDA1      20    347   CELDA2      20    146   CELDA3      20    156
CELDA1      21    378   CELDA2      21    145   CELDA3      21    182
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL VOLTAJE_SEMANA4 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

Apéndice 6. DATA BASE Análisis estadístico de eficiencia de remoción de DQO por semanas.

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA EFICIENCIA DE REMOCION DE DQO - SEMANA 1

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET DQO_SEMANA1;
CARDS;
CELDA1      1     0.002 CELDA2      1     0.126 CELDA3      1     0.048
CELDA1      2     0.047 CELDA2      2     0.288 CELDA3      2     0.170
CELDA1      3     0.099 CELDA2      3     0.435 CELDA3      3     0.226
CELDA1      4     0.249 CELDA2      4     0.481 CELDA3      4     0.401
CELDA1      5     0.254 CELDA2      5     0.530 CELDA3      5     0.616
CELDA1      6     0.284 CELDA2      6     0.608 CELDA3      6     0.667
CELDA1      7     0.296 CELDA2      7     0.666 CELDA3      7     0.668
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL DQO_SEMANA1 = TRATAMIENTOS;
RUN;
```

```
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA EFICIENCIA DE REMOCION DE DQO - SEMANA 2

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET DQO_SEMANA2;
CARDS;
CELDA1      1     0.057 CELDA2      1     0.012 CELDA3      1     0.003
CELDA1      2     0.063 CELDA2      2     0.011 CELDA3      2     0.004
CELDA1      3     0.072 CELDA2      3     0.015 CELDA3      3     0.010
CELDA1      4     0.069 CELDA2      4     0.023 CELDA3      4     0.012
CELDA1      5     0.098 CELDA2      5     0.039 CELDA3      5     0.006
CELDA1      6     0.098 CELDA2      6     0.034 CELDA3      6     0.005
CELDA1      7     0.105 CELDA2      7     0.017 CELDA3      7     0.019
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL DQO_SEMANA1 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

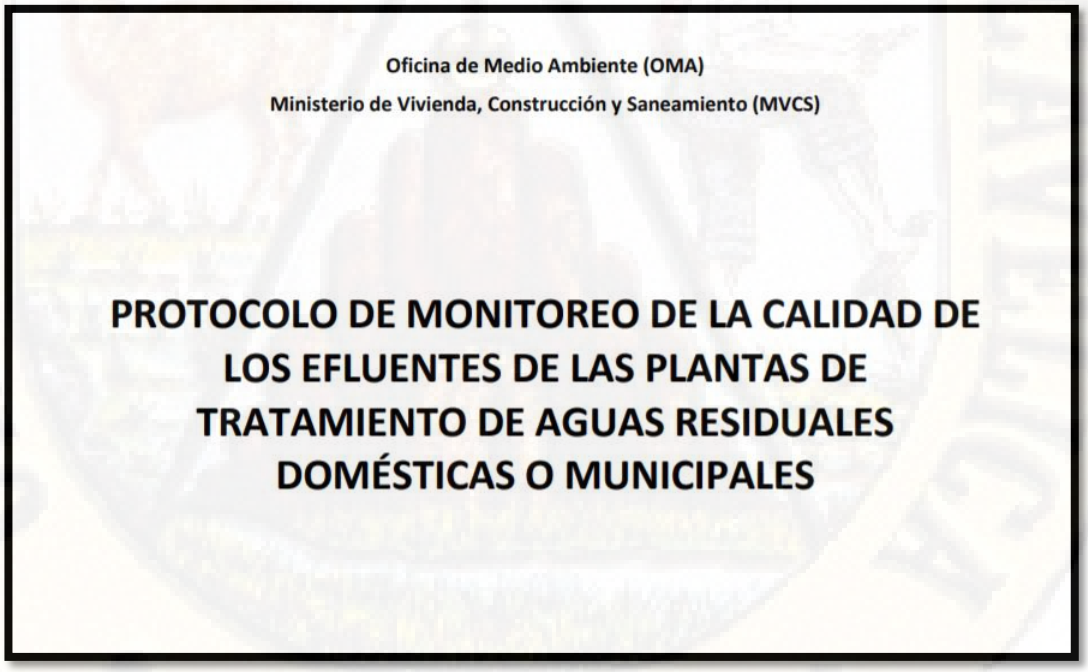
ANALISIS ESTADISTICO ANOVA EFICIENCIA DE REMOCION DE DQO - SEMANA 3

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET DQO_SEMANA3;
CARDS;
CELDA1      1     0.001 CELDA2      1     0.004 CELDA3      1     0.004
CELDA1      2     0.005 CELDA2      2     0.001 CELDA3      2     0.005
CELDA1      3     0.006 CELDA2      3     0.003 CELDA3      3     0.008
CELDA1      4     0.037 CELDA2      4     0.003 CELDA3      4     0.008
CELDA1      5     0.049 CELDA2      5     0.005 CELDA3      5     0.015
CELDA1      6     0.053 CELDA2      6     0.004 CELDA3      6     0.009
CELDA1      7     0.080 CELDA2      7     0.2   CELDA3      7     0.001
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL DQO_SEMANA3 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

ANALISIS ESTADISTICO ANOVA EFICIENCIA DE REMOCION DE DQO - SEMANA 4

```
DATA BRAULIO;
INPUT TRATAMIENTOS REPET DQO_SEMANA4;
CARDS;
CELDA1      1     0.095 CELDA2      1     0.001 CELDA3      1     0.008
CELDA1      2     0.097 CELDA2      2     0.001 CELDA3      2     0.009
CELDA1      3     0.115 CELDA2      3     0.003 CELDA3      3     0.008
CELDA1      4     0.12  CELDA2      4     0.007 CELDA3      4     0.014
CELDA1      5     0.126 CELDA2      5     0.010 CELDA3      5     0.016
CELDA1      6     0.117 CELDA2      6     0.001 CELDA3      6     0.004
CELDA1      7     0.119 CELDA2      7     0.002 CELDA3      7     0.003
PROC ANOVA DATA = BRAULIO;
CLASS TRATAMIENTOS;
MODEL DQO_SEMANA4 = TRATAMIENTOS;
RUN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;
RUN;
```

Apéndice 7. Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda



Apéndice 8. Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda (continuación).

DESARROLLO DEL MONITOREO

1. Preparación de materiales y equipos

Tiene como objetivo cubrir todos los elementos indispensables para llevar a cabo un monitoreo de forma efectiva, por lo que fue importante preparar con anticipación los materiales de trabajo.

a) Materiales

- Fichas de registro de campo
- Cadena de custodia
- Papel secante
- Cinta adhesiva
- Plumón indeleble
- Frascos debidamente etiquetados
- Cajas térmicas (pequeña)
- Hielo u otro refrigerante
- Piseta
- Agua destilada y/o desionizada
- Pipeta
- Cronómetro
- Reloj
- Vaso o probeta graduado de 1 L

b) Equipos

- GPS para la identificación inicial del punto de monitoreo
- pH-metro con función de registro de temperatura
- Cámara fotográfica

c) Indumentaria de protección

- Botines de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de jebe antideslizantes con cubierta de antebrazo
- Casco
- Mascarilla descartable

Apéndice 8. Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda (continuación).

2. Precauciones durante el monitoreo

Se estableció las siguientes consideraciones para prevenir daños personales, de materiales y equipos durante el desarrollo del monitoreo de los efluentes de las aguas residuales.

a. Si el acceso al punto de muestreo es profundo (mayor a 1.50m), está prohibido el ingreso para la toma de muestra. En tales casos, recoger las muestras con ayuda de un brazo telescópico o con un recipiente con lastre sujeto a una soguilla, pero guardando las medidas de seguridad (uso de arnés, chalecos flotadores, máscara antigases, etc.).
b. Si el punto de muestreo está confinado es necesario ventilarlo antes de realizar la toma de muestra en un período mínimo de una hora. Es necesario, además, usar un equipo de respiración autónoma.
c. Utilizar zapatos antideslizantes y cascos.
d. Después del monitoreo, es necesario cambiarse la indumentaria utilizada durante el mismo, para prevenir contaminación a terceros.

En general se tuvo conocimiento de lo siguiente:

A. El peligro de explosión causado por la mezcla de gases explosivos en el sistema de alcantarillado.
B. El riesgo de envenenamiento por gases tóxicos, por ejemplo, Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) o Monóxido de Carbono (CO).
C. El riesgo de sofocación por la falta de oxígeno.
D. El riesgo de enfermedades causadas por organismos patógenos presentes en las aguas residuales.
E. El riesgo de heridas físicas debidas a caídas y deslizamiento.
F. El riesgo de ahogamiento.
G. El riesgo de impacto causado por objetos que puedan caer.

3. Muestreo

El objetivo del muestreo es tomar una muestra representativa del efluente de las aguas residuales, para analizar los parámetros establecidos.

Al llegar al punto de monitoreo, se realizó las acciones que se describen a continuación.

a) **Ubicación del punto de monitoreo:** La toma de muestras se realizó únicamente en el punto de monitoreo debidamente marcado.

Apéndice 8. Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda (continuación).

b) **Cuidados y acondicionamiento:** En los canales, se tomó la muestra a un tercio del tirante de la superficie, evitando tomar las muestras cerca de la superficie o del fondo.

En la toma de muestras se evitó partículas grandes, sedimentos y/o material flotante que se haya acumulado en el punto de muestreo. En caso no sea posible tomar las muestras después del proceso de cribado, se tomó la muestra evitando recolectar los sólidos de gran tamaño.

c) **Medición de parámetros en campo y registro de información:** Los parámetros de campo son: pH y temperatura. A fin de obtener la confiabilidad de los datos se requiere:

- Equipo portátil calibrado (pH-metro), con registro de la calibración y mantenimiento. Debe realizarse la verificación del equipo antes del inicio del trabajo de campo y calibrar el equipo, de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante.
- Las mediciones no fueron realizadas directamente en el flujo de aguas residuales, se tomó una muestra simple en un recipiente apropiado y limpio. La determinación de pH y temperatura, se realizó inmediatamente después de la toma de muestra, considerando el tiempo máximo de duración de la muestra de 15 minutos.

4. Toma de muestras de agua, preservación, etiquetado, rotulado y transporte

La toma de muestras simples de agua residual debe debió ser realizada por laboratorios acreditados ante el INDECOPI. Las muestras fueron recolectadas y preservadas teniendo en cuenta cada uno de los parámetros considerados.

- ❖ Para el análisis de DQO se tomó 100 mL de muestra en un frasco de plásticos color ámbar de boca ancha, cierre hermético y limpio.
- ❖ Se envió al laboratorio en un frasco de vidrio de color ámbar lo más pronto posible sin agregar preservante.
- ❖ Se etiqueto los frascos antes de la toma de muestras de agua, con letra clara y legible (plumón indeleble); y se cubrió la etiqueta con cinta adhesiva transparente conteniendo la siguiente información: Nombre de la fuente y denominación del punto de monitoreo, número de muestra (referido al orden de toma de muestra), fecha y hora de la toma de muestra, preservación realizada y operador del muestreo.
- ❖ El personal responsable se colocó los guantes descartables antes del inicio de la toma de muestras de agua residual y fueron desechados luego de culminado el muestreo.
- ❖ En todo momento se evitó tomar la muestra tomando el frasco por la boca.

Apéndice 8. Protocolo de monitoreo aprobado con RM N° 273-2013-Vivienda (continuación).

- ❖ El formato de cadena de custodia fue llenado indicando los parámetros a evaluar, tipo de frasco, tipo de muestra de agua (agua residual cruda), volumen, número de muestras, reactivos de preservación, condiciones de conservación, operador del muestreo.
- ❖ Las muestras de agua residual recolectadas, preservadas y rotuladas, se colocaron en una caja de almacenamiento térmica con refrigerante (ice pack). Asimismo, se debe evitó roturas en el caso de los frascos de vidrio durante el transporte de muestras, utilizando bolsas de embalaje.
- ❖ Se transportó las muestras hasta el laboratorio, adjuntando el formato de cadena de custodia.

Al finalizar las actividades de muestreo, los equipos se mantuvieron en óptimo estado de limpieza y en buenas condiciones de funcionamiento.

Se consideró los tiempos desde el inicio del muestreo hasta la llegada al laboratorio con el objetivo de cumplir con el tiempo requerido según los requisitos para toma de muestra y preservación

5. Método de ensayo

Los métodos de ensayo para el producto agua residual fueron acreditados por el INDECOPI-SNA, mientras no existe una norma nacional, el laboratorio utilizo los métodos según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA – AWWA – WEF 22nd Edition.

Apéndice 8. Evidencia fotográfica

Acondicionando ambiente de trabajo.

Puente de intercambio iónico.

Cámara anódica y catódica con puente de intercambio iónico.

Construyendo las celdas.

Colocando membrana Nafion en laboratorio

Celdas en proceso de operación

Procesando el inóculo bacteriano y el sustrato.

Materiales de envió de muestras al laboratorio.

Toma de datos con el multímetro digítalo.

Apéndice 9. Certificado de originalidad (UNICHECK).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
(Creada por Ley N° 25265)
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

UNICHECK

Certificado de Originalidad

Por medio de este documento de Originalidad el área de Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Huancavelica, certifica y da fe que el trabajo de investigación titulado: **"GENERACIÓN DE ENERGIA ELECTRICA Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA"** presentado por el autor: **CCORA REPUELLO, Braulio** con la finalidad de obtener el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO** el Repositorio Institucional hace saber que **es una obra original** y no ha sido presentado ni publicado en otras revistas científicas nacionales e internacionales ni en sitio o portal electrónico.

Por tanto, basándonos en el cumplimiento del Art.7 inciso b) del Reglamento del Software Anti plagio de la UNH y su Directiva, el área de Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Huancavelica dictamina que este trabajo de investigación fue analizado por el software anti plagio UNICHECK y al estar dentro de los parámetros establecidos, esta investigación es **aceptado como original**.

ADJUNTO:

- ✓ Captura de pantalla de la revisión del trabajo de investigación en el software anti plagio - UNICHECK.

El presente Certificado se expide el 14 de agosto del año 2019.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL
Dr. RAUL URETA JURADO
Jefe de la Oficina de Repositorio Institucional

Apéndice 10. Matriz de consistencia.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCAVELICA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE / INDICADOR	METODOS Y TECNICAS
Problema general. ¿Cuál será potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica? **Problemas específicos.** • ¿Cuál será el potencial de generación de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica? • ¿Cuál será la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?	**Objetivo general** Evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica. **Objetivos específicos.** • Determinar el potencial de generación de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica. • Determinar la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.	**Hipótesis general.** El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV y la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70% utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica. **Hipótesis específicas.** • El potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500mV utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica • La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70% utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.	**Variable dependiente** **1.** Potencial de generación de energía eléctrica. **Indicadores** • Voltaje. **2.** Eficiencia de tratamiento del agua residual municipal **Indicadores** • Eficiencia de remoción de DQO. **Variables independientes** 1. Composición de las Celdas de combustible microbiano (MFCs) **Indicadores** • Celda N° 01: 40% de inóculo bacteriano y 60% de sustrato. • Celda N° 02: 50% de inóculo bacteriano y 50% de sustrato. • Celda N° 03: 60% de inóculo bacteriano y 40% de sustrato.	**Tipo o clase de investigación:** Aplicada **Nivel o alcance de investigación:** Explicativo **Diseño de investigación:** Experimentales, Diseños para comparar tres tratamientos, DCA. **Población** Caudal de 20 m^3/s de aguas residuales municipales administradas por EMAPA – Huancavelica en el año 2019. **Muestra** Un caudal de 1 L/mes. **Muestreo** No probabilístico. **Técnicas e instrumentos de recolección de datos:** Experimentación y observación. **Técnicas de procesamiento y análisis de datos:** Microsoft Excel 2016 y SAS