

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad
en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua
residual doméstica – Lima

Por:

Aracel Erica Condori Pacheco

Gustavo Torres Zamata

Asesor.

Mg. Joel Hugo Fernández Rojas

Lima, Febrero del 2019

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Mg. Joel Hugo Fernández Rojas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "BIODEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y PRODUCCIÓN DE BIOELECTRICIDAD EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (CCM) A PARTIR DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA – LIMA" constituye la memoria que presenta los Bachilleres Aracel Erica Condori Pacheco y Gustavo Torres Zamata para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

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

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, 11, Marzo del 2019.



Mg. Joel Hugo Fernández Roja

Biodegradación de la materia orgánica y producción de bioelectricidad
en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua
residual doméstica - Lima

TESIS

Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO CALIFICADOR


Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez
Presidenta


Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio
Secretario


Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga
Vocal


Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe
Vocal


Mg. Joel Hugo Fernández Rojas
Asesor

Lima, 18 de febrero de 2019

DEDICATORIA

A DIOS:

“Por habernos permitido llegar hasta este momento y brindarnos la fuerza espiritual para poder afrontar el reto de elaborar un proyecto de grado, siendo este un nuevo mundo de bioenergía que, gracias a la bendición intelectual, nos permitió conocer una pequeña parte de la creación de Dios”

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por brindarnos la vida, la salud, la economía, la sabiduría, paciencia y la fortaleza espiritual de poder culminar este pionero esfuerzo y desafiante trabajo.

Expresamos nuestra gratitud al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) del Ministerio de Educación (MINEDU) por brindarnos la oportunidad de realizar nuestros estudios con éxito en la Universidad Peruana Unión, y de cumplir uno de nuestros objetivos y metas que trazaran y encaminaran el inicio de un futuro mejor en nuestras familias y nuestro Perú.

También queremos hacer un extenso agradecimiento a nuestros padres y hermanas, quienes subvencionaron nuestros gastos durante todo el periodo que duro la investigación. Porque entendieron de que no se trató de unos 8 meses sin trabajar sino de 8 meses de arduo trabajo en el aporte a la ciencia.

Asimismo, agradecemos a nuestro asesor de tesis Mg. Joel Hugo Fernández Rojas por habernos brindado su apoyo incondicional, asesoramiento, enseñanzas y disponibilidad de tiempo para las observaciones. De igual forma al PhD Noé Benjamín Pampa Quispe, por sus enseñanzas por sus sabios consejos y disponibilidad de tiempo. Al Ingeniero Marco Pinchi, encargado de la PTAR de Santa Clara por apoyarnos y permitirnos el ingreso.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I	20
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1. Objetivo General.....	24
1.1.1. Objetivos específicos.....	24
CAPITULO II	25
2. REVISION BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Antecedentes	25
2.2. Marco legal.....	28
2.3. Agua residual	31
2.4. Contaminantes de las aguas residuales.....	32
2.4.1. Contaminantes orgánicos	32
2.4.2. Contaminantes inorgánicos	32
2.4.3. Contaminantes habituales en las aguas residuales	33
2.5. Efectos de las aguas residuales en el ambiente	33
2.6. Clasificación de las aguas residuales	34
2.6.1. Aguas residuales domesticas.....	34
2.6.2. Aguas residuales agrícolas.....	34
2.6.3. Aguas residuales industriales.....	34
2.6.4. Aguas residuales hospitalarios	34
2.7. Caracterización de aguas residuales domesticas.....	35
2.7.1. Característica física.....	35
2.7.2. Características químicas.....	35
2.7.3. Características Biológicas.....	39
2.7.4. Composición típica del Agua Residual Domestica	39
2.8. Sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas	39
2.9. Tratamiento Biológico	40
2.10. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales	41
2.10.1. Degradación Anaerobia de la Materia Orgánica	41
2.10.2. Proceso de Digestión Anaerobia	41
2.10.3. Mecanismos de oxidación anaerobia.....	42
2.11. Celdas de Combustible Microbiano.....	46
2.11.1. Principios de Operación de la Celdas de Combustible Microbiano.....	46

2.11.2.	Configuración y Diseño de una CCM	48
2.11.3.	Estructura básica de una CCM	53
2.11.4.	Caracterización eléctrica de las Celdas de Combustible Microbiano	59
2.11.5.	Factores que influyen en la eficiencia de las celdas de combustible microbianas.....	64
2.12.	Microorganismos en las Celdas de Combustible Microbiano.....	66
2.12.1.	Bioelectrogénesis	67
2.12.2.	Inóculo de microorganismos.....	68
2.12.3.	Microorganismos en la cámara anódica.....	68
2.12.4.	Biopelícula Microbiana.....	70
2.12.5.	Aclimatación del inóculo (biomasa).....	71
2.12.6.	Metabolismo Microbiano.	72
CAPITULO III.....		75
3.	MATERIALES Y MÉTODO	75
3.1.	Lugar de ejecución.....	75
3.1.1.	Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Santa Clara.....	76
3.2.	Materiales y Equipos	78
3.2.1.	Recolección de las muestras y análisis del agua residual doméstica.	78
3.2.2.	Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM).....	80
3.3.	Metodología.....	81
3.3.1.	Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano a escala laboratorio... ..	82
3.3.2.	Recolección de la muestra.....	94
3.3.3.	Obtención del inóculo (microorganismos)	96
3.3.4.	Caracterización del agua residual doméstica	99
3.3.5.	Acondicionamiento de electrodos para la formación de biopelícula y aclimatación de los microorganismos electrogénicos.....	101
3.3.6.	Operación de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM).....	104
3.3.7.	Análisis del desempeño eléctrico de la CCM.....	109
3.3.8.	Análisis de biodegradación de la materia orgánica.	112
3.4.	Variables de Estudio.....	113
3.4.1.	Variable Independientes.....	113
3.4.2.	Variable Dependientes	113
3.4.3.	Variables Intervinientes	114
3.5.	Estudio y Diseño de Investigación.....	114

3.5.1.	Tipo de investigación	114
3.5.2.	Diseño de la Investigación	114
3.5.3.	Matriz de Consistencia	116
3.6.	Diseño estadístico	118
3.6.1.	Diseño estadístico para la generación de bioelectricidad.....	118
3.6.2.	Diseño estadístico para biodegradación de la materia orgánica presente en el agua residual domestica.....	119
CAPITULO IV		123
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	123
4.1.	Caracterización del Aguas Residual Domestica	123
4.1.1.	Biodegradabilidad del Agua Residual Domestica	124
4.2.	Análisis físico-químicos de los parámetros reales antes y después del tratamiento.....	125
4.3.	Biodegradación de la Materia Orgánica en las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	127
4.3.1.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	127
4.3.2.	Análisis Estadístico	133
4.3.3.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	138
4.3.4.	Análisis Estadístico	143
4.3.5.	Análisis de Biodegradabilidad entre Afluente y Efluente	148
4.3.6.	Remoción Total Obtenida	149
4.3.7.	Comparación de los valores DQO y DBO post tratamiento con la normativa	152
4.3.8.	Relación de la biodegradación de la materia organica y la bioelectricidad	155
4.4.	Desempeño electroquímico de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	155
4.4.1.	Aclimatación de las Celdas de Combustible Microbiano	155
4.4.2.	Generación de bioelectricidad en la fase de operación	157
4.4.3.	Voltaje	158
4.4.4.	Densidad de Potencia.....	171
4.4.5.	Eficiencia Coulombica(EC)	181
4.5.	Factores intervinientes en la eficiencia de las Celdas de Combustible Microbiano	190
4.5.1.	Potencial de Hidrogeno	190
4.5.2.	Temperatura del Agua.....	195
CAPITULO V		201
5.	CONCLUSIONES	201

6. RECOMENDACIONES.....	203
7. REFERENCIAS.....	205
8. ANEXOS	224

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de la PTAR.....	30
Tabla 2.Valores Máximos Admisible para descarga al sistema de alcantarillado.....	31
Tabla 3. Degradación biológica de los componentes de las aguas residuales.....	36
Tabla 4. Composición representativa del agua residual domestica.....	39
Tabla 5. Tipos de tratamiento de las aguas residuales.....	40
Tabla 6. Componentes básicos de una Celda de Combustible Microbiano.....	52
Tabla 7. Coordenadas Geograficas de la PTAR Santa Clara.....	76
Tabla 8. Materiales para la construcción de la Celda de Combustible Microbiano.....	80
Tabla 9. Tipos de configuraciones de las CCM usadas a escala laboratorio.....	82
Tabla 10. Cuadro comparativo de tipos de Celdas Combustible Microbiano	83
Tabla 11. Configuración de las 5 Celdas de combustible Microbiano.....	94
Tabla 12 Biodegradación de la materia orgánica y obtención de bioelectricidad a distintas áreas de electrodo y resistencias externas	107
Tabla 13 Variables de operación.....	109
Tabla 14 Matriz de Consistencia	109
Tabla 15 Diseño Factorial variable codificada y no codificada para la obtención de los resultados de Bioelectricidad (mV).....	119
Tabla 16 Caracterización de las Aguas Residuales Domesticas	124
Tabla 17 Biodegradabilidad del Agua Residual Domestica.....	125
Tabla 18 Parámetros Fisicoquímicos antes y después del tratamiento por replicas mediante el sistema de CCM.....	126
Tabla 19. Valores de Demanda Química de Oxigeno en la fase de aclimatación.....	128
Tabla 20 Remoción de la materia organica en función de la DQO.....	130
Tabla 21. Remoción promedio de la materia orgánica en función de la DQO.....	131
Tabla 22 Normalidad de Datos mediante la prueba de Shapiro - Wilk para el parámetro DQO	134
Tabla 23 Análisis de comparación de medias del parámetro DQO.....	136

Tabla 24. Prueba de T-Student de muestras relacionadas del parámetro DQO	137
Tabla 25. Valores de la Demanda Biologica de Oxigeno en la fase de aclimatación.....	139
Tabla 26. Remoción de la materia organica en función de la DBO ₅	141
Tabla 27. Remoción promedio de la materia organica en función de la DBO ₅	142
Tabla 28. Normalidad de datos mediante la prueba de Shapiro- Wilk para el parámetro DBO ₅	144
Tabla 29. Análisis de comparación de medias del parámetro DBO ₅	146
Tabla 30. Prueba de T-Student de muestras relacionadas del parámetro DBO ₅	147
Tabla 31. Biodegradabilidad del agua residual después del tratamiento.....	149
Tabla 32. Resultados de investigación realizadas en CCM vs porcentajes de reducción de la DQO y DBO.....	152
Tabla 33. Parametro de DQO post tratamiento en comparación con la Normativa.....	153
Tabla 34. Parametro de DBO post tratamiento en comparación con la Normativa.....	153
Tabla 35. Voltajes máximos de las Celdas de Combustible Microbiano para cada Replicas.....	159
Tabla 36. Voltaje promedio de las Celdas de Combustible Microbiano.....	164
Tabla 37. Análisis de varianza para la Resistencia externa y Área superficial Total del electrodo de Grafito sobre el Voltaje.....	166
Tabla 38. Valores de la Densidad de Potencia.....	172
Tabla 39. Resistencia del conductor de Grafito.....	176
Tabla 40. Densidad de Potencia promedio de las Celdas de Combustible Microbiano.....	177
Tabla 41. Análisis de Variancia (ANOVA) del efecto de las variables independientes en la generación de Densidad de Potencia (mW/m ²)	178
Tabla 42. Eficiencia Coulombica de las Celdas de Combustible Microbiano.....	182
Tabla 43. Eficiencia Coulombica Promedio en relación a la remoción de DQO y Densidad de Potencia.....	183
Tabla 44. Comparación de parámetros de desempeño de diferentes configuraciones en Celdas de Combustible Microbiano de Tipo H.....	184
Tabla 45. Análisis de varianza-ANOVA del efecto de la Resistencia externa y Área de superficie total del electrodo de Grafito en la Eficiencia Coulombica (%)	186
Tabla 46. Valores de pH obtenidos en la aclimatación.....	191
Tabla 47. Valores de pH promedio en las CCM	194
Tabla 48. Valores de temperatura en la aclimatación.....	196
Tabla 49. Valores promedio de temperatura en las CCM.....	199
Tabla 50. Remoción de la materia orgánica en función de la DQO y DBO ₅ en las CCM ...	237

Tabla 51. Datos registrados de CCM1 en un intervalo de 24 horas.....	238
Tabla 52. Variables de Cálculo Matemático para el metodo trapecio	239
Tabla 53. Calculo para n = 9 trapecios, integral de área bajo la curva	240
Tabla 54. Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM1)	242
Tabla 55. Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM2)	243
Tabla 56. Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM3)	244
Tabla 57. Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM4)	245
Tabla 58. Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM5)	246
Tabla 59. Características del agua residual durante la operación de las CCM	247
Tabla 60. Biodegradabilidad del agua residual en las 3 réplicas de operación de las CCM	247
Tabla 61. Parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento mediante el sistema de las CCM durante la operación.....	248
Tabla 62. Densidad de potencia por día de las Celdas de Combustible Microbiano.....	249
Tabla 63. Monitoreo del parámetro “pH”	250
Tabla 64. Valores de entrada y Salida del pH	250
Tabla 65. Monitoreo del parámetro de temperatura del Agua.....	251
Tabla 66. Valores de entrada y salida de la T°C- Agua.....	251
Tabla 67. Monitoreo de voltaje de la CCM1	252
Tabla 68. Monitoreo de voltaje de la CCM2	257
Tabla 69. Monitoreo de voltaje de la CCM3	262
Tabla 70. Monitoreo de voltaje de la CCM4	267
Tabla 71. Monitoreo de voltaje de la CCM5	272
Tabla 72. Suma total del Voltaje registrado en las Celdas de Combustible Microbiano.....	278

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Degradación de la materia orgánica por microorganismos.....	38
Figura 2.Reacciones de estabilización en condiciones anaerobias.	41
Figura 3.Mecanismos de digestión anaerobia	42
Figura 4.Reacción electroquímica con sacarosa que ocurre en la CCM.....	47
Figura 5.CCM de cámara única	49
Figura 6.Eschema de una CCM de dos compartimiento	50
Figura 7.Eschema de una CCM en forma rectangular	50
Figura 8.Eschema de una CCM forma miniatura	50
Figura 9.Configuración de CCM de flujo ascendente con forma cilíndrica.....	51
Figura 10.Configuración de CCM en forma cilíndrica con un compartimiento catódico de U..	51
Figura 11.Apilados de CCM de seis unidades individuales con ánodo granular.	53
Figura 12.Estructura de la Celda de Combustible Microbiano	54
Figura 13. Elementos que componen una Celda de Combustible Microbiano.....	54
Figura 14.Principales materiales utilizados como electrodos en las CCM.	56
Figura 15. Membrana de Nafion® 117	58
Figura 16. Electrodo de Grafito	62
Figura 17.Microscopia electrónica de barrido por imágenes de electrón secundario de las biopelículas formadas sobre los ánodos de las CCM después de 30 días operación.....	70
Figura 18. Principales vías de transferencia de electrones en una CCM.....	74
Figura 19. Vista general del transporte de electrones en una CCM, a través de la formación de una biopelícula formada en la superficie del ánodo	74
Figura 20. Vista Panorámica del Laboratorio la Universidad Peruana Unión.....	76
Figura 21.Vista en planta de la PTAR de Santa Clara y el detalle del punto de muestreo ...	77
Figura 22.Envases de vidrio con capacidad de 1700 ml.....	85
Figura 23.Celdas de Combustibles Microbiano de doble cámara tipo “H.....	85
Figura 24.Construcción de las CCM a escala laboratorio	86
Figura 25. Electrodos de grafito para el ánodo y cátodo para cada CCM.....	87
Figura 26.Estructura química del Agar-Agar	88
Figura 27.Agar-Agar y Cloruro de Sodio.	89
Figura 28.Longitud del puente de intercambio de protones.....	90
Figura 29. Preparación de la membrana de intercambio de protones (puente salino)	91
Figura 30.Lavado de los electrodos de grafito (ánodo y cátodo)	93
Figura 31.Pruebas de la CCM con colorante.....	94
Figura 32. Punto de muestreo PTAR Santa Clara.....	95

Figura 33. Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos por sus siglas en inglés (UASB)	97
Figura 34. Ubicación del centro de investigación en tratamiento de aguas residuales y residuos peligrosos (CITRAR).....	97
Figura 35.Descarte del lodo almacenado en la válvula del Reactor UASB.....	98
Figura 36.Toma de muestra de lodo (inoculo) del reactor UASB.....	98
Figura 37. Transporte de muestra de lodo (inoculo) del reactor UASB.....	99
Figura 38.Toma de muestras generales pre prueba (Efluente) para el análisis de parámetros químicos	100
Figura 39.Toma de muestras post prueba (Afluente) para el análisis de parámetros químicos.	101
Figura 40. Análisis de los parámetros físicos (pH y temperatura)	101
Figura 41. Acondicionamiento de los electrodos para la formación de la biopelícula de microorganismos electrogénicos.....	102
Figura 42. Acondicionamiento de la CCM para la fase de aclimatación	103
Figura 43.Aclimatación de microorganismos electrogénicos al sustrato	104
Figura 44.Puesta en marcha de la CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5.....	105
Figura 45.Dispositivos Multimetro PR-36 para el seguimiento de la energía eléctrica obtenida	108
Figura 46.Diagrama de proceso para las 5 CCM	109
Figura 47. Procedimiento del diseño de la investigación	115
Figura 48. Diseño de la investigación para biodegradación de la materia orgánica.....	120
Figura 49. Eficiencia de Remoción en función de la DQO en la fase de aclimatación de las CCM	129
Figura 50.Eficiencia de Remoción promedio en función de la DQO en distintas configuraciones de CCM.....	133
Figura 51.Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO Afluente.....	134
Figura 52.Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO Efluente.....	135
Figura 53. Diagrama de Bloques, para el parámetro de la DQO	138
Figura 54. Eficiencia de Remocion en función de la DBO ₅ para las distintas configuracione de CCM.	140
Figura 55. Eficiencia de Remocion en funcion de la DBO5 a distintas configuraciones de CCM.	143
Figura 56.Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO5 Afluente	145

Figura 57.Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO Efluente	145
Figura 58.Diagrama de Bloques, para el parámetro de DBO ₅	148
Figura 59.Eficiencia de Remoción Total de la Materia orgánica (DQO y DBO ₅) presente en el Agua residual Domestica para las 5 configuraciones de las CCM.....	150
Figura 60. Relación de la biodegradación y la bioelectricidad.	155
Figura 61.Comportamiento del voltaje en la fase de aclimatación	157
Figura 62.Monitoreo de las CCM y medición de voltaje con el Multímetro digital PRASEK PREMIUM PR-36.....	158
Figura 63. Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM1.	160
Figura 64.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM2.	160
Figura 65.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM3	161
Figura 66.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM4	161
Figura 67.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM5	162
Figura 68.Comportamiento del voltaje registrado de las 3 réplicas durante los 27 días la operación de las 5 CCM.....	163
Figura 69.Voltajes promedio general de las Celdas de Combustible Microbiano.....	166
Figura 70.Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A _{ST} -Grafito (cm ²) en la generación de Bioelectricidad (mV).....	167
Figura 71.Diagrama de Superficie para la generación de Bioelectricidad.....	169
Figura 72.Curvas de contorno para la generación de Bioelectricidad.....	169
Figura 73.Efecto de la resistencia, longitud del electrodo y área superficial del grafito en la generación de la Densidad de Potencia (mW/m ²)	173
Figura 74.Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A _{ST} -Grafito (cm ²) en la generación de la Densidad de Potencia (mW/m ²)	179
Figura 75. Diagrama de superficie para la generación de la Densidad de Potencia (mW/m ²)	180
Figura 76. Curvas de contorno para la generación de Densidad de Potencia (mW/m ²)	180
Figura 77.Significancia de los efectos principales Resistencia y A _{ST} Grafito (cm ²) en la Eficiencia Coulombica (EC).....	187
Figura 78.Diagrama de Superficie para la Eficiencia Coulombica	188
Figura 79.Curvas de contorno para la Eficiencia Coulombica	189

Figura 80.Valores de "pH" obtenidos durante la operación de las 5 CCM. R1: Replica 1; R2: Replica 2; R3: Replica 3.....	193
Figura 81.Valores de "T°C Agua " durante la operación de las 5 CCM. R1: Replica 1; R2: Replica 2; R3: Replica 3.....	198
Figura 82.Influencia de la Temperatura del agua en la eficiencia de Remoción	200
Figura 83.Enaves de Vidrio para las camaras de las CCM	224
Figura 84. Corte de los elctrodo de grafito	224
Figura 85.Armado de las Celdas de Combustible Microbiano	225
Figura 86.Preparación del Puente Salino	225
Figura 87.Materiales para la limpieza de los Electrodo de Grafito	225
Figura 88.Campana extractora de gases	226
Figura 89.Limpieza de los Electrodo de Grafito con Ácido Clorhídrico (1M) en la campana de extracción de Gas.	226
Figura 90.Materiales para el acondicionamiento de los electrodos y enriquecimiento de los microorganismos.....	227
Figura 91.Incubación de los electrodos (ánodo) a 35°C	227
Figura 92.Inmersión de los electrodos en las CCM y cerrado hermético inmediatamente .	228
Figura 93.Electrodo de la derecha sin formación de la biopelícula de microorganismos y electrodo de la derecha con formación de biopelícula de Microorganismos.	228
Figura 94.Soldadura de las resistencias externa (150,100,50Ω) con estaño	229
Figura 95.Puesta en marcha de las celdas de combustible microbianas.....	229
Figura 96.Medición de Voltaje con el software-RP-36 Multímetro	230
figura 97.Muestreo de agua residual después de 9 días y medición de pH, Conductividad, Temperatura	230
Figura 98.Medición de pH con él Multiparámetro HANNA-HI9811-5	230
Figura 99.Etiquetado, Rotulado y anotación en la cadena de custodia	231
Figura 100.Muestras para el análisis de DQO y DBO ₅	231
Figura 101.Muestra de agua residual antes y después	231
Figura 102.Celda de Combustible Microbiano 1, 2, 3, 4 y 5	232
Figura 103. Shapiro Wilk- Campana de Gaus para el Afluente	236
Figura 104. Shapiro Wilk- Campana de Gaus para el Efluente	236
Figura 105.Método del Trapecio para la determinación de la Eficiencia Coulombica de las CCM1. Línea de Tendencia Polinómica de la Intensidad de Corriente (mA) en función del Tiempo (Horas).....	238
Figura 105.Método del Trapecio para la determinación de la Eficiencia Coulombica de las CCM1. Línea de Tendencia Polinómica de la Intensidad de Corriente (mA) en función del Tiempo (Horas).....	¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE ANEXOS

8. ANEXOS.....	224
8.1. Anexo I- Implementación del Proyecto de Investigación	224
8.1.1. Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano.....	224
8.1.2. Acondicionamiento de los Electrodo (Ánodo) para la formación de la biopelícula de microorganismos electrogénicos.....	227
8.1.3. Inversión de los electrodos en la cámara ánódica de las Celdas de Combustible Microbiano.....	228
8.1.4. Instalación de las resistencias externas en las celdas de combustible microbiano.....	229
8.1.5. Monitoreo y medición del voltaje de las celdas de combustible microbiano ...	229
8.1.6. Muestreo del agua residual de las Celdas de Combustibles Microbiano para los análisis físicoquímicos	230
8.1.7. Celdas de Combustible Microbiano.....	232
8.2. Anexo II- Cálculos.....	233
8.2.1. Cálculo de la Densidad de Potencia	233
8.2.2. Cálculo del Porcentaje de Remoción (%).....	235
8.2.3. Cálculo de la Eficiencia Coulombica	238
8.3. Anexo III- Resultados.....	247
8.4. Anexo IV- Resultados de los monitoreos	250
8.4.1. Potencial de Hidrogeno (pH).....	250
8.4.2. Temperatura del Agua	251
8.4.3. Voltaje.....	252
8.5. Anexo V- Análisis de laboratorio de los parámetros químicos de la DQO y la DBO ₅ 279	
8.5.1. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) en la fase de aclimatación	279
8.5.2. Análisis de laboratorio del post-tratamiento en la fase de aclimatación.....	281
8.5.3. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 1	284
8.5.4. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 1	286
8.5.5. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 2	289
8.5.6. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 2	291
8.5.7. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 3	294
8.5.8. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 3	296
8.5.9. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) del Punto Central	299
8.5.10. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para el punto central.....	300

ECUACIONES

Ecuación 1.Voltaje (V).....	60
Ecuación 2. Intensidad de Corriente (I)	60
Ecuación 3. Potencia (P)	60
Ecuación 4. Densidad de Potencia (DP).....	61
Ecuación 5.Área Superficial del Electrodo de Grafito (AAn)	62
Ecuación 6. Resistividad	62
Ecuación 7. Eficiencia Coulombica (EC)	63
Ecuación 8.Eficiencia Coulombica para agua residual	63
Ecuación 9.Eficiencia de Remocion de DQO.....	112
Ecuación 10. Eficiencia de Remocion de DBO5	112
Ecuación 11.Diseño Experimental.....	119
Ecuación 12.Estadística de prueba	122
Ecuación 13. Modelo Matematico Lineal	170
Ecuación 14.Modelo lineal para Densidad de potencia	181
Ecuación 15.Modelo lineal para la Eficiencia Coulombica	189

SIMBOLOS/ NOMENCLATURA

b_{O2}: Numero de Moles de electrones generados por mol de oxigeno

CCM: Celda de Combustible Microbiano

CITRAR: Centro de investigación en tratamiento de aguas residuales y residuos peligrosos

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigeno

DQO: Demanda Química de Oxigeno

DC: Densidad de Corriente Eléctrica

Dp: Densidad de Potencia

ECAS: Estándar de Calidad Ambiental

EC: Eficiencia Coulombica

F: Constante de Faraday

H₂SO₄: Ácido Sulfúrico

HCl: Ácido Clorhídrico

I: Intensidad de corriente Eléctrica.

INACAL: Instituto Nacional de Calidad

LMP: Límites Máximos Permisible

L: Litros

MO₂: Peso molecular del Oxigeno

MO: Materia Orgánica

(M): Concentración Molar

mV: Mili voltios

mg: Miligramos

NaCl: Cloruro de Sodio

NaOH: Hidróxido de Sodio

PEM: Membranas de Intercambio Protónico

pH: Potencial de Hidrogeno

PTAR: Planta de Tratamiento de aguas Residuales

PVC: Cloruro de Polivinilo

P: Potencia

PA: Potencia por Unidad de Área de electrodo

PV: Potencia por unidad de Volumen de sustrato

SEDAPAL: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado

T°C: Temperatura

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UNI: Universidad Nacional de Ingeniería

UTM: universal transversal de Mercator

Van: Volumen total de la cámara anódica

V: Voltaje

Ω: Ohmios

RESUMEN

La Celdas de Combustible Microbiano es una tecnología emergente para la generación de energía eléctrica, teniendo como catalizador a microorganismos electrogénicos. En La presente investigación se evaluó la biodegradación de la materia orgánica y obtención de bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM), a partir del agua residual domestica. Para ello se construyó y opero 5 CCM a escala laboratorio de doble cámara tipo “H” flujo batch con volumen de 1700 mL, las cuales constan de una cámara anaerobia y aerobia unidas con puente salino, como electrodos se utilizo barras de grafito (ánodo y cátodo) conectadas con cable de cobre como conductor eléctrico a una resistencia externa fija. Para evaluar la biodegradación de la materia orgánica se trabajó con concentraciones de DQO y DBO; los resultados obtenidos fueron analizados mediante la prueba T- *Student* para muestras relacionadas utilizando el programa *Statistica*, de ello se obtuvo que si existe diferencias significativas ($p < 0.05$) de los parámetros químicos (DQO y DBO) antes y después. Así mismo para determinar del desempeño eléctrico, se trabajó con 3 áreas superficiales del electrodo y residencias externas, los resultados fueron analizados mediante Anova Factorial y Diseño Factorial 2^k al 95 % nivel de confianza, de ello se obtuvo que la interacción resistencia externa y área superficial del electrodo fueron significativas. Finalizada la evaluación y con los resultados obtenidos se determinó que las 5 CCM presentaron eficiencias de remoción de materia orgánica (DQO y DBO) mayor al 70 % y generación de Bioelectricidad mayor a 290 mV. No obstante, la CCM2 tuvo mayor dominio quien trabajo con resistencia de 50Ω y área superficial del electrodo de 151 cm^2 , generando voltaje promedio de 380 mV y eficiencias de remoción para DQO 82.3 % y DBO 82.6 %. Demostrando que las CCM es una alternativa viable y sostenible para el ambiente.

Palabras Claves: Agua residual Domestica, Bioelectricidad, Celdas de Combustible Microbiana, microorganismos electrogénicos y grafito.

ABSTRACT

The Microbial Fuel Cells is an emerging technology for the generation of electrical energy, having as catalyst electrogenic microorganisms. The present investigation evaluated the biodegradation of organic matter and obtaining bioelectricity in Microbial Fuel Cells (CCM), from domestic wastewater from the Santa Clara Ate - Lima WWTP. For this purpose, 5 CCMs were built and operated on a laboratory scale with a double chamber type "H" of batch flow with a volume of 1700 mL, which consists of an anaerobic and aerobic chamber connected with a saline bridge. As electrodes, graphite rods (anode and cathode) were used, coupled with copper wire as an electrical conductor to a fixed external resistance. To evaluate the biodegradation of the organic matter, we worked with concentrations of COD and DBO; the results obtained were analyzed by means of the T-Student test for related samples using the Statistica program, from which it was obtained that there are significant differences ($p < 0.05$) of the chemical parameters (COD and DBO) before and after. Also to determine the electrical performance, we worked with 3 surface areas of the electrode and external resistances, the results were analyzed by Factorial Anova and 2k Factorial Design with 95% confidence level, from which it was obtained that the interaction external resistance and surface area of the electrode were significant. After the evaluation and with the results obtained, it was determined that the 5 CCMs presented efficiencies of organic matter removal (COD and DBO) greater than 70% and generation of Bioelectricity greater than 290 mV. However, the CCM2 had greater domain who worked with resistance of 50 Ω and surface area of the electrode of 151 cm², generating average voltage of 380 mV and removal efficiencies for COD 82.3% and BOD 82.6%. Showing that the CCM is a viable and sustainable alternative for the environment.

Key Words: Domestic wastewater, Bioelectricity, Microbial Fuel Cells, electrogenic microorganisms and graphite.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El incremento de la población no solo genera problemas sociales, si no también ambientales, entre más personas habiten en el planeta, mayor será el consumismo, el gasto energético y agua necesaria para abastecerlos, aumentando así la generación de residuos, la huella de carbono y la producción de aguas residual (Alzate, Carmen, Álvares y Sebastian, 2008).

Concerniente al agua, la urbanización y migración de la población esta potencialmente ligado a un incremento en la demanda de agua y energía. El aumento en la demanda de agua, incrementa los caudales de aguas residuales, por lo tanto, existe la presencia de grandes cantidades de materia orgánica y nutriente en el ambiente. En cualquier país o municipio, se debe planificar que los efluentes posean un tratamiento al final de su recorrido por el drenaje. Dentro del proceso de tratamiento de los efluentes, la remoción de la materia orgánica es el factor más importante a realizar, mediante procesos primarios y secundarios en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), donde se reduce la gran cantidad de contaminantes presentes en ellos (Garcia, 2014). Así como es muy importante dar tratamiento a este efluente, el costo para poder llevarse a cabo es muy alto. Por lo que las tecnologías actuales de tratamiento de estos efluentes no son sostenibles para satisfacer las crecientes necesidades de saneamiento de agua, simplemente porque son energéticas y costosas (Crombet, Perez y Avalos, 2013).

En el Perú Cerca de 11 millones de personas carecen de alcantarillado, solo el 62% del desagüe es captado por las Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) y los servicios de saneamiento son insostenibles por, la insuficiente inversión, problemas

económicos en las operaciones, falta de apoyo estatal y normas legales inadecuadas (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [VIVIENDA], 2017).

Estudios realizados por Larios, Gonzales y Morales (2015) indican que, en el 2009 de acuerdo a los datos registrados, 786 Millones de Metros Cúbicos (MMC) de Aguas Residuales Domésticas (ARD), 511 MMC se encontraban sin Tratamiento, de las cuales corresponden a Lima y Callao 325 MMC. De un total de 143 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTAR), solo el 4.9 % (7 plantas) estaba operando en niveles óptimo. Otro problema existente es el alto consumo de energía eléctrica que se genera en la operación de las PTAR, esto invita a desarrollar tecnologías alternativas de tratamiento. Los costos de operación son un factor sustancial en el tratamiento de aguas residuales, con más de la mitad de los gastos operativos que normalmente se necesitan para la aireación de aguas residuales (Larios et al., 2015). En cuanto al tema de saneamiento en Lima, SEDAPAL es la empresa responsable del tratamiento de las aguas servidas. Entre las que se pueden destacar la PTAR de Santa Clara que cuenta con un sistema de aireación extendida y, los costos elevados se originan más que todo por el consumo de energía eléctrica y por los costos anuales de mantenimiento de los equipos electromecánicos (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2015).

El alto consumo de energía eléctrica que se genera en las plantas de tratamiento de aguas residuales invita a desarrollar tecnologías alternativas de tratamiento. Tales tecnologías deberán requerir menor consumo de energía y un menor costo para su efectiva operación eficiente y generar menos lodos residuales. Además, los sistemas de tratamiento deberán recuperar energía o generar energía para hacer una operación global sostenible en el tratamiento de aguas residuales. Las Celdas de combustible Microbiano (CCM) generan una nueva oportunidad para

la producción sostenible de energía en forma de electricidad a partir de compuestos biodegradables presentes en las aguas residuales. Recientemente se ha demostrado que las CCM pueden ser utilizadas para producir bioenergía (electricidad, metano e hidrógeno) a partir de la oxidación de la materia orgánica (glucosa, acetato y aguas residuales) (Logan et al., 2006; Rabaey y Verstraete, 2005; Wang, Chen y Huang, 2010).

Hoy en día, las aguas residuales constituyen una fuente de agua reciclable a pesar de que contiene muchos contaminantes fisicoquímicos y bacteriológicos que pueden afectar a la salud pública y al ambiente, así mismo este efluente contiene grandes cantidades de energía renovables en forma de puentes químicos. Por ejemplo, el agua residual doméstica (ARD) podría potencialmente generar una energía de 2.2 kW/h.m³ (DQO de 500 mgO₂/L), esto considerando que la energía que contiene la glucosa es de 4.4 kW/h.kg DQO. Ahora si la energía se recupera correctamente, la energía química a través de las aguas residuales crudas puede cubrir hasta el 7% de la energía consumida por las viviendas (Logan y Regan, 2006). Esto se puede lograr en las (CCM) tecnología aun en exploración que utiliza diferentes compuestos, teniendo como catalizador a los microorganismos electrogenicos para la generación de bilectricidad.

La aplicación del sistema CCM, en el aspecto ambiental es una de las alternativas tecnológicas emergentes que podría contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afrontan la sociedad actual: La crisis de energía eléctrica y la disponibilidad de fuentes hídricas no contaminada (Revelo, Hurtado y Ruiz, 2013). El propósito del sistema de la CCM no es competir con tecnologías existentes de generación de energía eléctrica y sistemas de tratamiento de agua residuales, más bien es la de poder remover la materia orgánica del agua residual y obtener durante

el proceso un producto de valor agregado. Es decir, ver el tratamiento de aguas residual como un proceso que valoriza la materia orgánica presente (Buitrón y Perez, 2011). Así mismo en el aspecto económico esta tecnología podría reducir significativamente el costo de tratamiento de aguas residuales. Ya que las plantas de tratamiento de aguas residuales serian completamente autosuficientes en términos de consumo de energía, útiles especiales en áreas remotas (Liu y Logan, 2004).

En el aspecto social, bajo condiciones adecuadas de desarrollo tecnológico, este tipo de proceso podría no solamente ser utilizado a gran escala para tratar aguas residuales de una ciudad o industria, sino también sería factible para ser instalado en pequeñas comunidades o incluso en comunidades dispersas o aisladas del país, donde la necesidad de saneamiento es mayor para proteger la salud humana y la propagación de enfermedades. Al mismo tiempo se lograría formar un ambiente sostenible.

Teniendo numerosas ventajas que ofrecen esta tecnología emergente de Celdas de Combustible Microbiano (CCM), se consideró aplicar en esta investigación para la biodegradación de la materia orgánica de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y la generación simultanea de Bioelectricidad, la producción de energía medida aquí podría proporcionar la energía que tanto se necesita en las PTAR. Los procesos que pueden generar electricidad durante el tratamiento de ARD podrían ayudar a reducir la carga económica del tratamiento y proporcionarían acceso a tecnologías de saneamiento en el Perú.

1.1. Objetivo General

Evaluar la biodegradación de la materia orgánica y la producción de bioelectricidad en las celdas de combustible microbiano a partir del agua residual doméstica.

1.1.1. Objetivos específicos

- Analizar la eficiencia de remoción de materia orgánica en función a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual doméstica en las celdas de combustible microbiano a partir del agua residual doméstica.
- Analizar la eficiencia de remoción de materia orgánica en función a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) del agua residual doméstica mediante celdas de combustible microbiano a partir del agua residual doméstica.
- Determinar el efecto de las diferentes resistencias y área superficial total del electrodo de Grafito en la generación de bioelectricidad.

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes

Los primeros estudios realizados en celdas de combustible microbianas (CCM) se llevaron a cabo en 1911, cuando M.C. Potter descubrió generar electricidad por medio de *Escherichia Coli*, usando un electrodo de platino (Potter, 1911), no obstante esto no generó mucho interés debido a que la diferencia de potencia era mínima. Sin embargo, las Celdas Combustible Microbiano retomaron un gran interés en el siglo XX, durante la década de los 60's, cuando la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio en Estados Unidos de América (NASA) manifestó su interés en transformar residuos orgánicos en electricidad para uso en viajes espaciales de larga duración. Los microorganismos empleados eran algas y bacterias (Shukla, Suresh, Berchmans y Rejendran, 2004; He y Angenent, 2006 y Nevin, et al., 2008).

En los últimos años ha evolucionado el uso de microorganismos como biocatalizadores en las CCM para cumplir funciones de transformación de energía y remoción de compuestos (Tremblay y Zhang, 2015). Las CCM utilizada para tratar agua residual doméstica fue introducida por (Habermann y Pommer, 1991). Dentro de esta línea de investigación, el uso de materia orgánica residual, es una alternativa tecnológica que presenta mayor grado de avance. A continuación, se muestra algunos de los estudios realizados:

Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell: Investigación realizada por Liu, Ramnarayanan y Logan (2004) demostraron que es posible producir electricidad en una CCM a partir de aguas residuales domésticas, mientras que al mismo tiempo se logra el tratamiento

biológico de aguas residuales (disminución de la demanda química de oxígeno; DQO). En las pruebas que realizaron utilizaron una celda de combustible microbiana de una sola cámara (CCM) que contenía ocho electrodos de grafito (ánodos) y un solo cátodo de aire. El sistema fue operado bajo condiciones de flujo continuo con efluente clarificador primario obtenido de una planta local de tratamiento de aguas residuales. El prototipo de reactor CCM generó energía eléctrica (máximo de 26 mW/m²) mientras que eliminaba hasta el 80% de la DQO de las aguas residuales. La potencia de salida fue proporcional al tiempo de retención hidráulica en un rango de 3-33 h a la intensidad del agua residual en un rango de 50-220 mg/L de DQO. La eficiencia de Coulombica del sistema, basada en la eliminación de DQO y la generación de corriente, fue <12%, lo que indica que una fracción sustancial de la materia orgánica se perdió sin la generación actual. La tecnología CCM puede proporcionar un nuevo método para compensar los costos operativos de la planta de tratamiento de aguas residuales, haciendo que el tratamiento avanzado de aguas residuales sea más asequible para los países en desarrollo e industrializadas.

“Efecto de la transición gradual del sustrato sobre el rendimiento de las celdas de combustible microbianas de cátodo de aire de panel plano para el tratamiento de aguas residuales domésticas”: Park et al. (2016) en sus investigación confirma los efectos de la baja conductividad y biodegradabilidad de las aguas residuales, en donde el cátodo de aire plano (FA-CCM) se operaron suministrando sustratos con diferentes relaciones de volumen de aguas residuales domésticas mezcladas con un medio artificial (glucosa). Concluyendo que la configuración FA-CCM tiene una gran aplicabilidad para aplicaciones prácticas cuando es suministrada por aguas residuales domésticas con baja conductividad y biodegradabilidad.

Por otro lado, las investigaciones realizadas por Wu et al. (2017) con el título **“Ánodos de cepillo combinados de fibra de carbono y fibra de grafito pequeños para mejorar y estabilizar la generación de energía en células de combustible microbianas que tratan aguas residuales”**. Donde desarrollaron una configuración de ánodo compuesto para mejorar el rendimiento, al unir la malla y los cepillos entre sí, con la malla utilizada para bloquear el cruce de oxígeno a los cepillos y los cepillos utilizados para estabilizar los potenciales de malla. En pequeños CCM alimentados por lotes (28 mL), el ánodo compuesto producía densidades de potencia un 20 % más altas que los CCM que utilizan solo cepillos, y 150 % de densidad de potencia en comparación con los ánodos de malla de carbono. Demostrando que redujeron con éxito la contaminación por oxígeno del ánodo y el bioincrustado del cátodo

Así mismo, autores como Arriaga et al. (2018) realizaron la investigación en **“Tratamiento de aguas residuales domésticas y generación de energía en celda de combustible microbiana apilada con aire y cátodo de flujo continuo: Efecto de la configuración en serie y paralela”** : En cuyo estudio, se usó una pila de flujo continuo que consta de 40 unidades CCM de aire-cátodo individuales para determinar el rendimiento de CCM apiladas durante el tratamiento de aguas residuales operadas con CCM individual desconectado y en configuración en serie y paralela. Demostrando que cuando el CCM apilado se desconectó de conexiones en serie y paralelas, la eliminación de contaminantes, el rendimiento eléctrico y la comunidad microbiana cambiaron significativamente. Se observaron caídas de voltaje en el CCM apilado, que estaba limitado principalmente por los cátodos. Estas pérdidas de voltaje indicaron altas resistencias dentro del CCM apilado, generando una corriente cruzada.

Puigagut y Corbella (2018) en la actualidad realizaron ***“Mejora de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales con células de combustible microbianas de humedal construidas: Influencia del material del ánodo y resistencia externa”***.

El objetivo de este estudio fue cuantificar el grado de mejora de la eficiencia del tratamiento llevado a cabo por CCM sin membrana que simula un núcleo de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal no plantado y poco profundo. Se abordaron la influencia de la resistencia externa (50, 220, 402, 604 y 1000 Ω) y el material del ánodo (grafito y grava) en la mejora de la eficiencia del tratamiento, mostrando que 220 Ω fue la mejor condición de operación para maximizar la eficiencia del tratamiento de CCM, independientemente del material de ánodo empleado y que los humedales artificiales operados como CCM son una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas.

2.2. Marco legal

El Perú, posee normativas encaminadas a lograr la adecuación ambiental de las diferentes actividades económicas desarrolladas en el país, existiendo para ello leyes, reglamentos, disposiciones, decretos supremos entre otros. Para el desarrollo de este proyecto se tiene en cuenta la siguiente normatividad.

“Constitución Política del Perú- Art. 67- (29/12/1993)”: Artículo 67°. “El estado determina la Política Nacional del Ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos”.

“Ley N° 28611 (Ley General del Ambiente). (15/10/2005)”: “Artículo 5°- Los recursos naturales constituyentes patrimonio de la Nación. Su protección y conservación pueden ser invocadas como causa de necesidad publica, conforme a ley”. “Artículo 24°- Toda actividad humana que implique construcciones, obras,

servicios y actividades, así como las políticas, planes y programas públicos susceptibles de causar impactos ambientales de carácter significativo, está sujeto, de acuerdo a ley, al sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental- SEIA, las cuales son administradas por la autoridad Ambiental Nacional”.

“Ley 29338- Reglamento de ley de Recursos Hídricos”: “Artículo 131°. - Aguas residuales, aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo.”

“Artículo 132- Aguas residuales domésticas y municipales. 132.1°. - Las aguas residuales domésticas, son aquellas de origen residencial, comercial e institucional que contienen desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana. 132.2°. - Las aguas residuales municipales son aquellas aguas residuales domesticas que puedan incluir la mezcla con aguas de drenaje pluvial o con agua residuales de origen industrial siempre que estas cumplan con los requisitos para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado”.

“Decreto Supremo 004-2017-MINAM: Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua”: El objetivo principal de dicho decreto es “establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente” (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

“Decreto supremo 003-2010-MINAM: Aprueban el Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Domésticas o Municipales”. Con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes, para evitar daños a la salud y al ambiente.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de la PTAR

Parametro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y Grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	< 35

Fuente: Recuperado de MINAM, 2010.

“Decreto supremo 010-2019-VIVIENDA: Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario”. Las descargas de aguas residuales no domésticas en la red de alcantarillado sanitario contienen concentraciones elevadas de sustancias contaminantes o tóxicas que deben ser reguladas, controladas y fiscalizadas, a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias y equipos, disminuyendo los costos de su operación y mantenimiento, y evitando el deterioro de los procesos de tratamiento de las aguas residuales;

Que, por otro lado la presencia de sustancias nocivas en concentraciones elevadas en las aguas residuales que descargan a las redes de alcantarillado pone en peligro la salud de los seres humanos; Los Valores Máximos Admisibles (VMA)

son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento - EPS, o las entidades que hagan sus veces.

Tabla 2

Valores Máximos Admisible para descarga al sistema de alcantarillado

Parametro	Unidad	Expresión	VMA para Descargas al Sistema de Alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	100

Fuente: Recuperado de Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [VIVIENDA], 2015.

2.3. Agua residual

Desde la perspectiva de la fuente de generación, se define al agua residual como la mezcla de los residuos líquidos o aguas portadoras de residuos, por lo que son originadas en domicilios, instituciones públicas, industrias y comerciales, a los que pueden agregarse, casualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1998). Estos efluentes son vertidos a los cuerpos receptores de agua (ríos, lagos y mar) y suelos, originando efectos peligrosos como: la reducción del oxígeno, por la carga de distintos contaminantes y obstruyendo la vida de la flora y fauna existentes en dichos cuerpos (Ocola, 2010).

En investigaciones llevadas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 2003, indica que, en América Latina, el 94% del agua residual se descarga a los cuerpos de agua superficial o se usa sin tratamiento previo para riego, la cual ocasiona enfermedades infecciosas, mortalidad

y morbilidad infantil, por la pésima calidad del agua. A causa de la contaminación de las aguas superficiales en el Perú en el año 2009, se tomó la decisión de tratar el agua residual para poder ser reutilizada en la agricultura, en la “Resolución N° 0291-2009-ANA” se dispone el “otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y de reúsos de aguas residuales tratadas”, con el propósito de no seguir perjudicando sus cuerpos receptores (Mendez y Muñoz, 2010).

2.4. Contaminantes de las aguas residuales

2.4.1. Contaminantes orgánicos

2.4.1.1. Residuos de Proteínas. Proceden principalmente de las heces humanas o desechos de alimentos. Son de fácil degradación, inestables y generan un olor putrefacto, desagradable para el ser humano (Mayo, 2010).

2.4.1.2. Residuos de Carbohidratos. Proviene de los desperdicios alimenticios y de las excretas humanas, estos son azúcares, almidón y fibras celulósicas (Mayo, 2010).

2.4.1.3. Residuos de Aceites y Grasas. Son aquellos que proceden de las acciones generadas en la cocina, de naturaleza lipídica, los cuales son estables, no se mezcla con el agua debido a su mínima densidad, estimulando la aparición de ácidos grasos, saturados e insaturados y otros en la superficie de las aguas residuales (Mayo, 2010).

2.4.2. Contaminantes inorgánicos

Los contaminantes inorgánicos son de origen mineral y tienen una naturaleza variada ya que están compuestas por sales, ácidos, óxidos, metales y bases inorgánicas. Se encuentra en abundancia en las aguas residuales sin importar su

procedencia. Principalmente provienen de las industrias llamadas aguas residuales industriales (Mayo, 2010).

2.4.3. Contaminantes habituales en las aguas residuales

2.4.3.1. Arenas. Se entiende como partículas de naturaleza mineral que pueden ser de tamaños variados, que se encargan de enturbiar las masas de aguas residuales cuando estas están en movimiento y cuando están estancadas forman depósitos de lodos (Mayo, 2010).

2.4.3.2. Nitrógeno y Fosforo. Provenientes de las aguas grises las cuales están conformadas por detergentes fertilizantes e incluso en las heces humanas. Son fundamentales para deteriorar las masas acuáticas presentes en las aguas residuales (Mayo, 2010).

2.4.3.3. Contaminantes biológicos. Son aquellos microorganismos que se encuentran en las aguas residuales en cantidades mayores o menores, las cuales pueden causar terribles enfermedades en la salud humana y en el cuerpo receptor (Mayo, 2010).

2.5. Efectos de las aguas residuales en el ambiente

Las aguas residuales ocasionan los siguientes efectos en el ambiente (Ramalho, 1996 y Hernandez, 2001).

- Reducción del oxígeno disuelto en el cuerpo receptor (lagos, ríos, mar).
- Origina la eutrofización del cuerpo receptor por altas concentraciones de nitratos y ácidos orto fosfóricos presentes.
- Pérdida de la autodepuración de los cuerpos de agua con destrucción de la flora y fauna.

- Altera directamente la salud pública, influyendo sobre la economía de la sociedad y esparcimiento.
- Requiere un control riguroso y un tratamiento adecuado, para la utilización de agua con un cierto grado de contaminación.

2.6. Clasificación de las aguas residuales

2.6.1. Aguas residuales domesticas

Son aquellos líquidos provenientes de las actividades domésticas, comerciales e institucionales, así como actividades de la vida diaria como lavado de ropa, baño, preparación de alimentos, limpieza. Estos desechos presentan un alto contenido de materia orgánica, detergentes y grasas (Gadini, 2009).

2.6.2. Aguas residuales agrícolas

Son las que proceden de las escorrentías superficiales de las zonas agrícolas. Se caracterizan por la presencia de pesticidas, sales y un alto contenido de sólidos en suspensión. La descarga de esta agua es recibida directamente por los ríos o por los alcantarillados (Gadini, 2009).

2.6.3. Aguas residuales industriales

Son aquellas aguas que resultan de las actividades hechas en las distintas industrias, su composición varía según el tipo de proceso industrial y aun para un mismo proceso industrial (Organismo de Evaluacion y Fiscalizacion Ambiental [OEFA], 2014).

2.6.4. Aguas residuales hospitalarios

Son aguas con características similares a las domiciliarias; las cuales contienen elevadas concentraciones de microorganismos y/o virus (entero bacterias,

Coliformes fecales, entre otros), algunos de los cuales pueden haber adquirido multiresistencia antibiótica. Componen una mezcla de sustancias complejas cuya actividad toxica muta génica y genotoxica dependerá de interacción sinérgicas y antagónicas entre sus componentes y el ambiente (Ramos, 2008).

2.7. Caracterización de aguas residuales domesticas

2.7.1. Característica física

Se encuentra los sólidos totales en un rango de 120 mg/L a 175 mg/L, temperatura 35°C, color marrón oscuro y un olor putrefacto. La presencia de sólidos, residuos flotantes, capas de grasa y aceite, indican que son residuos altamente contaminantes y son la clara evidencia de residuos no tratados de manera eficiente (Carrion, 2008).

2.7.2. Características químicas

2.7.2.1. Biodegradabilidad. Las aguas residuales llevan consigo numerosas sustancias disueltas o en suspensión de las cuales no todas son biodegradables. La biodegradabilidad de las sustancias hace posible ser depuradas por medio de microorganismos, los que utilizan las mismas como alimento y fuente de energía para su metabolismo y reproducción. Según Osorio y Peña (2002) indican que existe una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente, que es dado por la relación entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). De este índice se tiene una referencia de la biodegradabilidad en un efluente determinado (Hernandez, 1992). Si se presentara el caso en donde DBO/DQO es menor de 0.2 se recomienda un tratamiento fisicoquímico; si $DBO/DQO > 0.4$ se considera un fuente biodegradable y si $DBO/DQO > 0.65$, entonces los vertidos se consideran orgánicos y aptos para

tratamientos biológicos (Veritas, 2008). Para resumir, hay que tener en cuenta que la biodegradabilidad no es una propiedad neta de las aguas residuales, sino que depende de la población microbiológica a la que se enfrente (Osorio y Peña, 2002). A mayor población microbiana, mayor será la biodegradabilidad. Para degradar los distintos tipos de materia orgánica presente en el agua residual hace uso de una enorme cantidad de enzimas (proteínasas, Carboxidasas, amilasas, lipasas, etc.) Ver Tabla 3.

Tabla 3

Degradación biológica de los componentes de las aguas residuales

Sustancias a degradar	Tipo de enzimas	Descomposición anaeróbica
Proteínas	Proteínasas	Aminoácidos Amoniacó Sulfhídrico Metano Dióxido de carbono Hidrogeno Alcoholes Ácidos orgánicos Fenoles
Hidratos de carbono	Carboxidasas	Dióxido de carbono Hidrogeno Alcoholes Ácidos grasos
Grasas	Lipasas	Ácidos Grasos Dióxido de carbono Hidrogeno alcoholes

Fuente: Recuperado de Nemerow y Bascaran, 1997.

2.7.2.2. Medición de la cantidad de materia orgánica. La materia orgánica en las aguas residuales se constituye principalmente de proteínas (40 - 60%), carbohidratos (25 – 50 %) y grasas y aceites (8 – 12 %) (Crites y Tchobanoglous, 2000). La materia orgánica presente en las aguas residuales se mide por las pruebas de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y/o Carbono Orgánico Total (COT) (Ramalho, 1996). La DQO y la

DBO son parámetros de estado de “reducción” de la materia orgánica. Ambos análisis calculan la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica, pero la DBO solo cuenta la fracción biodegradable, mientras que la DQO tiene en cuenta también la fracción no biodegradable. Así para los efectos de remoción de sustrato la DBO y la DQO son equivalentes, prefiriéndose la DQO por simplicidad de ejecución, además debe considerarse que a mayor cantidad de DQO mayor cantidad de contaminante de un residuo líquido (Salazar, 1993; Asociacion de Ingenieros Sanitarios de Antioquia, 1993). Los diferentes procesos biológicos trabajan por lo general con uno sólo de estos parámetros, sea DQO ó DBO para medición de consumo de sustrato (Ramalho, 1996). Así pues, la prueba de DQO puede usarse como sustituto de la prueba de DBO (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Demanda biológica de oxígeno (DBO₅). Se define como DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) de un líquido a la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaerobias facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en mg/L (ppm). Es un parámetro indispensable cuando se necesita determinar el estado o la calidad del agua de ríos, lagos, lagunas o efluentes. Cuanta mayor cantidad de materia orgánica contiene la muestra, más oxígeno necesitan los microorganismos para oxidar (degradarla). Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20 °C; esto se indica como DBO₅ (Ferrero, 1974). La medición de la DBO se basa en tres reacciones químicas que se presentan en la oxidación de la materia orgánica, síntesis de tejidos, a partir de la energía liberada y respiración endógena de la fauna microbiana (Crites y Tchobanoglous, 2000). Este valor es de gran importancia ya que

se relaciona con la cantidad de energía oxidable en el sustrato el cual es microbiológicamente usable por las células para su requerimiento de energía y su posterior síntesis.

Demanda química de oxígeno (DQO). La DQO es un parámetro que representa todos los compuestos orgánicos que se pueden oxidar. La concentración de DQO es una medida de la cantidad total de oxígeno que es necesaria para la oxidación de todos estos componentes en una solución. La DQO es eliminada por oxidación, de manera que el oxígeno necesario para esta oxidación puede provenir del oxígeno o del nitrato (Navarro, Sanchez y Collado, 1999). La DQO se usa para medir el material orgánico presente en las aguas residuales, susceptible de ser oxidado químicamente con una solución de dicromato de potasio en medio ácido. Desde el punto de vista operacional, una de las principales ventajas de la prueba de la DQO es el tiempo necesario para completarse la prueba (en la DBO se requieren mínimo 5 días, en este proceso sólo se requieren dos horas y media) (Sawyer, Carty y Parking, 1994). Así mismo su otra ventaja de este método es que cuantifica tanto la materia orgánica disuelta como la particulada. Considerando que el hecho que el tratamiento de aguas residuales tiene que ver con la separación de ambos tipos de materia orgánica, la medida de DQO es ampliamente usada como parámetros cuantitativos.

Relación entre la DBO₅/DQO. Es necesario saber cuánta materia orgánica biodegradable está presente en el efluente de aguas residuales, por consiguiente, se necesita determinar la DBO₅, sin embargo, es aconsejable medir también en paralelo la demanda química de oxígeno DQO, de esta forma se obtiene información acerca de la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos presentes en el efluente.

Además, la razón DBO₅/DQO, una vez establecida, se utiliza para controlar y operar la planta de tratamiento (Navarro et al., 1999).

2.7.3. Características Biológicas

Se encuentra organismos patógenos como: las bacterias, virus, protozoarios, hongos y algas patógenos (Rojas, 2002).

2.7.4. Composición típica del Agua Residual Domestica

Las aguas residuales domesticas presentan composición representativa y se muestra en la Tabla 4 (Metcalf y Eddy, 2014).

Tabla 4
Composición representativa del agua residual domestica

Constituyentes	Unidades	Concentración		
		Fuerte	Media	Débil
Solidos Totales	mg/L	1200	720	350
Solidos Disueltos	mg/L	850	500	250
Solidos Suspendidos	mg/L	350	220	105
Solidos Sedimentables	mg/L	20	10	5
Demanda Bioquímica de	mg/L	400	220	110
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	290	160	80
Demanda Química de Oxigeno	mg/L	1000	500	250
Nitrógeno (Total en la forma N)	mg/L	85	40	20
Orgánico	mg/L	35	15	8
Amoniaco Libre	mg/L	50	25	12
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fosforo(Total en la forma F)	mg/L	15	8	4
Orgánico	mg/L	5	3	1
Inorgánico	mg/L	10	5	3
Cloruros	mg/L	100	50	30
Alcalinidad(como CaCO ₃)	mg/L	200	100	50
Grasa	mg/L	150	100	50
Sulfato	mg/L	34	22	12
Coliformes Totales	Nº/100 ml	10 ⁷	- 10 ⁷	10 ^{7.6} -

Fuente: Recuperado de Metcalf y Eddy, 2014.

2.8. Sistemas de tratamiento de aguas residuales domesticas

El sistema de tratamiento requerido para un agua residual depende esencialmente de los límites de vertido para el efluente. En la Tabla 5 se presenta

una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales (Ramalho, 2003). Presentándose de esta manera como objetivo principal la de corregir sus características indeseables, de acuerdo con lo estipulado por los estándares de la Calidad ambiental y los Límites Máximos Permisibles. Además los tratamientos incluirán la disminución de la concentración de por lo menos uno de los cinco constituyentes más importantes del agua residual (Mejia, 1999; Rojas, 2002).

- Material Orgánico (biodegradable).
- Sólidos en Suspensión.
- Nutrientes (principalmente nitrógeno y fosforo).
- Organismos patógenos.
- Metales pesados.

Tabla 5
Tipos de Tratamiento de las Aguas Residuales

Tratamiento de Aguas Residuales		
Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciarios o Avanzados
Cribado o desbrozo	Lodos activos	Micro tamizado
Sedimentación	Aireación prolongada (procesos de oxidación total)	Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)
Flotación	Lagunaje con aireación	Precipitación y coagulación
Separación de aceites	Estabilización por lagunaje	Adsorción (carbón)
Homogenización	Filtros biológicos (percoladores)	
Neutralización		

Fuente: Recuperado de Ramalho, 2003.

2.9. Tratamiento Biológico

El tratamiento biológico empleado en las aguas residuales domesticas se da por la estabilización de la materia orgánica donde se logra aprovechar la actividad

biológica para remover sustancias orgánicas biodegradables, coloides disueltas, nitrógeno y fósforo (Rodríguez, 2009 y Moeller, et al., 2009). El tratamiento biológico puede darse en condiciones aerobias o anaerobias. En condiciones anaerobias no se requiere la adición de energía externa (Rodríguez, 2009). Presentando este tratamiento una menor demanda de costo de inversión con resultados de remoción de materia orgánica bastante elevados.

2.10. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales

2.10.1. Degradación Anaerobia de la Materia Orgánica

Todo tipo de bacteria presente en las aguas residuales necesita oxígeno para su respiración y alimento (Mejía, 1999). El proceso anaerobio es la descomposición de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre, a fin de obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios. El proceso anaerobio es menos eficiente que el aerobio en términos de producción de energía, porque la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio permanece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano (Romero, 2008). Las ecuaciones químicas de la Figura 2, presentan el proceso de oxidación de materia orgánica en ausencia de oxígeno.



Figura 2. Reacciones de estabilización en condiciones anaerobias, de Romero, 2008.

2.10.2. Proceso de Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso microbiológico complejo, que se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que establecen entre si

relaciones simbióticas, para convertir la materia orgánica a biomasa (Caicedo, 2006; Bermudez, Rodriguez, Mirna y Adis, 2007). En la Figura 3, se muestra estas relaciones simbióticas.

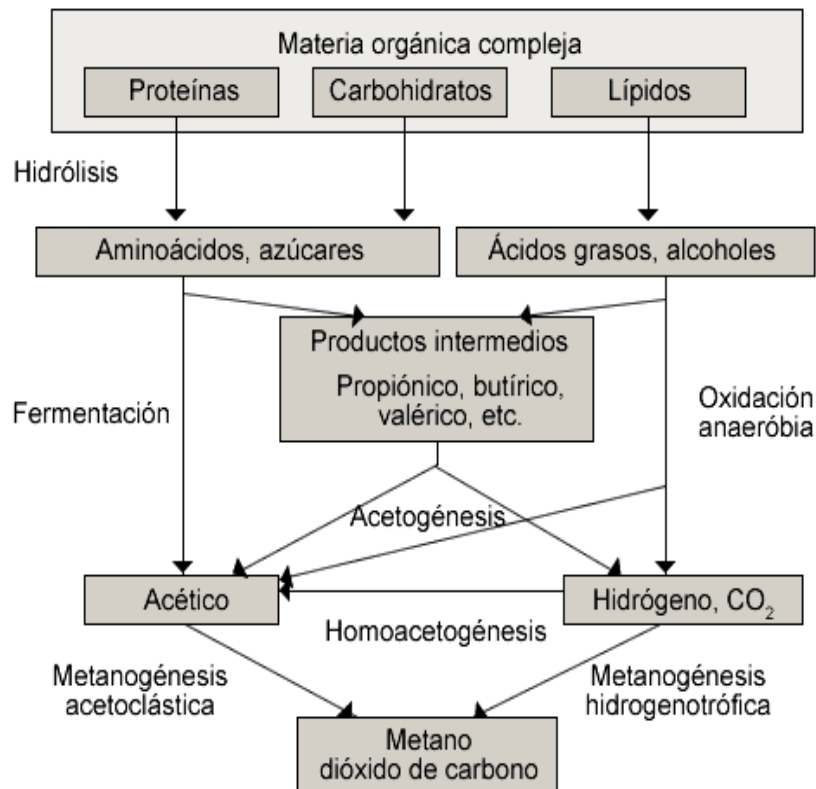


Figura 3. Mecanismos de digestión anaerobia, de Mejia, 1999.

2.10.3. Mecanismos de oxidación anaerobia

La degradación u oxidación de la materia orgánica se lleva a cabo en la cámara anódica, en donde la condición principal es la ausencia de oxígeno, en donde las bacterias buscan una ruta alterna para la producción de la energía necesaria para sus procesos metabólicos y reproductivos. En ese caso las bacterias convierten parcialmente los compuestos orgánicos hasta cadenas carbonadas de dos a tres carbonos y en algunos casos hasta dióxido de carbono. Los biodigestores son un ejemplo claro de reactores en donde se desarrolla condiciones anaeróbicas y de

alguna manera solo ciertos tipos de procesos se lleven a cabo, como es la etapa hidrolítica, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis. (Logan et al., 2006).

2.10.3.1. *Proceso hidrolítico.* Las aguas residuales son una mezcla compleja formada por proteínas, carbohidratos, grasas, ADN, etc. Y como primer paso son transformadas por bacterias hidrolíticas hasta compuestos simples denominado monómeros, que son muchos más fáciles de degradar para cualquier otra bacteria. El producto de hidrolisis de los carbohidratos son los monosacáridos y disacáridos, de las grasas es el glicerol y ácidos grasos, en las proteínas son los aminoácidos y del ADN, ARN son los respectivos azúcares (ribosa, desoxirribosa), purinas y fosfato (Metcalf y Eddy, 1995).

2.10.3.2. *Proceso Acidogénico.* En el proceso ácido génico las bacterias fermentan todos los monómeros que encuentran: azúcares, aminoácidos, alcoholes, esterres hasta hidrogeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de dos, tres y cuatro carbonos (butírico, propionico, acético). Las bacterias acidogénicas y acetogénicas pertenecen a un grupo diverso que incluye a los anaerobios facultativos y obligados. Los organismos facultativos son capaces de vivir en medios tanto aerobios y anaerobios, en cambio las especies obligadas son estrictamente anaerobias. Algunas de las especies aisladas de digestores anaerobios incluyen Clostridium, Actinomyces, Peptococcus, Bifidobacterium, Desulfovibrio, Corynebacterium, Lactobacillus, Staphylococcus, Streptococcus, Micrococcus, Bacillus, Pseudomonas, Selemonas, Veillonella, Sarcina, Desulfobacter, Desulfomonas y Escherichia Coli. Las proteínas, las grasas y los carbohidratos son metabolizados de diversas maneras, a continuación, se describe los procesos (Metcalf y Eddy, 1995):

Degradación de proteínas en condiciones anaeróbicas. Las proteínas de las aguas residuales son hidrolizadas por proteasas que las descomponen hasta aminoácidos (monómeros). Cada uno de los aminoácidos son posteriormente desaminados (eliminación de amoníaco) y convertidos hasta ácidos orgánicos (butirato, formiato, acetato).

Degradación de grasas en condiciones anaeróbicas. La degradación de las grasas en las aguas residuales se realiza gracias a la acción de las lipasas y fosfolipasas. Estas escinden las cadenas de grasas en una molécula de glicerol y tres moléculas de ácidos grasos, fosfato y colina o ácidos grasos insaturados para facilitar su digestión. Los ácidos grasos formados son nuevamente atacados por enzimas de bacterias fermentativas o por bacterias acetilénicas β - oxidativas que las escinden aún más hasta acetatos.

2.10.3.3. Proceso acetogenicos. Las bacterias acetogenicas son las encargadas de convertir ácidos orgánicos ligeros hasta una mezcla de hidrogeno, dióxido de carbono y ácido acético. Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, CO₂ e H₂. Esta oxidación es llevada a cabo por un grupo de organismos acetogenos productores obligados de hidrogeno (OHPA). Aunque la mayoría de este tipo de reacciones consume energía, en ambientes anaerobios donde la energía disponible es baja, el acoplamiento de la actividad de las bacterias con las bacterias consumidoras de H₂ (metanogénicas hidrogenolíticas) permite el balance energético favorable. Las bacterias metanogénicas hidrogenolíticas consume el hidrogeno generado por las bacterias OHPA manteniendo una presión parcial de hidrogeno a un nivel adecuado para que termodinámicamente pueda darse la

conversión de los ácidos grasos volátiles (AGV) a acetato e hidrogeno. Entre las bacterias acetogenas que se han podido aislar se encuentra: *Syntrophomonas sapovorans*, *Syntrophobacter wolinil*, *Syntromonas wolfei*, *Syntrophospara bryantil*, *Syntrophus buswellii*.

Dentro de las bacterias acetogenicas existe un grupo de bacterias conocidas como bacterias homoacetogénicas, las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO₂ como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. (Metcalf y Eddy, 1995)

2.10.3.4. Proceso metanogénico. En esta etapa del proceso se encuentran los microorganismos encargados de producir metano. En base al tipo de sustrato utilizado, las bacterias metanogénicas se subdividen en tres grupos: Aquellos que utilizan como fuente de energía H₂ y alcoholes y como aceptor final de electrones al CO₂ que es reducido a metano, los que utilizan una amplia variedad de compuestos que tienen el grupo metilo, de los cuales algunos son oxidados a CO₂ y finalmente reducidos hasta metano, y la obtenida a partir del rompimiento del acetato. (Rodriguez, s.f.). Las bacterias metanogénicas abundan generalmente en ambientes donde los aceptores finales de electrones como el O₂, NO₃, SO₄₋₂ son escasos (Fermentaciones y metanogénesis), ya que de lo contrario competirían por la ganancia de los electrones y no se generaría metano. El proceso metanogenico además requiere que el pH sea mantenido muy cercano al neutro, dado a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a los cambios bruscos de pH (Metcalf y Eddy, 1995).

Los mecanismos citados anteriormente permiten explicar cómo las bacterias logran transformar compuestos altamente complejos en sustratos fácilmente degradables y que permiten la producción de electrones (electricidad) en el ánodo.

2.11. Celdas de Combustible Microbiano

Las Celdas de Combustible Microbiano (CCM) es un reactor bioelectroquímico que utiliza microorganismos (bacterias electrogenicas) para convertir la energía química presente en un sustrato o combustible en energía eléctrica (Logan y Regan, 2006; Torres, et al., 2010; Revelo et al, 2013). En la CCM, la energía química contenida dentro de las moléculas orgánicas solubles tales como: carbohidratos y ácidos grasos volátiles (AGV's) pueden ser directamente recuperados como energía eléctrica. Esto se consigue bajo condiciones anaerobias, cuando algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica desde un donador, tal como la glucosa y (AGV's) hacia un electrodo (ánodo) en lugar de un aceptor natural de electrones, como el oxígeno o nitrato (Du, Li y Gu, 2007 y Hernández, et al., 2015).

2.11.1. Principios de Operación de la Celdas de Combustible Microbiano

El principio de operación de las CCM se basa en la extracción y transferencia de electrones desde el metabolismo microbiano (Cadena de transporte de electrones) hasta el electrodo (ánodo). Las CCM transforman un sustrato biodegradable en energía eléctrica. Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato (Sacco, Bonetto y Corton, 2010).

Las reacciones electroquímicas que sucede en el interior de las CCM se lleva a cabo de la siguiente forma: El sustrato o el agua residual es oxidado anaeróbicamente por microorganismos en el ánodo, produciendo dióxido de carbono (CO_2), electrones (e^-) y protones (H^+) los cuales toman diferentes caminos, migrando hacia el cátodo. El hidrógeno o protón (H^+) lo hará a través del electrolito (agua residual) y a través de una membrana de intercambio de protones (MIP), mientras que los electrones lo hacen a través del ánodo y por medio de un circuito externo

conectado hacia el cátodo, en este los electrones reaccionan con el aceptor final de electrones (O_2) y los protones (H^+) que previamente atravesaron el electrolito para formar Agua (H_2O) (Estrada, 2014). En tanto en condiciones aeróbicas únicamente se produciría dióxido de carbono y agua. Por ello resulta de interés mantener condiciones anaerobias para la generación de electrones (Rinaldi, Mecheri, Nardo y Traversa, 2008).

A continuación en la Figura 4 se presenta un ejemplo de una reacción típica con sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) utilizada como sustrato en la CCM:

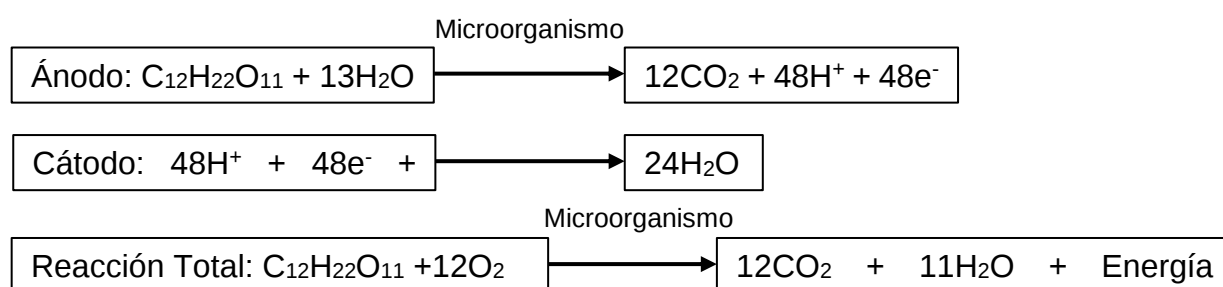


Figura 4. Reacción electroquímica con sacarosa que ocurre en la CCM, de Estrada, 2014.

Autores como (Rabaey y Verstraete, 2005 y Hernández, et al., 2015) dan a conocer las ventajas operativas y funcionales de las CCM, siendo las siguientes:

- Genera energía a partir de la materia orgánica.
- Crea corriente eléctrica y gas residual que contiene principalmente dióxido de carbono que no requiere tratamiento.
- Funciona eficientemente a temperatura ambiente e incluso a temperaturas bajas.
- No necesita energía para la aireación siempre que el cátodo se encuentra al aire libre o se airee pasivamente.

- Tiene potencial para la aplicación en lugares que carecen de energía eléctrica y también para expandir la diversidad de combustibles que utilizamos para satisfacer nuestros requisitos energéticos.
- Generan una menor cantidad de lodo en comparación con los sistemas convencionales.

2.11.2. Configuración y Diseño de una CCM

La configuración de una CCM es parte fundamental, los electrodos, los cables y membrana de intercambio de protones (MIP) presentan una parte crítica. Las CCM, se pueden diseñar de diferentes formas, pero los principales diseños se clasifican en tres categorías (Jumma, Patil y Pandhre, 2016).

- Cámara Única CCM
- Cámara Doble CCM
- Apilado CCM

2.11.2.1. Cámara única CCM. El diseño de la cámara única presenta diferente manera de construir. En este diseño, el ánodo y el cátodo no se colocan en compartimientos diferentes (Du et al., 2007). El compartimiento consiste en un ánodo rectangular acoplada con un cátodo de aire poroso que está expuesto directamente al aire como se muestra en la Figura 5. Ofreciendo de esta manera un diseño más simple y ahorro de costos (Park y Zeikus, 2002).

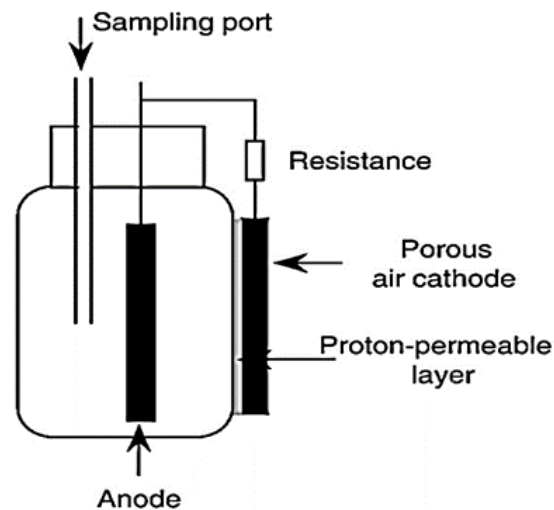


Figura 5.CCM de cámara única, de Park y Zeikus.(2003).

2.11.2.2. Cámara Doble CCM. Generalmente presentan dos cámaras o compartimientos y se efectúan en una estructura de tipo batch, siendo este utilizado actualmente en laboratorios. Logan et al. (2006) mencionan que la CCM de dos cámaras construido en forma tradicional de tipo “H” es ampliamente utilizado y económico la cual consiste en dos compartimientos (ánodo y cátodo) conectadas por un tubo que contiene un separador de Membrana de Intercambio Catiónico (CEM) o también llamado Membrana de Intercambio de Protones (MIP) entre los cuales se tiene: puente salino, Nafion, Ultrex o un puente de sal simplemente (Ver Figura 6), el cual permite que los protones se desplacen hacia el cátodo mientras bloquea la difusión de oxígeno en el ánodo (Min, Cheng y Logan, 2005 y Du et al.,2007). Las cámaras pueden presentarse de diferentes formas estructurales como: rectangulares (Figura 7), miniatura (Figura 8) compartimiento cilíndrico catódico en forma de U (Figura 9), configuración de flujo ascendente con forma cilíndrica (Figura 10) entre otros.

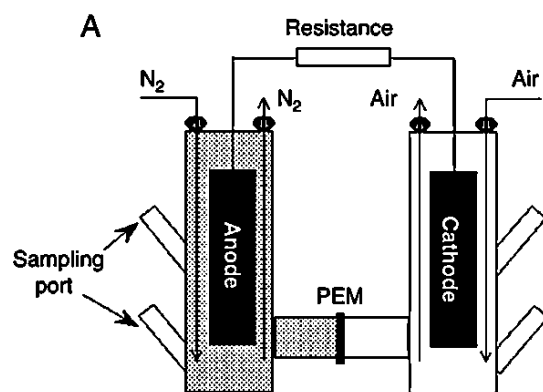


Figura 6. Esquema de una CCM de dos compartimientos, de Min et al. (2005).

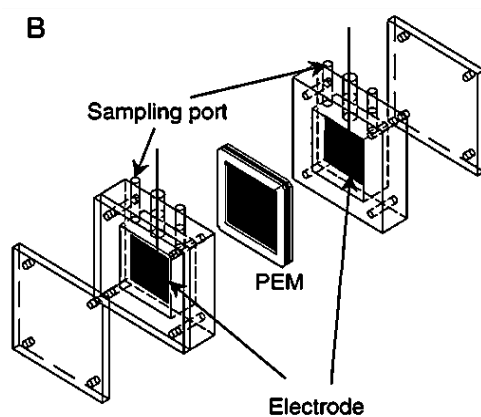


Figura 7. Esquema de una CCM en forma rectangular, de Delaney, Mason, Roller, Stirling y Thurston. (1984).

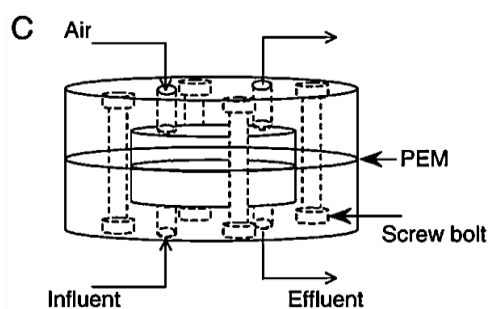


Figura 8. Esquema de una CCM forma miniatura, de Allen y Bennetto. (1993).

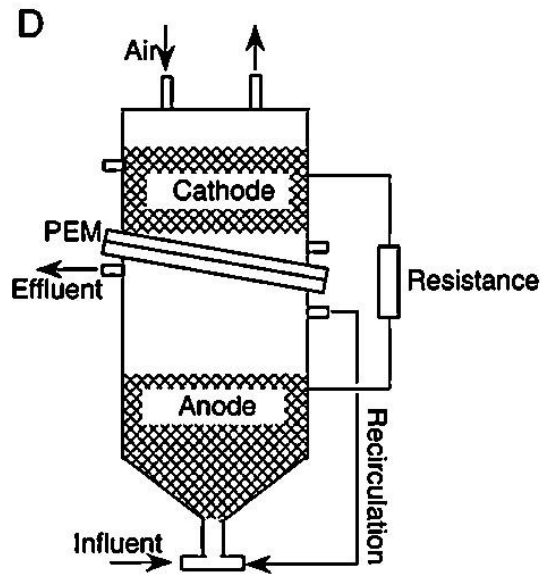


Figura 9. Configuración de CCM de flujo ascendente con forma cilíndrica, de He, Minter y Angenent.(2005).

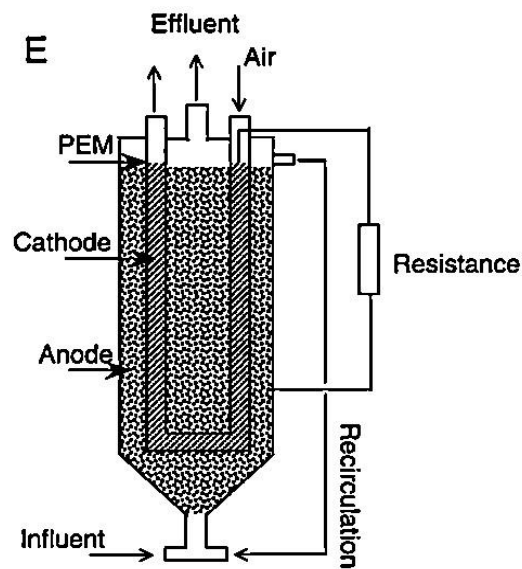


Figura 10. Configuración de CCM en forma cilíndrica con un compartimiento catódico de U, de Ringeisen et al.(2006).

Además, lo más importante para el diseño de una CCM de configuración tipo “H” es elegir una membrana (MIP) que permita que los protones pasen entre los compartimientos de manera óptima mas no el sustrato, cuyos protones se direccionen hacia el aceptor de electrones en la cámara catódica (generalmente oxígeno) (Logan, et al.,2006).

Los sistemas de tipo “H” son aceptables para investigaciones de parámetros básicos, como: producción de energía (ya sea en la utilización de nuevos materiales o tipos de comunidades microbianas que surgen) y degradación de compuestos específicos. La cantidad de energía que se genera en estos sistemas se ve afectada por el área de superficial del cátodo con relación al del ánodo (Oh, Min y Logan, 2004) y la superficie de la membrana (Oh y Logan, 2006). Los componentes principales de su estructura y diseño de la CCM, está compuesto de los siguientes materiales.

Tabla 6.

Componentes básicos de una Celda de Combustible Microbiano

Materiales	Componentes	Observaciones
Ánodo	Grafito, Filtro de grafito, papel carbón, tela de carbón, Pt, Pt negro, Carbón vítreo reticulado (RVC).	Necesario
Cátodo	Grafito, Filtro de grafito, papel carbón, tela de carbón, Pt, Pt negro, Carbón vítreo reticulado (RVC).	Necesario
Cámara Anódica	Vidrio, Policarbonato, Plexiglás	Necesario
Cámara Catódica	Vidrio, Policarbonato, Plexiglás	Opcional
Sistema de Intercambio de protones	Membrana de Intercambio de protones: Nafion, Ultrex, polietileno. Poly (estireno-co-divinilbenceno); puente de sal, tabique de porcelana o únicamente electrolito	Necesario
Catalizadores de electrodos	Pt, Pt negro, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polianilina, mediador de electrones	Opcional

Fuente: Recuperado de Du et al.2007.

2.11.2.3. Apilado CCM. El uso de CCM apilados en serie o en paralelo es esencial para aumentar los voltajes y las corrientes producidas por las CCM (Iyovo y Du, 2010 y Prakash, 2015). Según Moon, Chang, Jang y Kim (2005) menciona que se puede obtener cualquier corriente o voltaje deseado combinando la cantidad adecuada de series de celdas de combustible conectadas en paralelo.

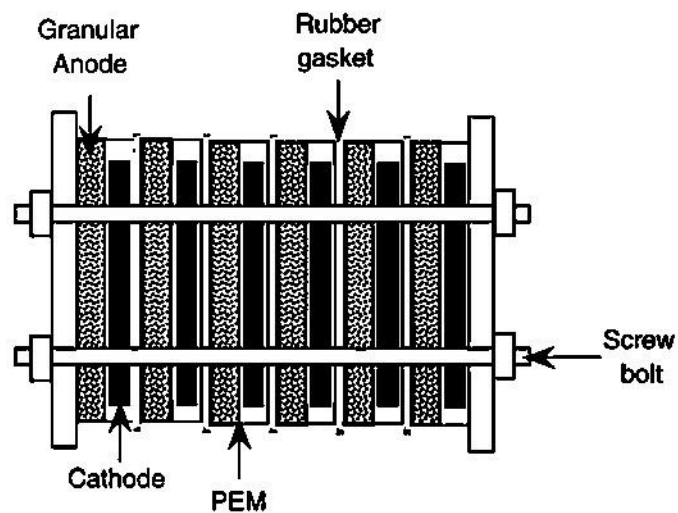


Figura 11. Apilados de CCM de seis unidades individuales con ánodo granular, de Aelterman, Rabaey, Pham, Boon y Verstraete, 2006.

2.11.3. Estructura básica de una CCM

De acuerdo con Ortiz, Moreno y Jiménez (2014) la estructura básica de una CCM consta de dos compartimientos, una anaeróbica (electrodo ánodo) y otra aeróbica (electrodo cátodo), separada por una membrana de intercambio de protones. Además, los electrodos están conectados por un circuito exterior que contiene una resistencia externa, por donde viajan los electrones, del ánodo al cátodo, generando de esta forma energía eléctrica. En la Figura 12 se muestra la estructura de una Celda de Combustible Microbiano.

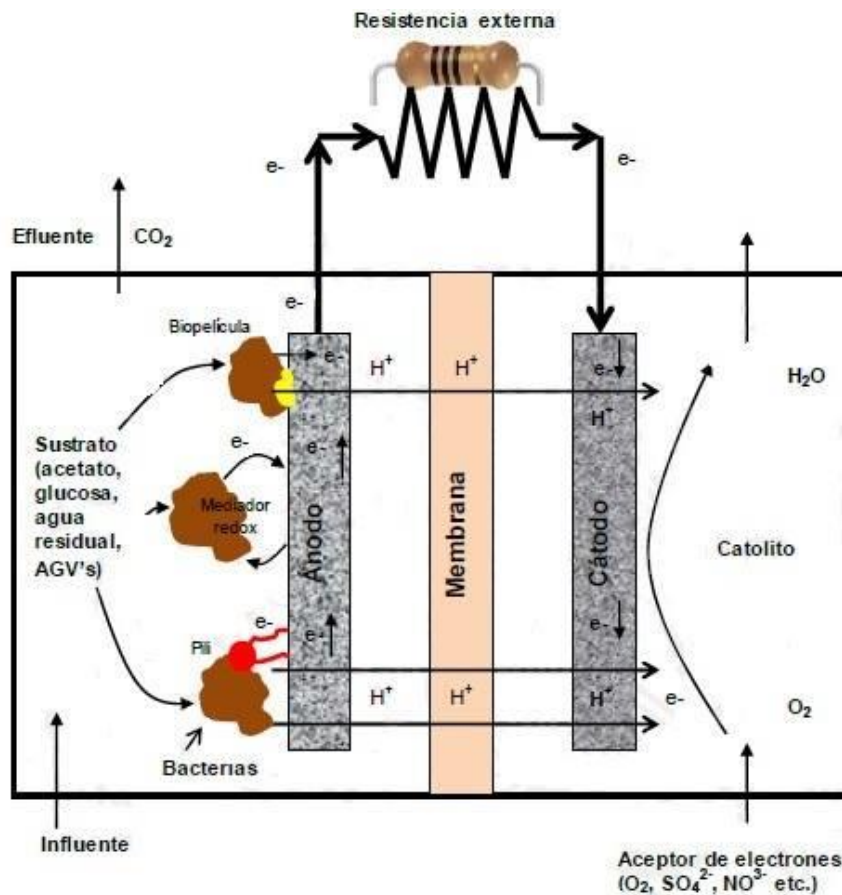


Figura 12. Estructura de la Celda de Combustible Microbiano, de Estrada, 2014.

En la Figura 13 se muestra los elementos principales que componen un Celda de combustible Microbiano.

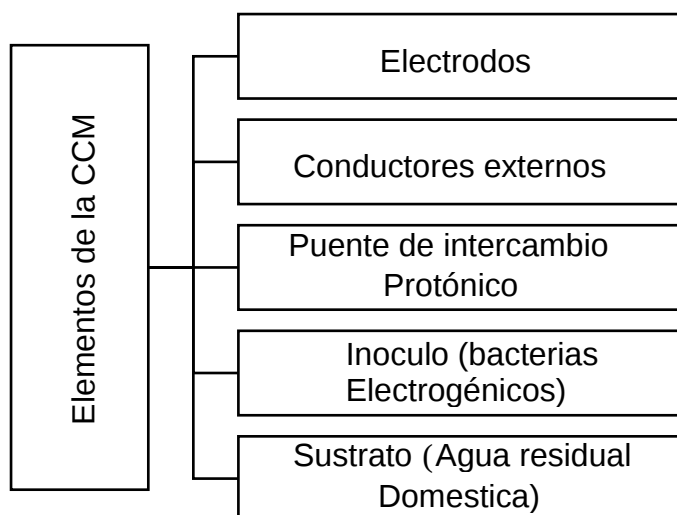


Figura 13. Elementos que componen una Celda de Combustible Microbiano

2.11.3.1. Electroodos. Los electrodos son el componente clave que determinan el desempeño y costo de una CCM (Rabaey, Angenent, Schroder y Keller, 2009). En la última década unas variedades de electrodos han sido ampliamente estudiados, de los cuales se clasifican en dos grupos principales, bio-electrodos (ánodo y biocatodo) y los electrodos químicos (cátodos aireados y cátodos aireados en fase acuosa). Para el criterio de selección de los electrodos se determinan en base a las características fisicoquímicas que poseen, es decir, independientemente de la configuración de la CCM, se debe determinar y seleccionar de acuerdo a: porosidad, área de contacto, menor resistividad (Sears, Ford y Freedman, 2005), conductor, alta resistencia mecánica, bajo costo, biocompatibles y químicamente estables con la solución del reactor, entre ellos tenemos al carbono y los metales no corrosivos (Jincheng, Peng y Xia, 2011) . El más versátil de los materiales para los electrodos es el carbón, disponible como grafito compacto (planos, barras y gránulos), como material fibroso (fieltro, tela, papel, fibra y espuma de carbón) y como carbón vítreo (Figura 14). Aunque el Grafito muestras excelentes propiedades como material para electrodo, su resistividad al flujo de electrones es 1000 veces mayor que la de un metal (Logan, et al., 2006).

Resistividad. Se llama también resistencia eléctrica, que indica el comportamiento del material en el momento en el que pasa la corriente eléctrica, cuando un material tiene un alto valor de resistividad es mal conductor, en cambio cuando el valor es bajo, la conducción eléctrica es mejor, cuando se selecciona un material para el electrodo se busca que la resistencia a la energía eléctrica sea menor, recordando que los electrodos son los aceptores de electrones que circulan por circuito externo, en el caso del ánodo entre mayor se la “compatibilidad” entre el

material y los electrones se espera que la generación de energía eléctrica sea mayor (Sears et al., 2005)



Figura 14. Principales materiales utilizados como electrodos en las CCM: (A) tela de carbón; (B) fieltro de grafito; (C) fibra de carbón; (D) placa de grafito; (E) barra de grafito; (F) grafito granular o carbón activado granular; (G) carbón activado en polvo.

Ánodo. Es donde se lleva a cabo la oxidación de la materia orgánica presente en el sustrato, siendo este el centro de las reacciones bioelectroquímicas (Moon et al., 2005). Para el ánodo, los materiales deben ser altamente conductores, no corrosivos, gran superficie específica (área por volumen), alta porosidad, bajo costo, fácil de fabricar y debe ser escalable a tamaños mayores (Logan, 2008). Los electrodos utilizados pueden ser a base de carbono en papel, tela y formas de espuma y grafito. Estos materiales tienen una alta conductividad y parecen ser adecuados para el crecimiento bacteriano. El papel carbón es rígido y ligeramente quebradizo, pero se conecta fácilmente a un alambre, el cual puede ser de cobre, pero se corroe con el tiempo, ya sea liberando cobre en la solución (que puede ser tóxico para las bacterias) o haciendo que el electrodo se separe del alambre. Los cables de acero inoxidable o

de titanio funcionan mejor en una CCM. Otros materiales que se utilizan en el ánodo son los polímeros conductores como la polianilina.

Cátodo. En esta se produce la reacción de reducción del oxígeno, que es el aceptor de electrones más adecuado para una CCM debido a su alto potencial de oxidación, su disponibilidad, bajo coste, la sostenibilidad y la no formación de productos contaminantes, ya que el producto final formado es agua (Logan y Rabaey, 2012). Por otro lado, la elección de los materiales catódicos afecta en gran manera al rendimiento y es muy diversa según el tipo de CCM. Los materiales de electrodo utilizados en el ánodo, también pueden ser utilizados en el cátodo. Sin embargo, un cátodo potencial debería tener las propiedades de alta conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica y naturaleza catalítica efectiva. Según Falcón, Lozano y Juárez (2009) mencionan que el uso de cátodos en los que el único catalizador es carbono presenta una cinética para la reducción de oxígeno muy lenta. Por lo que se han utilizado electrodos de carbón revestidos con catalizadores de Platino que resulta ser muy costoso. Debido a esto se han desarrollado CCM de biocatodo o cátodo microbiano (Ah y Logan, 2013), donde los microorganismos son utilizados como biocatalizadores para aceptar electrones a partir del cátodo y así remplazar el uso de catalizadores químicos costosos.

2.11.3.2. Membrana. La membrana (Intercambio de Protones, Ultrafiltración, Puente salino y Nafion) son componente del dispositivo CCM que impide el paso de los electrones del compartimiento ánodo al cátodo y solo dejando pasar los protones (Liu y Logan, 2004 y Revelo et al., 2013). Además, la membrana cumple la función de transportar los protones o iones ácidos desde el ánodo al cátodo. Sin la presencia de esta membrana no habría flujo de electrones externos. Al existir

esta conexión estos iones ácidos viajan a través de la membrana que une los dos compartimientos del ánodo al cátodo permitiendo que reaccionen con el oxígeno molecular y los electrones provenientes del ánodo que juntos cierran este círculo.

La membrana comúnmente usada es el Nafion 115 o 117 (DuPont Co, USA) que está a disposición de numerosos proveedores (figura 15). Y una alternativa al Nafion es la membrana Ultrex CMI-7000 que tiene una mejor relación coste- eficiencia que el Nafion. Al utilizar una MIP en la CCM es importante tener en cuenta que puede ser permeable a los productos químicos utilizados, tales como oxígeno, iones o de la materia orgánica utilizada como sustrato. Una opción importante al trabajar a nivel laboratorio es utilizar, un puente salino que está compuesta por una mezcla sólida de agar-agar y Cloruro de Sodio(NaCl) como electrolito, que es muy útil, barata y estable frente a las bacterias que no la degradan (Du, Li, Gu, 2011).



Figura 15. Membrana de Nafion® 117

2.11.3.3. Sustrato. Constituye el combustible del cual se obtiene la energía y es uno de los factores biológicos más importantes que afectan la generación de la energía (Liu, Liu F, Zhang y Su, 2009). Cualquier fuente de literatura científica se describe diversos tipos de sustratos utilizados, desde mezclas complejas como la materia orgánica presentes en las aguas residuales domésticas, municipales e

industrias alimentarias (Liu et al., 2009), hasta los compuestos puros (glucosa, acetato, sacarosa, lactosa, almidón). carbono biodegradable puede ser utilizada en una CCM para generación de electricidad. Los compuestos puros se pueden degradar de manera más simple lo que permite obtener mayor generación de energía e hidrógeno (Pant, Van, Diels y Vanbroekhoven, 2010), además a nivel experimental es recomendable su uso porque se facilita la evaluación de condiciones operacionales de la CCM tales como, la eficiencia coulombica, la densidad de potencia y la resistencia interna. Sin embargo, el uso de sustratos complejos en una CCM es de gran interés porque, además de ser fuentes de energía, estos se pueden degradar y/o biorremediar antes de su descarga al medio ambiente. A diferencia de los compuestos puros los sustratos complejos requieren para su degradación una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa (Pant et al., 2010).

2.11.3.4. Conductor externo. El conductor externo es el encargado de cerrar el circuito eléctrico en una celda microbiana, ya que transporta los electrones desde el ánodo hacia el cátodo. Desde luego se deben escoger metales con alta capacidad de conducción, no tóxicos, fácil manejo, etc. Los más usados son los cables de cobre y de aluminio. El acoplamiento que realiza el conductor externo metálico al ánodo y al cátodo debe ser consistente y no susceptible de corrosión en el medio en que se sumerge, por ejemplo, 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 (Logan, Cheng, Watson y Estadt, 2007).

2.11.4. Caracterización eléctrica de las Celdas de Combustible Microbiano

El desempeño eléctrico de una CCM se estudia a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en el dispositivo (multímetro) conectada a una resistencia externa que enlaza el ánodo y el cátodo, y como también de los respectivos cálculos

que se derivan de ella. Los parámetros básicos que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de sistema son: la densidad de potencia (DP), la eficiencia Coulómbica (EC) y la resistencia interna (RI) (Rismani, et al., 2011).

Voltaje (V): Esta en función de la Resistencia externa (R_{ext}), y de la corriente (I). La relación entre estas variables se muestra en la ya conocida ecuación de la Ley de Ohm. (Logan, 2008).

Ecuación 1. Voltaje (V)

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

Intensidad de Corriente (I): La corriente producida por una CCM llega a ser tan baja, que generalmente no se mide sino se calcula a partir de la caída de voltaje a través de un resistor, usando la ecuación de la Ley de Ohm. (Logan, 2008).

Ecuación 2. Intensidad de Corriente (I)

$$I = \frac{V}{R_{ext}}$$

Potencia (P): La generación de potencia, es esencial el optimizar el sistema para la producción de la misma. La potencia se calculó a partir del Voltaje y la Corriente (Logan, 2008).

Ecuación 3. Potencia (P)

$$P = I * V$$

El cálculo de la Potencia que se genera en una CCM no es suficiente para describir cuan eficiente es la arquitectura del sistema en particular. Por ello para una mayor comprensión y estudio, los cálculos se expresan en función de la cantidad de

área superficial del ánodo disponible para los microorganismos el cual tiene un efecto directo en la cantidad de potencia generada (Logan, 2008).

La densidad de potencia (DP): Expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang et al., 2010) o la potencia por unidad de volumen del sustrato (Luo, Li y Zhang, 2010), se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 4. Densidad de Potencia (DP)

$$P_{An} \frac{V^2}{A_{an} * R_{ext}}$$

ó

$$DP = \frac{Potencia (mW)}{Area de contacto del electrodo (m^2)}$$

Donde:

V: Potencial en voltios.

R_{ext}: Resistencia externa.

A_{An} : Área de Contacto del Electrodo, es el área superficial geométrica del electrodo disponible para los microorganismos electrogénicos y se obtiene de la siguiente Ecuación.

Ecuación 5. Área Superficial del Electrodo de Grafito (A_{An})

$$A_{An}(m^2) = 2 * \pi * r * h + 2 * \pi * r^2$$

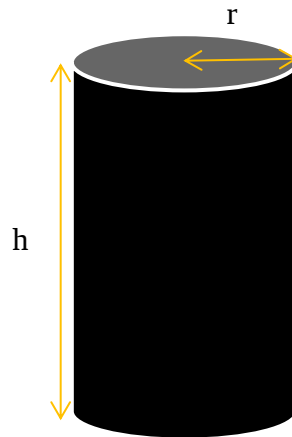


Figura 16. Electrodo de Grafito

Resistividad. También llamado resistencia eléctrica, se define por la ecuación 6.

Ecuación 6. Resistividad

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

Donde:

R: Resistencia Óhmica

S: Sección transversal (m^2)

L: Longitud (m)

La eficiencia coulombica (EC): Es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño la CCM. La EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el sustrato de la cámara anódica (Sharma y Li, 2010).

Ecuación 7. Eficiencia Coulombica (EC)

$$EC = \frac{\text{Coulombios recuperados}}{\text{Coulombios totales en el sustrato}}$$

El coulomb total obtenido se determina integrando la corriente a lo largo del tiempo, de modo que la EC para una CCM en modo batch con una mezcla de sustratos o para un agua residual, se debe utilizar la demanda química de oxígeno (DQO) como parámetro para medir las concentraciones de los sustratos (Logan et al., 2006). La EC para estos casos se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

Ecuación 8. Eficiencia Coulombica para agua residual

$$EC = \frac{Mo2 \int_0^t I(t) dt}{F bO2 V_{an} \Delta DQO}$$

Donde:

MO2 = peso molecular del oxígeno en gramos/mol (32 g/mol).

$I(t)dt$ = coulombios reales generados en la operación de la CCM en coulombios (C).

F = constante de Faraday (96,485 C/mol e⁻).

t = tiempo de reacción o ciclo de operación de la CCM en segundos (s).

bO2 = número de moles de electrones generados por mol de oxígeno (4 mol).

Van = volumen total de la cámara anódica en litros (L)

ΔDQO = cantidad de DQO eliminado durante el ciclo de operación de la CCM en mg/L.

2.11.5. Factores que influyen en la eficiencia de las celdas de combustible microbianas

El buen funcionamiento de las celdas de combustible microbiano, depende del buen control de ciertos factores como: tipo de Inoculo (consorcio microbiano) utilizado, tipo y concentración del combustible (sustrato), fuerza iónica, pH, temperatura y resistencia externa. Los parámetros de operación pueden ser regulados para aumentar el desempeño de una celda de combustible microbiano (Liu et al., 2009). A continuación, se mencionan algunos parámetros que se toman en cuenta:

2.11.5.1. Potencial de Hidrogeno (pH). La eficiencia de la CCM se ve afectada por los gradientes de pH, que se produce por la acidificación en la cámara anódica y alcalinización en la cámara catódica, esto se debe, a que las reacciones anódicas producen protones y las reacciones del cátodo se consumen protones. Cuando en el compartimiento del ánodo la difusión y la migración de los protones a través de la Membrana de Intercambio de Protones es lenta, se produce un pH ácido ocasionando un descenso drástico de la actividad bacteriana y por consiguiente se afecta la transferencia de protones hacia el compartimiento del cátodo (Revelo et al., 2013). Por consiguiente, si no hay una solución amortiguadora en una celda microbiana, se producirá un diferencial de pH entre la cámara anódica y la catódica, aunque teóricamente no habría cambio de pH cuando la velocidad de reacción de protones y oxígeno en el cátodo es igual a la velocidad de producción de protones en el ánodo. La membrana de intercambio de protones se comporta como una barrera para el paso de otras moléculas; pero no para el paso de protones. En la etapa inicial de operación de la CCM, el paso de los protones a través de la membrana es más lento que su velocidad de producción en el ánodo y su velocidad de consumo en la cámara catódica, esto trae una diferencia de pH. Sin embargo, la diferencia de pH

incrementa la fuerza motriz de la difusión de protones en la cámara anódica a la cámara catódica y finalmente forma un equilibrio dinámico (Falcón et al., 2009).

2.11.5.2. Polarización de los electrodos. Según Ferrer y Carrera (1992), la polarización de un electrodo ocurre por la circulación de una corriente eléctrica que genera una variación en la concentración iónica que los rodea, aumentando el negativo (ánodo) y disminuyendo el positivo (cátodo). Este efecto se acentúa al aumentar la densidad de la corriente, el cual depende de la resistencia exterior (suponiendo una resistencia interna constante). Según Bayona y Gutierrez (2013) menciona que la variación del potencial aplicado sobre el ánodo afecta la formación y la electroactividad de una biopelícula establecida por *Shewanella oneidensis* en un electrodo de fieltro de grafito.

2.11.5.3. Resistencia eléctrica externa. Según lo reportado por Moon et al. (2005) cuando se incrementa la resistencia externa el potencial eléctrico tiende a disminuir. Además, la remoción de la materia orgánica también disminuye cuando se incrementa la resistencia externa. La resistencia externa afecta la eficiencia de la CCM mediante el control del flujo de electrones desde el ánodo al cátodo (Rismani, et al., 2011). Una resistencia externa muy alta actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo, con un aumento en la resistencia interna de la celda. En la prueba utilizando *Shewanella oneidensis* se verificó la presencia de más masas de biofilm y sustancias poliméricas extracelulares en el ánodo con una resistencia más alta (Logan y Rabaey, 2012).

2.11.5.4. Concentración de la materia orgánica. La alta concentración de materia orgánica estimula una elevada generación de electricidad. Park et al. (2016) determinaron que aumentando la concentración de lactato se obtiene como resultado valores altos de energía en una CCM inoculada con *S. putrefaciens*.

Investigaciones realizadas por Moon et al. (2005) indagaron el efecto de la concentración de sustrato en el rendimiento de una CCM, en este estudio se encontró además que la densidad de potencia se fue acrecimiento con el aumento de la concentración del sustrato.

2.11.5.5. Temperatura. Feng, Lee, Wang y Liu. (2009) menciona que disminuyendo la temperatura desde 30°C a 20°C se redujo la densidad de potencia máxima, mientras que la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) disminuyó ligeramente con la temperatura. Song, Liming, Yuanxiu, Xuewu y Changji (2017) probaron el efecto que tendría aumentar la temperatura de 25 a 35 y luego hasta 45°C y bajando nuevamente hasta 25°C en la densidad de potencia máxima. Llegando a la conclusión que durante todo el proceso de generación de electricidad la temperatura con que se inicia debe mantenerse constante, ya que si se varía podría influir de manera negativa en la eficiencia de la CCM. Las bacterias en una CCM tardan un periodo de tiempo para aclimatarse a las condiciones impuestas como son una cierta temperatura, pero al variarse, va a tener que volver a aclimatarse y en su intento pueden morir. Así mismo Feng et al.(2009), examinaron el efecto de la velocidad de carga orgánica y la temperatura de operación de las aguas residuales en la potencia generada utilizando CCM. Las temperaturas seleccionadas fueron en el rango de 30°C (condición mesófila) y 45 °C (condición termofílica); no obstante, se obtuvo una mayor densidad de potencia con la primera.

2.12. Microorganismos en las Celdas de Combustible Microbiano

Los microorganismos son un componente fundamental en el desempeño energético de la CCM. Así mismo la utilización de los microorganismos en especial los bioelectrogénicos en la CCM es esencial para descomponer la materia orgánica presente en el sustrato, y a la vez donar electrones al electrodo (ánodo), de esta

manera generar bioelectricidad. La investigación del comportamiento de microorganismos que sean eficaces, a base de muestras ambientales sometidas a diversas condiciones para la remoción de materia orgánica y biorremediación, contribuye al desempeño y mejoramiento de estos sistemas (Liu y Logan, 2004).

Las bacterias que pueden encontrarse en una CCM son los plantónicos o adheridos al electrodo (electrogénicos). Los planctónicos vienen a ser aquellos que están en suspensión en el sustrato, estos necesitan un mediador para el transporte de electrones, mientras los electrogénicos toman al ánodo como soporte y aceptor de electrones, la diferencia es el modo de pasar los electrones hacia al ánodo (Mora y Bravo, 2017).

Por otra parte, la efectiva biodegradación y biorremediación que tiene la CCM es demostrada en la disminución de la DBO y DQO, y está relacionado con el metabolismo de todas las bacterias presentes en la CCM y con los que están en la biopelícula. Sin embargo, Huggins, Fallgren y Jin (2013) indican que al estar el electrodo (ánodo) presente este logra actuar como catalizador estimulando el aumento de degradación de la materia orgánica.

2.12.1. Bioelectrogénesis

Bioelectrogénesis viene a ser la producción de electricidad a base de procesos biológicos dados por organismos vivos. Existen una variedad de microorganismo que logran ser eficientes para realizar la conversión energética, pero algunos son más que otros. Sin embargo los microbios más usados son las llamadas “Bacterias electrogénicas” quienes suelen habitar en zonas anaerobias, como en fango de los lagos o lodos (Correa y Gordi, 2015).

2.12.2. Inóculo de microorganismos

El factor más importante para que una CCM pueda ser eficiente, son los microorganismos usados para desintegrar la materia orgánica a compuestos como dióxido de carbono (CO_2) e hidrogeno (H) (Min y Logan, 2004). Así mismo al tener en cuenta las diferentes formas de transferir los electrones al electrodo, es deseable seleccionar microorganismos con capacidad de pasar los electrones directamente al ánodo.

Siendo así que al utilizar cultivos puros y específicos se consigue mayor rendimiento, y, por tanto, mayor densidad de potencia. Sin embargo, al usar este inóculo, conlleva a tener elevados costos debido a la necesidad de esterilización del sistema. Además, los inóculos puros no son aptos para utilizar como combustibles de aguas residuales, ya que las aguas residuales tienen otros microorganismos que contaminan el cultivo puro.

Por tal razón, es recomendable el uso de cultivos mixtos, ya que permiten utilizar una gran variedad de sustratos, entre ellos, aguas residuales domesticas (Du et al., 2007). De esta manera se pueden emplear en las CCM diferentes tipos de inóculos como lo que proceden de aguas residuales domésticas (Min y Logan, 2004), Estos inóculos suelen contener microorganismos electrófilos y grupos de microorganismos que usan mediadores naturales, por lo que no es necesario añadir mediadores externos (Du et al., 2007). Los mejores resultados se han obtenido empleando fangos activos o anaerobios (Min y Logan, 2004).

2.12.3. Microorganismos en la cámara anódica

La presencia de comunidades bacterianas en la cámara anódica es de suma importancia porque poseen mecanismos que influyen en la obtención de electricidad. Este viene a ser las rutas metabólicas que administran en flujo de electrones y

protones, también el tipo de sustrato y la capacidad del ánodo (Rabaey y Verstraete, 2005). A mayor potencia del ánodo, las bacterias logran utilizar el metabolismo oxidativo y así entregar electrones al ánodo, en cambio si la potencia del ánodo reduce, los electrones posiblemente se sitúen en otros que aceptan los electrones como (sulfato, nitrato, etc.) y en inexistencia de estos sucederá la fermentación. Al utilizar cultivos mixtos en la CCM se observó, que las bacterias fermentativas logran poseer una mínima o nula capacidad de transferir electrones al electrodo (ánodo), no obstante, su metabolismo favorece en la producción de electricidad (Ritchter, 2008), ya que contribuyen otros tipos de alimentos que son utilizados como alimento por otras bacterias (Kiely, Regan y Logan, 2011).

Por otro lado, para la cámara anódica, como inóculo se puede utilizar cultivos puros o mixtos; en la primera opción, es posible variar genéticamente a la bacteria (lovley, 2008), sin embargo, en experimentos es mejor utilizar consorcios (mixto) ya que estos crean una mayor potencia y su manipulación es económico, siendo estos todos anaerobios, agua residual y otra fuente de consorcios microbianos (Du et al., 2007).

En el 2005, se descubrieron microorganismos como: *Geopsychrobacter electrodiphilus* y los *Geothrix fermentans*. Para el 2006, los microorganismos *Shewanella*, *S. oneidensis DSP10* y *Escherichia coli*. En el 2008, los microorganismos *Rhodopseudomonas palustris DX-1*, *Acidiphilium sp.*, *Thermincola sp.*, *Pichia anómala* y *Desulfovibrio desulfuricans* (Logan, 2009).

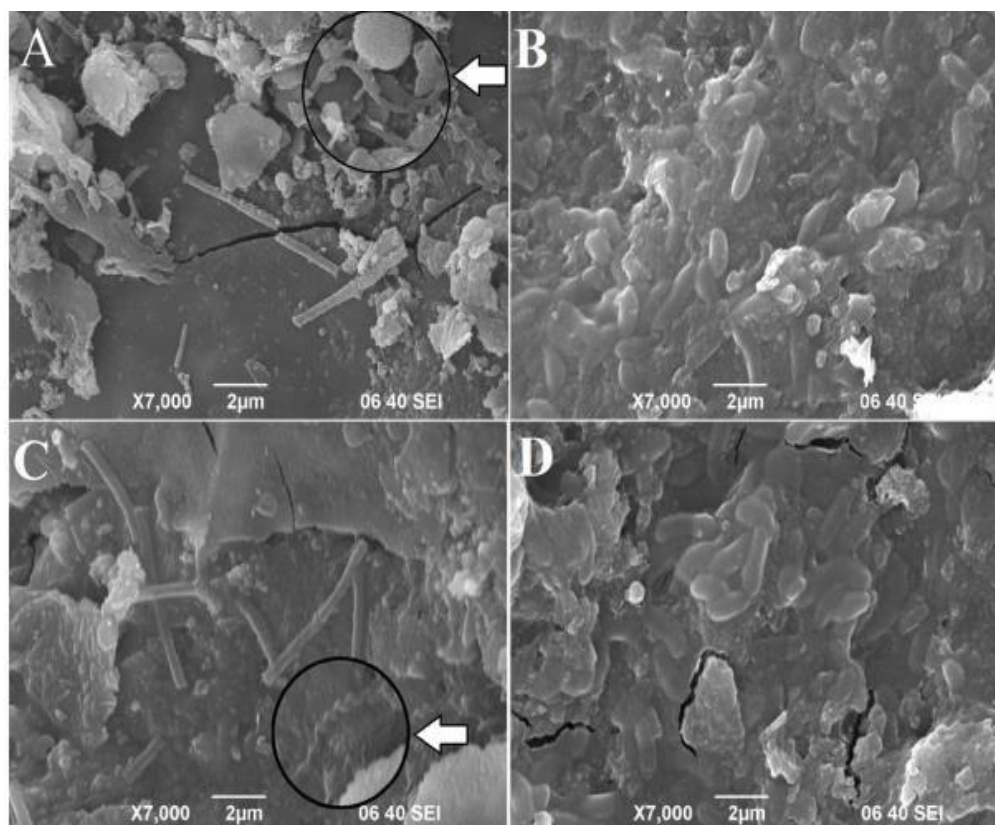


Figura 17. Microscopia electrónica de barrido por imágenes de electrón secundario de las biopelículas formadas sobre los ánodos de las CCM después de 30 días operación: (B) y (D) corresponden a la biopelícula formada por bacterias presentes en el agua residual (ARD), de Mora y Bravo. 2017.

2.12.4. Biopelícula Microbiana

La tecnología de CCM podría conducir al ajuste de procesos que mejoren la producción de energía con la descontaminación de agua; por eso surge la necesidad de conocer y caracterizar los microorganismos conectados a la biopelícula. Las biopelículas microbianas están formadas por distintas capas, cada uno con diversos grupos, donde las bacterias logran ocupar regiones específicas estableciendo la estructura de la biopelícula; así mismo la composición y altura de una biopelícula cambia con el pasar del tiempo inducida por cambios ambientales, disposición del nutriente y factores intrínsecos a las biopelículas (Ah y Logan, 2013)

En consecuencia, las biopelículas que se encuentran en la CCM están compuestas por bacterias que permiten que los electrones libres se transmitan al

ánodo y generen una corriente hacia el cátodo. Diversas especies presentes en el ánodo permiten múltiples candidatos para la operación de CCM dadas las diferentes condiciones ambientales. Por lo tanto, una biopelícula mixta de *Pelotomaculum thermopropionicum*, *Methanothermobacter thermautotrophicus* y *Geobacteraceae* podría producir una mayor diferencia de potencial que una película de colonias de *Geobacteraceae* (Ah y Logan, 2013)

Las CCM son auto sostenibles y este es un parámetro que puede corresponder a las complejas interacciones de las comunidades microbianas, y no solo a las bacterias que son parte de la biopelícula, sino a bacterias que no son parte de la biopelícula porque estos desempeñarían un papel importante al degradar sustratos complejos en compuestos fácilmente metabolizables por los microorganismos electrogénicos (Pant, et al., 2010).

2.12.5. Aclimatación del inóculo (biomasa)

La aclimatación de la biomasa en modo discontinuo beneficia que los microorganismos electro-génicos se establezcan al electrodo anódico para formar el biofilm evitando que sean lavados. Asimismo, en modo continuo la producción de electricidad es continua. Pero es necesario saber que, cuando el cultivo bacteriano es insertado en la CCM existe una fase de latencia seguida de un rápido incremento en el voltaje, alcanzando un voltaje en el cual se estabiliza. Luego el voltaje reduce progresivamente en cuanto la materia orgánica presente en la biomasa queda consumida, donde cae el crecimiento y ocurre la muerte celular, viéndose afectada la generación del voltaje. (edUTecNe, 2010)

Por otra parte, cabe mencionar que el lodo anaerobio es una buena opción para la inoculación en las CCM, porque se consigue fácilmente de las Plantas de tratamiento de agua Residual y asimismo presenta una alta variedad de comunidades

bacterianas, también algunas cepas de bacteria electroquímicamente activas. Por eso se cree que en un lodo anaerobio típico la mayoría de las bacterias son: bacterias fermentativas, metano-génicas y sulfatos reductores.

2.12.6. Metabolismo Microbiano.

El metabolismo se refiere a la totalidad de las reacciones químicas que se producen en un organismo vivo y este se puede dividir en dos clases de reacciones químicas; las que liberan energía y las que consumen energía. Las reacciones químicas que consumen energía se denominan anabólicas, estas reacciones dan lugar a la formación de moléculas orgánicas complejas a partir de moléculas simples, por otra parte las reacciones que liberan energía se denominan catabólicas, estas degradan compuestos orgánicos complejos en compuestos más simples, las reacciones catabólicas generalmente son exergónicas, producen más energía de la consumen, por ende el transporte de electrones generados en una CCM generalmente se realiza por rutas catabólicas (Tortora, Funke y Case, 2007).

La producción de energía del catabolismo depende de la oxidación y la reducción de los productos químicos disponibles para los microorganismos. En una reacción dada, el donador de electrones se oxida, mientras que el aceptor de electrones se reduce. El donador de electrones se considera que es el sustrato de alta energía o "comida" de la reacción y una gran variedad de compuestos pueden desempeñar esta función. El aceptor de electrones, por el contrario, es una forma oxidada y está disponible en un número más limitado para los sistemas biológicos (principalmente oxígeno, nitrato, nitrito, hierro (III), sulfato, dióxido de carbono).

2.12.6.1. Método de obtención de energía de los Microorganismos. Los microorganismos desempeñan una función clave en el área energética; pueden obtener energía por dos métodos: por medio de compuestos químicos, ya sean

orgánicos, inorgánicos o por energía proveniente de la luz (Madigan, Martinko, Bender, Buckley y Sthal, 2004).

Los organismos que contienen la energía de compuestos orgánicos se denominan quimiorganotrofos y la energía es obtenida por la oxidación (pérdida de electrones) del compuesto, conservando esta energía en la célula en forma ATP (Adenosin Trifosfato), estos organismos pueden obtener la energía en ausencia de oxígeno, anaerobios, o en presencia de él mismo, aerobios, por otra parte los organismos que obtienen la energía de compuestos inorgánicos se denominan quimioautótrofos y finalmente los organismos que obtienen energía (ATP) por la luz solar se denominan microorganismos fototrofos (Madigan et al., 2004).

2.12.6.2. Mecanismos de transferencia de electrones. El mecanismo de transferencia de electrones es un proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular (Lovley, 2008). Existen diferentes mecanismos para explicar cómo los microorganismos liberan los electrones al electrodo (figura 18): a) Transferencia directa con la participación de citocromos, b) Transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo y c) Transferencia por medio de los nanocables bacterianos o Pili (Falcón et al., 2009 y Estrada, 2014).

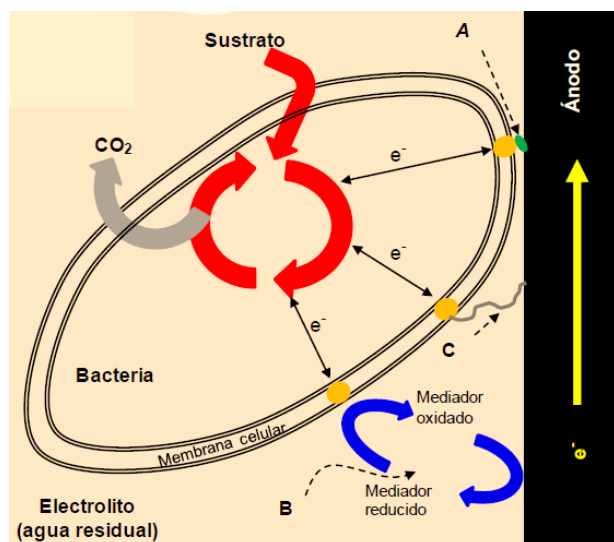


Figura 18. Principales vías de transferencia de electrones en una CCM, de Estrada.(2014).

En la Figura 19 se muestra un diagrama general de cómo se puede llevar a cabo el transporte de electrones hacia el ánodo cuando una biopelícula ha sido formada en la superficie del electrodo (ánodo). De color verde se encuentran las bacterias exoelectrogenas, de color morado las bacterias que cuentan con nanohilos, las de color café son bacterias no exoelectrogenas y los círculos azules son los mediadores redox externos.

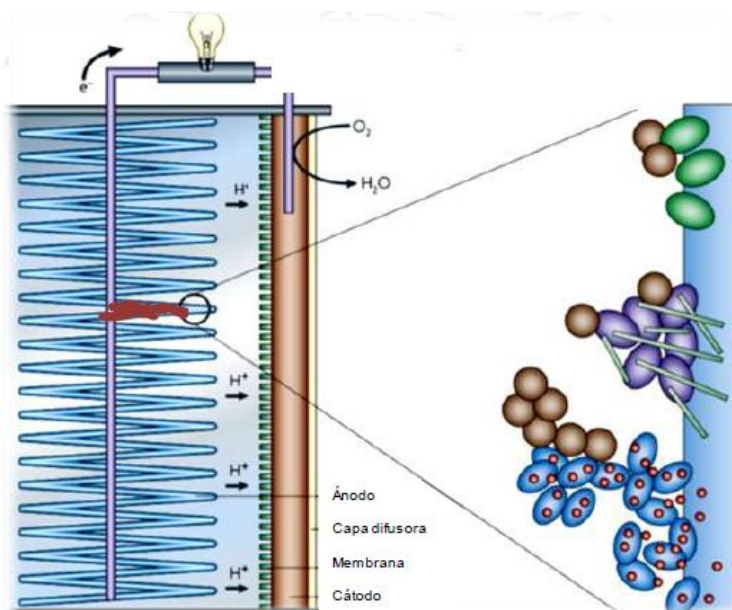


Figura 19. Vista general del transporte de electrones en una CCM, a través de la formación de una biopelícula formada en la superficie del ánodo, de Estrada.(2014).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODO

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en las instalaciones del laboratorio de la “Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental” perteneciente a la “Facultad de Ingeniería y Arquitectura” de la Universidad Peruana Unión, situada en el km 19.5 carretera central Ñaña, Distrito de Lurigancho, Provincia Lima, Departamento de Lima. El campus cuenta con una superficie de 490, 000 m², con coordenadas geográficas UTM 11°59`24” Sur y 76°50`29” Oeste ver (Figura 20). Así mismo la construcción del dispositivo Celdas de Combustible Microbiano (CCM) se realizó a escala Laboratorio.

Los análisis de los parámetros (DQO y DBO₅) fueron realizados por el laboratorio de ensayo Acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INALCAL-DA con Registro N° LE-077, ubicado en Distrito de Santa Clara Provincia de Lima - Lima. Los demás parámetros (pH y Temperatura) fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión.

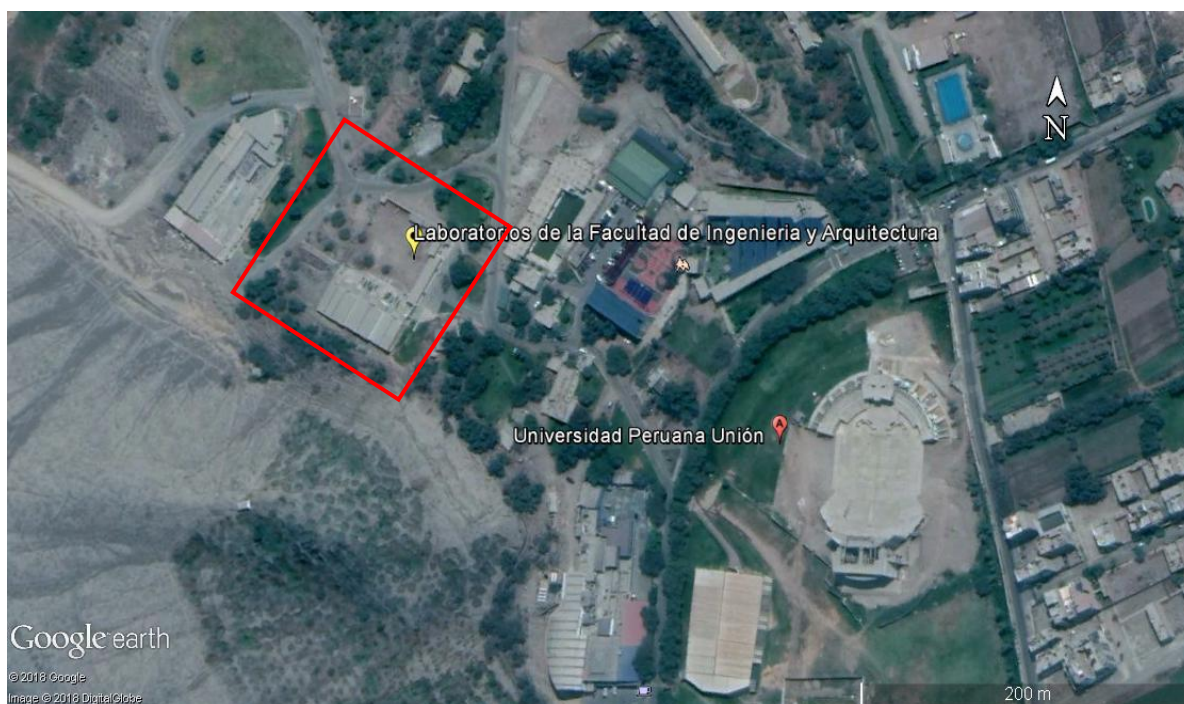


Figura 20. Vista Panorámica del Laboratorios la Universidad Peruana Unión, de Google Earth. 2018.

3.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Santa Clara

3.1.1.1. Ubicación de la PTAR

- Región: Lima
- Departamento: Lima
- Provincia: Lima
- Distrito: Ate Vitarte

Con coordenadas geográficas de referencia se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7
Coordenadas Geograficas de la PTAR Santa Clara

Coordenada UTM (WGS84-Zona 18)	
Coordenada Este	294080.41 E
Coordenada Norte	8671062.60 S

3.1.1.2. Área de la PTAR. El área de la Planta tiene 2,8 hectáreas aproximadamente (ver figura 21). Esto está en base a la construcción de la PTAR de Santa Clara donde se dispuso de acuerdo al área del lote 127- B (100) % y parte del lote 146- C delimitado por el corte realizado por la construcción del puente Bailey de Santa Clara. La suma de estos dos lotes resulta el área donde se encuentra ubicada la planta (Manrique, 2009).

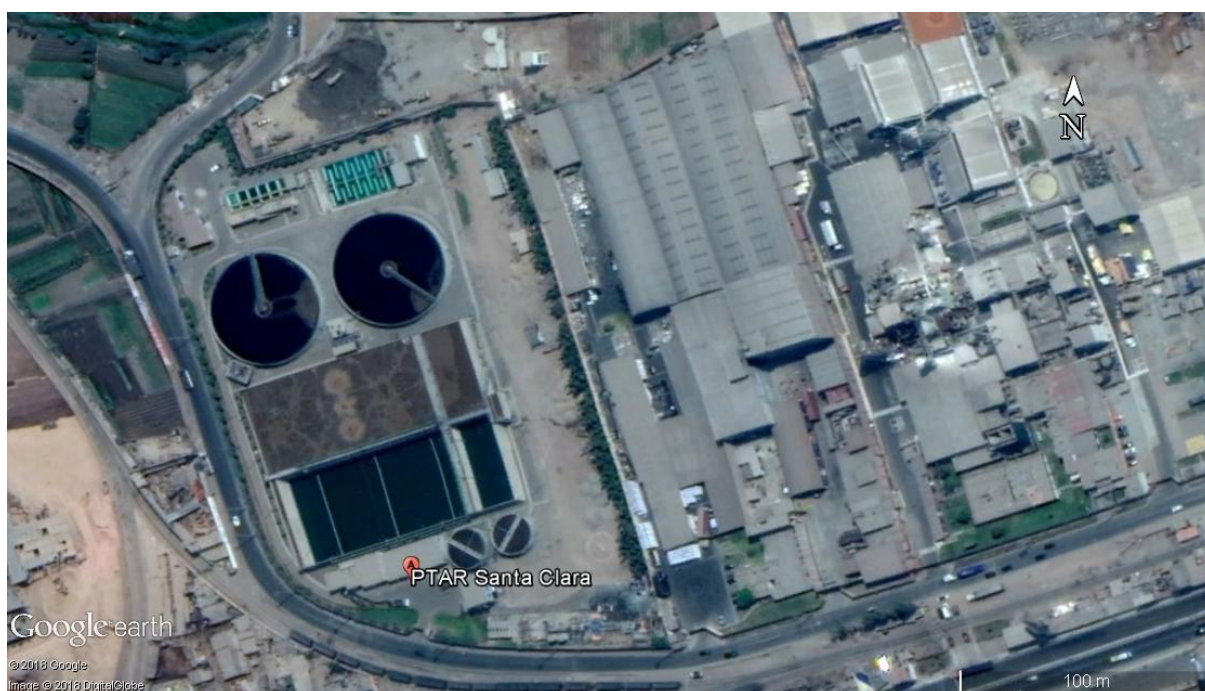


Figura 21. Vista en planta de la PTAR de Santa Clara y el detalle del punto de muestreo, de Google Earth.2018.

3.1.1.3. Procedencia del agua residual pre- tratada. El agua residual que trata la PTAR procede principalmente de Huaycan y de las localidades: Esquema Fundo Pariachi, La gloria, San Juan y Horacio Zevallos, que se sitúan a lo largo de la Carretera Central, entre los Km. 10 a 17,5 en la margen izquierda del rio Rímac (Estudio de Impacto ambiental, 2010).

3.1.1.4. Población Atendida de la PTAR. La población atendida por la PTAR de Santa Clara era de 66,063 habitantes en el año 2010. Se predice que para el año 2030 la población será de 88,978 habitantes (Estudio de Impacto Ambiental, 2010).

3.1.1.5. Procesos de Tratamiento de la PTAR. Los componentes principales que cuenta la PTAR de Santa Clara son: Tratamiento primario, tratamiento secundario, cuchara bilvalba, cámara de rejillas, desarenador-desengrasador, tanque de aireación (aerobio–anoxico), tratamiento terciario, tratamiento de lodos, tanques sedimentadores, espesador de lodos, desecación de lodos y evacuación a lecho de secado, y tratamiento de olores en el tratamiento primario (Estudio de Impacto Ambiental, 2010).

3.2. Materiales y Equipos

3.2.1. Recolección de las muestras y análisis del agua residual doméstica.

Para la toma de la muestra General del agua residual doméstica se usó lo siguiente materiales:

- Balde de color Negro con capacidad de 20 Litros.
- Balde de capacidad de 6 Litros
- Cuerda de nailon de 0,5 a 1 cm de diámetro, de 8 metros de longitud, para manipular los baldes de muestreo en los puntos de monitoreo.
- Cinta adhesiva
- Papel Toalla

Para la toma de muestra del agua residual doméstica, concerniente a los análisis de los parámetros físico-químicos (pH, T°, TDS, DQO y DBO₅) se empleó lo siguiente.

- Cadena de custodia

- Papel secante
- Cinta adhesiva
- Plumón indeleble
- Frascos debidamente etiquetados (1000 ml) para DBO5
- Frascos debidamente etiquetados (500 ml) para DQO
- Hielo o refrigerante
- Cooler (caja térmica grande)
- 04 Vaso precipitado de 50 ml
- 04 Vaso precipitado de 100 ml
- 04 Vaso precipitado de 1000 ml
- Agua destilada

La indumentaria de Protección empleada para el muestreo de agua residual doméstica son los siguientes:

- Gafas de Seguridad
- Guantes de jebe antideslizantes con cubierta de antebrazo
- Guante de látex descartables
- Mascarilla descartable
- Casco
- Guardapolvo

Reactivos para la preservación de las muestras de ARD para el análisis de DQO

- Ácido Sulfúrico

Equipos a utilizar

- Multiparámetro HANNA de pH/EC/TDS HI9811-5
- GPS

3.2.2. Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)

Los materiales utilizados para la construcción del sistema de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a escala de laboratorio. Se construyó 5 sistemas de las mismas dimensiones y materiales ver (Tabla 8).

Tabla 8

Materiales para la construcción de la Celda de Combustible Microbiano

Materiales	Cantidad
Barras cilíndrica de grafito (12mm de Diámetro, 18 cm, 13 cm y 8 cm de largo)	12 unidades
Frascos de vidrio de capacidad de 1700 ml	12 unidades
Tapón de Hule	20 unidades
Resistencias Externas de 50, 100 y 150 Ω (Ohmios).	4 unidades por resistencia
Silicona Transparente Superflex 100ml	2 unidades
Conductor externo Cable de Cobre 100 cm de largo.	1 unidad
Bombas de aireación para Pecera	5 unidades
Placas y Listones de acrílico	2 unidades
Mangueras de PVC transparente	200 cm
Jeringas de succión de 20 ml	4 unidades
Cinta aislante	1 unidad
Cinta en adhesiva	1 unidad

Para la elaboración del puente salino se utilizó:

- 6 unidades de tubos de PVC de 1" $\frac{1}{2}$, x 5 cm de largo
- Agar-Agar al 5%
- Cloruro de Sodio (NaCL) al 10%
- Vasos Precipitado esleymeyer de 100mL
- Varilla de vidrio
- Cocina Eléctrica
- Malla de Asbesto
- Agua destilada

- Balanza Analítica
- Cucharilla de metal
- Placas Petri

Para la Limpieza de Electrodo de grafito:

- Agua destilada
- Hidróxido de Sodio (NaOH) 1M
- Ácido Clorhídrico (HCL) 1M
- Vaso precipitado de 500 mL
- Vaso precipitado de 1000 mL
- Pipetas graduadas de 10 mL
- Campana extractora de Gases

Equipos utilizados para la toma de Datos y monitoreo de corriente eléctrica

(Bioelectricidad) obtenida en las CCM:

- 4 Computadoras PC Windows 8
- 4 Multímetro Digital
- Cámara Fotográfica

3.3. Metodología

El desarrollo de la investigación constituyó de seis Fases: 1^{era} fase diseño y construcción de las celdas de combustible microbiano (CCM) a escala laboratorio, 2^{da} fase recolección de las muestras de agua residual (sustrato) de la PTAR de Santa Clara - Lima y Obtención del inóculo (lodo anaerobio), 3^{era} fase caracterización del agua residual doméstica (pre análisis), 4^{ta} fase aclimatación de microorganismo en el compartimiento anódico y formación de la biopelícula en el electrodo (ánodo), 5^{ta} operación de la Celda de Combustible microbiano (CCM) a escala laboratorio, 6^{ta} fase

análisis del desempeño eléctrico y de los parámetros del efluente de la CCM (post análisis).

3.3.1. Construcción de la Celdas de Combustible Microbiano a escala laboratorio

Para la construcción de la CCM a escala de laboratorio, se realizó en base a revisiones bibliográficas, antecedentes e investigaciones.

3.3.1.1. Selección de la configuración de las CCM. En la Tabla 9, se estudiaron los tipos de configuraciones usadas a escala laboratorio, se hizo el estudio usando alrededor de ocho artículos.

Tabla 9

Tipos de configuraciones de las CCM usadas a escala laboratorio

Tipo de Celda	Densidad de Potencia o Densidad de Corriente	Referencia
Dos cámaras	0,0135 mW/cm ²	(Passos et al, 2016)
Una Cámara	0.0073 mA/cm ²	(Valentina, 2016)
Dos cámaras	0.0014 mW/cm ²	(Buitrón y Perez, 2011)
Una cámara	0.03661 mW/cm ²	(Luo y Yong, 2010)
Dos cámaras	0.23 mA/cm ²	(Patil y Sunil, 2009)
Dos cámaras	0.0031 mW/cm ²	(Liang y Peng, 2007)
Dos Cámaras	0.06 mA/cm ²	(Ha, Thi, Tae, y Chang, 2007)

Al prestar atención a la Tabla 10, se determinó que las CCM con más estudios a escala Laboratorio son las de 2 cámaras.

Tabla 10

Cuadro comparativo de tipos de Celdas Combustible Microbiano

CCM	Características
Dos Cámaras Tipo H	- Bajo costo. - No necesita de una membrana PEM (Nafion, ultrex) para el intercambio protónico, lo que vuelve menos costosa. - Puede Trabajar de Forma Continua o discontinua. - Se previene la difusión de oxígeno a la cámara anódica. - Los compartimientos pueden adoptar diversas formas prácticas. - Ampliamente utilizada en estudios a escala laboratorio - Tiene una variedad de diseños para llevar a cabo su funcionamiento.
Una Sola Cámara	- Bajo costo de construcción - Es necesario el uso de una membrana PEM. - El cátodo es expuesto directamente al aire. - Sus diseños son complejos+ - No requiere de bombeo de aireación - Ampliamente estudiada las aplicaciones industriales. - Menos eficiencia en la producción de energía eléctrica - Diseño único - No es completamente anaerobio debido a su disposición de electrodos.

En base a los resultados de las tablas 9 y 10, junto con lo estudiado en las fuentes bibliográficas se seleccionó el tipo de celda de, doble cámara de tipo H, debido a que estas CCM son las más empleadas para realizar estudios a escala laboratorio. Así mismo, estas celdas permiten tener un mayor control sobre la cámara que se encuentra en condiciones anaerobias, a su vez, permite preparar la membrana de intercambio de protones (puente salino) y se efectúa en estructura de tipo Bach tal como lo menciona Du et al. (2007) en el capítulo anterior. Además, en la presente investigación se quiere estudiar diferentes factores que puedan afectar a la generación de bioelectricidad como: La influencia de, diferentes áreas de electrodo y distintas resistencias externas. Las celdas de tipo H se encuentra en constante estudio con el fin de mejorar factores de su diseño para aumentar la producción de electricidad y el tratamiento de aguas residuales.

3.3.1.2. Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano

(CCM). Se construyó 5 configuraciones de CCM y el montaje constituyo de dos cámaras (Tipo “H”) anaerobio (ánodo) y aerobio (cátodo), con un volumen de 1,7 litros. El volumen de las cámaras se determinó según el volumen del sustrato empleado, teniendo en cuenta que las CCM se encuentra a escala laboratorio, según Du, Li y Gu (2011) indican que el volumen de las cámaras no debe de sobrepasar los 50 litros, en este estudio el volumen del sustrato es de 1,600 L, cabe resaltar, aunque el volumen de las cámaras este directamente relacionado con el volumen del sustrato , dichos valores no pueden ser los mismos ya que si el volumen de cámaras es muy precisos corre el riesgo de fuga o vertimiento del sustrato , que puedan alterar al rendimiento de la CCM, por esta razón se sobre estimo en 100 mL el volumen de las cámaras, para obtener un volumen total efectivo de 1,7 L y evitar que el funcionamiento de las CCM se vea afectado.

El material utilizado para cada cámara (anaerobia y aerobia) fue recipientes de vidrio (Ver figura 22), se usó este material debido que el vidrio es un material con poca conductividad eléctrica y aislante (Helmenstine, 2016), lo que asegura que el flujo de energía eléctrica generada por las bacterias se da por los electrodos y no por las cámaras. A cada una de las cámaras se le hizo agujeros en la parte lateral, uno de los agujeros tuvo un diámetro de 3,5 cm las cuales van conectados entre cámaras por un puente salino quien se comportó como una membrana de intercambio de protones, el otro agujero solo se hizo a la cámara anaerobia quien funciono como puerto de muestreo del agua residual. Así mismo se le hizo un orificio en la parte superior de 2 centímetros de diámetro para facilitar, la alimentación del sustrato o para la medición de parámetros de control (pH y temperatura), cuando están en desusó estos orificios, se cierran con tapones de hule, para minimizar el ingreso de oxígeno

a la cámara anaerobia. Por otro lado, la cámara aerobia se le acondiciono un aireador de pecera para que brinde oxígeno al agua durante toda la etapa de operación; en cambio la cámara anaerobia fue cerrada herméticamente para evitar que ingrese el oxígeno del ambiente y darle una condición anaerobia.



Figura 22. Envases de vidrio con capacidad de 1700 ml

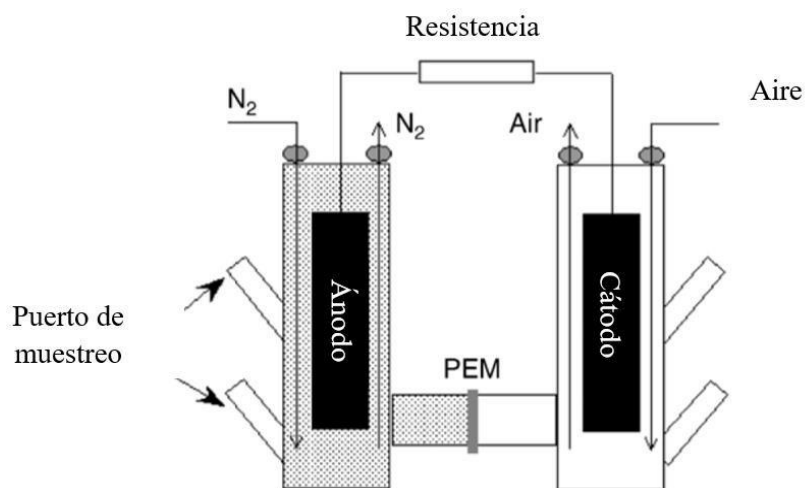


Figura 23. Celdas de Combustibles Microbiano de doble cámara tipo "H", de Du et al. 2007.



Figura 24. Construcción de las CCM a escala laboratorio

3.3.1.3. Área superficial de los Electroodos. La determinación del área y volumen de los electrodos más adecuado para la configuración de la CCM es uno de los parámetros menos estudiados. Santoro (2017) menciona las celdas de combustible es un estudio emergente que ha llamado la atención a los investigadores en los últimos 10 a 15 años, además los prototipos estudiados a escala laboratorio tienen múltiples variaciones, las dimensiones de los electrodos es una de ellas , no es posible establecer algún tipo de relación veraz o directa entre dimensiones y la generación de energía eléctrica, a razón que no existe continuidad de la investigación con parámetros establecidos de manera similar. Para esta investigación se tomó 3 áreas distintas de electrodo de grafito con el objetivo de ver si esto afecta en la obtención de la bioelectricidad en las CCM.

En cada una de las cámaras de las CCM se colocaron barras de grafito como electrodos, conectados hacia un cableado de cobre. Cabe resaltar que antes de colocar el electrodo estas fueron cortadas en 3 longitudes diferentes (18cm, 13cm y 8 cm) (Ver figura 25). Así mismo, previo a colocar los electrodos (ánodo) en la cámara anaerobia esta tuvo que ser aclimatada para la formación de una biopelícula de microorganismos. Los electrodos en las CCM son partes fundamentales para llevar a cabo el proceso de producción de energía y tratamiento de agua residual, este es el encargado de aceptar los electrones para la generación de energía eléctrica y a su vez, es el lugar donde se llevará a cabo el crecimiento de los microorganismos electrogénicos (Rababey, Angenent, Schroder y Keller, 2009). El material grafito según estudios realizados por Logan et al. (2007); Ah y Logan, (2013) y Bayona y Gutierrez, (2013), muestran que permite el paso de energía eléctrica y no afecta de manera negativa en el desempeño de la celda.



Figura 25. Electrodos de grafito para el ánodo y cátodo para cada CCM

3.3.1.4. Puente de Intercambio protónico. Existen tres tipos de materiales empleados con mayor frecuencia: Ultrex, Nafion y Agar-Agar. Sin

embargo, en esta investigación se utilizó el Agar - Agar con un electrolito de Cloruro de Sodio (NaCl) como puente de intercambio protones debido a su bajo costo y alta disponibilidad en el mercado, lo contrario ocurre con las otras membranas mencionadas. Según Parkash (2015) indica que cuando el puente de intercambio está constituido por algún tipo de electrolito se denomina puente salino, donde este permite el intercambio de iones, sin embargo, no hace parte de la clasificación. En este caso es el electrolito quien se encarga de la conducción de iones de una cámara a otra, el agar previene el intercambio físico de cualquier fluido presente en las cámaras anaerobia y aerobias (Garga, 2015). El agar es un tipo de coloide producto del extracto de algas marinas, un polisacárido conformado por agarosa y agaropeptina en forma de gel insoluble en agua fría (Fisheries and aquaculture management divisionfisheries and aquaculture management division, 1990). En la Figura 26, se muestra su estructura química.

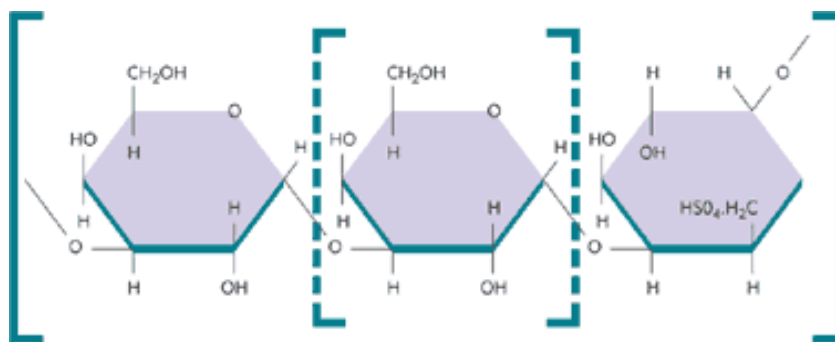


Figura 26. Estructura química del Agar-Agar, de Fisheries and aquaculture management divisionfisheries and aquaculture management division.(1990).

Los materiales como Nafion o el ultrex son eficaces para su implementación en una CCM, el Agar- Agar con electrolito a pesar de ser puente salino es también eficaz en la implementación, este último es una alternativa para el material de puente de intercambio de protones que cumple con el criterio de accesibilidad, el electrolito

empleado puede ser KCL o NaCL. En investigaciones realizadas por Jumma et al. (2016) comparan la eficiencia de material Nafion con un puente salino de agar- agar a NaCL a 1M en el tratamiento de agua residual de una industria chocolatera, donde la generación de energía eléctrica del puente salino con la concentración del electrolito fue apenas menor que la generada por la membrana de intercambio protónico, demostrando que la concentración del electrolito es la que disminuye la resistencia que pueda generar la implementación del puente salino para una CCM de doble cámara de tipo H. En la Figura 27, se observa el Agar-agar y el electrolito Cloruro de Sodio (NaCL) utilizadas en esta investigación.

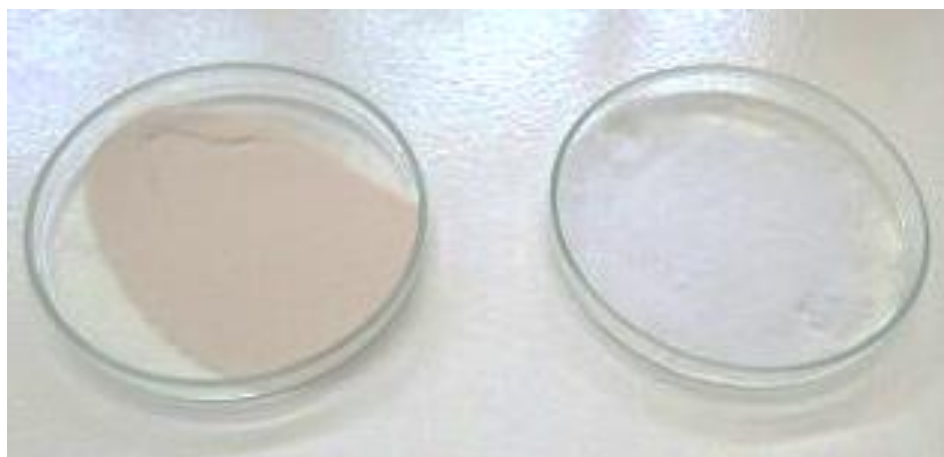


Figura 27. Agar-Agar y Cloruro de Sodio.

Por otra parte, la longitud del puente de intercambio protónico, se tomó de acuerdo a la investigación hecha por Buitrón y Perez (2011) donde determino una longitud de puente salino promedio de 3 a 8 estableciendo que la dimensión debe ser la más adaptable al tipo de configuración escogida, con el fin de alcanzar la eficiencia máxima de la CCM. Se determinó una longitud promedio de 5 cm para las CCM implementadas. (Ver Figura 28)



Figura 28. Longitud del puente de intercambio de protones

Preparación del puente salino. El puente salino (intercambio de protones) estuvo constituido por un tubo de PVC de 3.5 cm de diámetro y 5 cm de longitud, en donde se depositó la mezcla de agar y solución salina. La solución salina o electrolito tuvo NaCl al 10% y agar-agar al 5% (en peso) de acuerdo a las investigaciones realizadas por Kumar y Babu (2012).

En la Figura 29, se muestra la preparación del puente salino. Primeramente, se pesó en una balanza analítica los 10 gramos de NaCl y 5 gramos de Agar-Agar. Luego en un vaso precipitado esleymeyer de 200 ml se puso a hervir 100 ml agua destilada hasta ser burbujeada, donde se disolvió el NaCl y esta fue agitada con una varilla de vidrio hasta diluir, en seguida de manera minuciosa se aplicó 5 gramos de agar- agar moviendo hasta diluir la solución durante 5 minutos, posteriormente se hizo enfriar 5 minutos y se echó en los tubos de PVC. Se almaceno el puente salino en un vaso precipitado un día antes de ser utilizado. Este proceso se realizó para las 5 celdas y en cada replica, para obtener un buen funcionamiento del sistema la CCM.



Figura 29. Preparación de la membrana de intercambio de protones (puente salino)

3.3.1.5. Limpieza de electrodos de grafito. La limpieza de los electrodos se realizó en una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a una concentración de 1M posteriormente en una solución de Ácido Clorhídrico (HCL) 1M según Chaudhuri y Lovley (2003).

Para la preparación de la solución de NaOH a 1M. Se utilizó 4 gr de masa del soluto, requerido para 0.1L (soluto) de una disolución con concentración de 1M.

$$\begin{array}{ccc}
 1M & \longrightarrow & 1L \\
 x & \longrightarrow & 0.1 L \\
 \\
 & x = \frac{1 M * 0.1 L}{1L} & \\
 \\
 & x = 0.1 moles & \\
 \\
 1 \text{ mol NaOH} & \longrightarrow & 40 \text{ gramos}
 \end{array}$$

0.1 moles



0.1 L

$$x = \frac{0.1 * 40 \text{ gramos}}{0.1 \text{ mol NaOH}}$$

$$x = 4 \text{ gramos}$$

Asi mismo para la preparación de la solución de HCL a 1M. Se utilizo 3.7 gr de masa del soluto, requerido para 0.1L (soluto) de una disolución con concentración de 1M.

1M



1L

X



0.1 L

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

$$x = 0.1 \text{ moles}$$

1 mol HCL



40 gramos

0.1 moles



0.1 L

$$x = \frac{0.1 * 36.5 \text{ gramos}}{0.1 \text{ mol HCL}}$$

$$x = 3.7 \text{ gramos}$$

Despues de la preparación de las soluciones de NaOH y HCL. Primeramente, los electrodos fueron lavados con agua destilada en un vaso precipitado de 1000 mL, posteriormente se lavó con NaOH y finalmente en una campana extractora de gases se lavó con HCL. Este lavado se hizo con el objetivo de eliminar todos los rastros de partícula del electrodo de grafito ya que estas partículas impiden la formación de la biopelícula de los microorganismos electrogénicos (Ver figura. 30).



Figura 30. Lavado de los electrodos de grafito (ánodo y cátodo)

3.3.1.6. Prueba de las CCM. Una vez finalizado la construcción de las CCM de tipo “H”, se evaluó el buen funcionamiento del sistema (ánodo, cátodo, puente salino, bomba de aireación) por 24 horas. Donde se añadió agua destilada en ambas cámaras, para la cámara anaerobia se disolvió un colorante verde (Ver figura 31); esto se desarrolló con el propósito de observar si existía algún trasvase de agua entre ambas cámaras.



Figura 31. Pruebas de la CCM con colorante

En la Tabla 11 se presenta la configuración general de cada una de las Celdas de combustible Microbiano.

Tabla 11

Configuración de las 5 Celdas de combustible Microbiano

Celdas de Combustible Microbiano	Configuración de la celda	Tipo de Material	Material de electrodos(Ánodo y Cátodo)	Área del electrodo (cm ²)	Volumen del electrodo (cm ³)	Puente de intercambio Protónico	Resistencia Externa(Ω)
CCM 1	Tipo H doble Cámara	Vidrio	Pieza cilíndrica de Grafito	151	88	5 cm de largo	150
CCM 2				151	88		50
CCM 3				73	39	Puente Salino(Agar-Agar con NaCl)	50
CCM 4				73	39		150
CCM 5				112	64		100

3.3.2. Recolección de la muestra

El compartimiento anódico de una CCM tiene un similar funcionamiento que un reactor anaerobio. Según Chernicharo (2013) menciona que para un adecuado funcionamiento de un reactor anaerobio es necesario un pre-tratamiento del agua residual. Esta consideración fue tomada para la recolección de la muestra. Para la

toma de muestra del agua residual domestica (afleunte y efluente, se considero de acuerdo a las especificaciones del Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Agua Residuales domesticas o municipales.

La muestra se tomó luego del pre-tratamiento de la PTAR de Santa Clara, donde son removidos los sólidos gruesos y finos a través del sistema de rejillas automatizadas, las arenas y material inerte en el desarenador. El punto de recolección fue a la salida del desarenador, para la toma de muestra se utilizó la técnica de muestreo compuesto, donde se tomó dos muestras en 2 tiempos distintos (30 minutos después de haber hecho el primero). Obtenidas las muestras de agua residual se realizó una mezcla de ambas, para obtener una muestra más confiable y homogénea. Esta metodología se realizó en toda la etapa de experimentación.



Figura 32. Punto de muestreo PTAR Santa Clara

3.3.2.1. Transporte de las Muestra. El Transporte de la muestra fue en un Taxi de Tipo Station Wagon por tener una maletera de mayor tamaño. Se transportaron 1 balde de agua residual de capacidad de 20 litros desde la PTAR Santa Clara hasta el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión.

3.3.3. Obtención del inóculo (microorganismos)

Diversos trabajos han utilizado inóculo proveniente de diferentes sistemas como lodos activados (Lee, Phung, Kim y Sung, 2003 y lodos anaerobios (Rabaey, Lissens, Siliciano y Verstraete, 2003). Los cultivos mixtos generan una mayor energía que los cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo y a la participación de cepas con capacidades metabólicas complementarias (Lee et al., 2003). Teniendo esta consideración el inóculo de microorganismos se obtuvo de un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos por sus siglas en inglés (UASB) (Ver figura 33), de la CITRAR (Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos) perteneciente a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Ubicada en la parte norte del campus universitario, Sector “T” en un área de 4.5 Ha, al lado derecho de la Avenida Túpac Amaru en el distrito del Rímac, provincia de Lima (ver figura 34).



Figura 33. Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos por sus siglas en inglés (UASB)



Figura 34. Ubicación del centro de investigación en tratamiento de aguas residuales y residuos peligrosos (CITRAR), de Google earth, 2018.

Para la toma de muestra del lodo del reactor UASB, se tomó como referencia a Castillo (2002). Se realizó extrayendo la cantidad de lodo necesario mediante las válvulas de drenaje, para tener una muestra representativa, primero se descartó el

lodo almacenado en la válvula, para lo cual se eliminó el volumen inicial colectado del sistema. Seguidamente se tomó 6 litros en un recipiente limpio llegando hasta el borde superior para minimizar la exposición de oxígeno, y se cerró herméticamente con una cinta adhesiva. La muestra fue refrigerada en un cooler y transportada al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad peruana Unión, donde se refrigeró a 4° C hasta el momento de ser utilizada (Ver figura 35, 36 y 37).



Figura 35. Descarte del lodo almacenado en la válvula del Reactor UASB



Figura 36. Toma de muestra de lodo (inoculo) del reactor UASB



Figura 37. Transporte de muestra de lodo (inoculo) del reactor UASB

3.3.4. Caracterización del agua residual doméstica

Debido que el caudal del agua de ingreso a la PTAR Santa Clara cambia conforme al tiempo. El muestreo se ejecutó desde el inicio de operación de las CCM hasta finalización de la investigación. La toma de muestra antes (pre prueba) del ingreso al sistema de Celdas de Combatible Microbiana (CCM) se realizó en la misma PTAR (ver figura 38) y las muestras post prueba se realizaron en el laboratorio de estudio (ver figura 39). Además, los muestreos fueron realizados a la misma hora (11:20 am para pre prueba y 2:30 pm para post prueba) para todos los casos. Los parámetros a caracterizar fueron: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda química de Oxígeno (DQO), pH y Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) agua.

En frascos de plástico de 1000 mL esterilizado se tomó la muestra de agua residual doméstica, para el análisis del parámetro DBO_5 y para el análisis del parámetro DQO se utilizó frascos de plástico debidamente esterilizado de 500 ml añadiendo 35 gotas del ácido sulfúrico para su preservación. Finalmente, en un vaso precipitado de 50 ml se llenó al tope la muestra de agua residual para los análisis de los parámetros físicos como: pH y temperatura.

Una vez terminado el muestreo de los parámetros químicos, los frascos fueron preservados en el cooler para ser enviados al laboratorio INACAL-DA para su respectivo análisis.

Por otro lado, para el análisis de los parámetros físicos (pH y temperatura), estos fueron analizados en el laboratorio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, Lima. Para la medición de los respectivos parámetros se utilizó el equipo pH metro de marca HANNA, otorgando resultados en unidades de pH y °C respectivamente (Ver Figura 40).



Figura 38. Toma de muestras generales pre prueba (Efluente) para el análisis de parámetros químicos



Figura 39. Toma de muestras post prueba (Afluente) para el análisis de parámetros químicos.



Figura 40. Análisis de los parámetros físicos (pH y temperatura)

3.3.5. Acondicionamiento de electrodos para la formación de biopelícula y aclimatación de los microorganismos electrogénicos.

3.3.5.1. Formación de Biopelícula de microorganismos electrogénicos en los electrodos (ánodo). El acondicionamiento de electrodos para la formación de biopelículas se llevó a cabo según Alzate et al (2008) y Samayoa (2016). Los electrodos (ánodo) de grafito fueron lavados con agua destilada,

posteriormente se colocaron en 5 frascos agregando 600 ml de lodo anaerobio como consorcio microbiano, así como también 1000 ml de agua residual. Finalmente se colocaron en una incubadora a 35 °C por un lapso de 15 días homogenizando las muestras cada dos días. Esto se hizo con la finalidad de formación de biopelícula en los electrodos (Ver figura 41).



Figura 41. Acondicionamiento de los electrodos para la formación de la biopelícula de microorganismos electrogénicos

3.3.5.2. Aclimatación de los microorganismos electrogénicos al sustrato (agua residual domestica). La aclimatación de las 5 CCM consistió en, colonizar los electrodos ánodo con el consorcio microbiano contenido en el agua residual, con el propósito de seguir formado un biofilm; es decir, una comunidad compleja de microorganismos que se adhieren al electrodo y produzcan un polímero celular como recubrimiento que les ayuda a retener el alimento y a protegerse de agentes tóxicos, para finalmente producir bioelectricidad (Alzate et al, 2008)

En cada una de las cámaras anaerobias se colocó 1.6 L de agua residual doméstica de la PTAR Santa Clara, los electrodos (ánodo) fueron sumergidos cuidadosamente en las cámaras anódicas de las 5 CCM, luego se prosiguió a cerrar herméticamente. Seguidamente en cada una de las cámaras aerobias se colocó los electrodos cátodo con agua destilada, en donde se burbujeo oxígeno con un aireador de pecera. Esta etapa de aclimatación tuvo una duración de 180 horas. Zhou y Minghua (2014) indican que en este lapso de tiempo los microorganismos electrogénicos serán aclimatados.



Figura 42. Acondicionamiento de la CCM para la fase de aclimatación



Figura 43. Aclimatación de microorganismos electrogénicos al sustrato

3.3.6. Operación de la Celdas de Combustible Microbiano (CCM)

Las 5 celdas de combustible microbiano (CCM), tuvieron 3 tratamientos o replicas. Cada replica trabajó con muestras de agua residual domestica de concentraciones de (DQO y DBO) diferentes: debido a que el sustrato usado no tuvo modificaciones y poder evaluar el comportamiento de las CCM en a la biodegradación de la materia orgánica al trabajar con sustratos reales. Es de anotar que para el cambio del sustrato en cada replica no se tuvo condiciones estrictas anaerobias.

El procedimiento consistió en, colocar 1.600 L de agua residual doméstica de la PTAR Santa Clara en cada una de las cámaras anaerobias (estas ya contenían los electrodos ánodo aclimatados), e inmediatamente se cerró herméticamente para evitar el ingreso de oxígeno del Ambiente. De seguida en cada una de las cámaras aerobias se llenó con agua destilada, cabe mencionar que esta cámara estaba expuesta al ambiente, donde se puso a burbujear oxígeno con un aireador de pecera (ver figura 44). Este procedimiento se realizó durante el tiempo que duro la investigación. Cada replica tuvo una duración de 9 días.



CCM 1



CCM 2



CCM 3



CCM 4



CCM 5

Figura 44. Puesta en marcha de la CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5

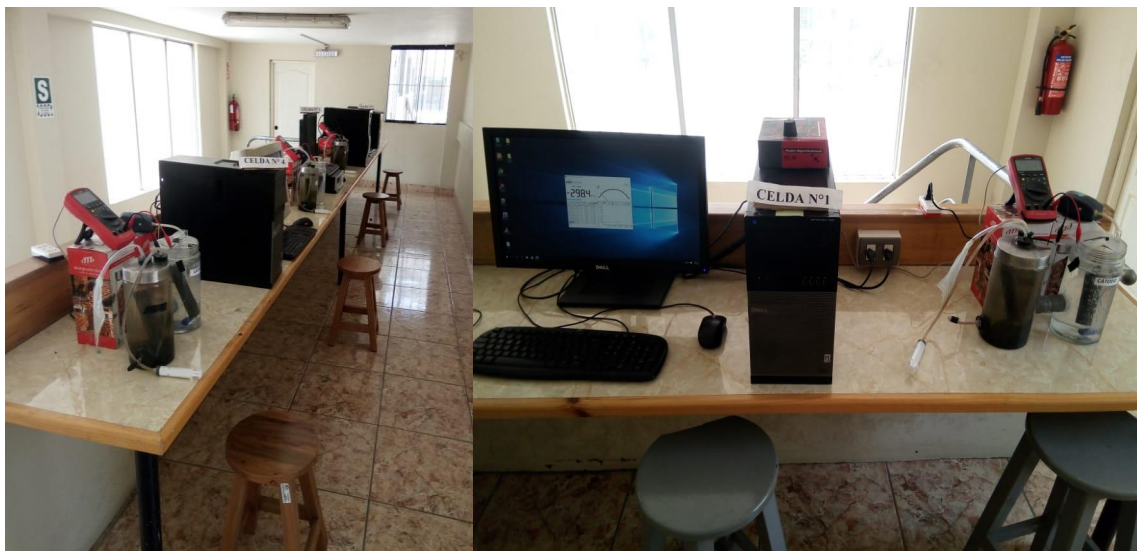
Por otro lado, para analizar la biodegradación de la materia orgánica y la obtención de bioelectricidad en las CCM, se emplearon 3 diferentes resistencias externas (150Ω , 100Ω y 50Ω) y diferentes áreas de electrodo, este último vario en la Longitud (18 cm, 13 cm y 8 cm) todos los electrodos tuvieron un mismo diámetro de 1.25 cm; resultando cada electrodo con un área de (119.4 cm^2 , 56.5 cm^2 y 87.9 cm^2). En resumen, se trabajó con 5 CCM (Ver Tabla 12). Los cambios que ocurrieron en la comunidad microbiana durante la investigación fueron monitoreados mediante seguimiento electroquímico.

Tabla 12

Biodegradación de la materia orgánica y obtención de bioelectricidad a distintas áreas de electrodo y resistencias externas

Celdas de Combustible Microbiano (CCM)										
(DQO y DBO ₅) mgO ₂ /L	CCM 1		CCM 2		CCM3		CCM 4		CCM 5	
	Resistenci a Externa	Área de electrod o	Resistenci a Externa	Área de electrod o	Resistenci a Externa	Área de electrod o	Resistenci a Externa	Área de electrod o	Resistenci a Externa	Área de electrod o
	150 Ω	151 cm ²	50 Ω	151 cm ²	50 Ω	73 cm ²	50 Ω	73 cm ²	100 Ω	112 cm ²
Muestra Aclimatació n	Aclimatación		Aclimatación		Aclimatación		Aclimatación		Aclimatación	
Muestra 1	T1		T1		T1		T1		T1	
Muestra 2	T2		T2		T2		T2		T2	
Muestra 3	T3		T3		T3		T3		T3	

Ya realizado la construcción de las CCM y la puesta en marcha del sistema, para poder estudiar el desempeño eléctrico, se realizó la medición del voltaje (V) en el conductor externo que está conectado a una resistencia externa en entre el ánodo y el cátodo. La medición de V se realizó ensamblando cada CCM a un “Multímetro digital PRASEK PREMIUM PR-36, auto rango RMS (valor real) de alta precisión con interfaz USB”, y fueron conectados a una computadora personal donde se almacenaron los datos (ver Figura 45). Los multímetros tomaron lecturas de voltaje (mV) intervalo de un minuto. Finalmente se exportaban los datos del día (24 horas), a una hoja de Excel con el compendio de todos los datos capturados.



*Figura 45.*Dispositivos Multimetro PR-36 para el seguimiento de la energía eléctrica obtenida

Las variables analizadas en la entrada, durante y en la salida del proceso de las CCM se presentan en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13

Variables de operación

Entrada del Proceso	Durante el Proceso	Salida del proceso
DBO ₅	T°C agua	DBO ₅
DQO	pH	DQO
pH	Voltaje	pH
T°C (agua)		T°C(agua)

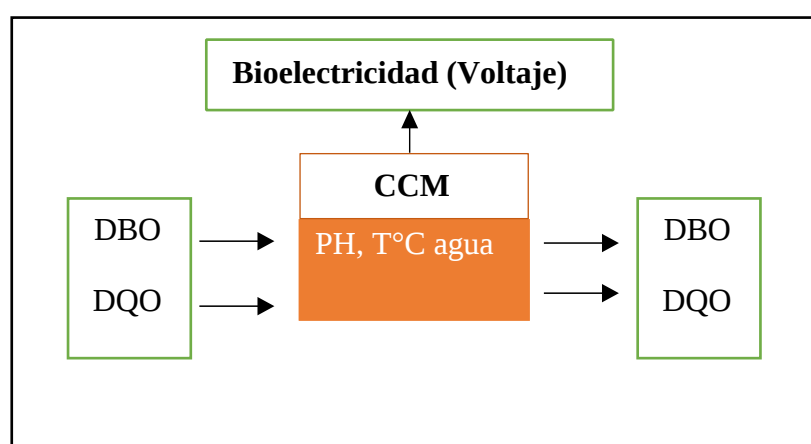


Figura 46. Diagrama de proceso para las 5 CCM

3.3.7. Análisis del desempeño eléctrico de la CCM

Los parámetros a analizar para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de sistema son: La corriente eléctrica (I) (ecuación 2) esta fue calculada en relación a la resistencia externa (R) y el voltaje (V) por medio de la ley de Ohm, la potencia generada (P) (ecuación 3) se obtuvo al multiplicar la intensidad por el voltaje, la densidad de potencia (DP)(ecuación 4, 5 y 6) dividiendo (P) entre el área superficial del electrodo y finalmente se calculó la eficiencia Coulombica (EC)(ecuación 7 y 8). Cabe resaltar que las ecuaciones fueron tomadas del capítulo anterior del ítem 2.11.4.

3.3.7.1. Intensidad de Corriente eléctrica. La intensidad de corriente eléctrica se define como la cantidad de flujo o carga eléctrica que pasa por un circuito

en un tiempo determinado. Para ello se utilizará la Ecuación 2. Intensidad de Corriente

(I)

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde:

I: Intensidad de corriente eléctrica en Amperio(A)

V: Voltaje, en Voltios (V)

R: Resistencia externa, en Ohmios (Ω)

3.3.7.2. Potencia. Es la cantidad de energía que entrega o genera la CCM en un tiempo determinado. Para ello se utilizará la Ecuación 3. Potencia (P)

$$P = V * I$$

Donde:

P: Potencia en Watts (w)

V: Voltaje en Voltios (V)

I: Intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A)

3.3.7.3. Densidad de potencia (DP). La densidad de potencia expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang et al., 2010). Se calculo de la siguiente manera: Ecuación 4. Potencia por unidad de Área del electrodo (DP).

$$P_{An} = \frac{V^2}{A_{An} * R_{ext}} \text{ ó } DP \left(\frac{mW}{m^2} \right) = \frac{Potencia (mW)}{Area de contacto del electrodo (m^2)}$$

Donde:

R_{ext}: Resistencia externa en Ω

V: Potencial en voltios

A: Área de la superficie del electrodo anódico en m²

3.3.7.4. Eficiencia coulombica (EC). La eficiencia coulombica (Coulombic Efficiency, por sus siglas en inglés, CE) se refiere a la recuperación de electrones (e⁻) acumulados en forma de corriente, es decir, la fracción o porcentaje de energía eléctrica posible de obtener, mediante una reacción de óxido-reducción completa, del sustrato, presente en la materia orgánica, que ha sido consumido. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCM. Según (Sharma y Li, 2010) la EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el agua residual de la cámara anódica, mediante la siguiente formula (Luo et al., 2010). (Ecuación 7 y 8)

$$CE = \frac{\text{Coulombs recuperados}}{\text{Total de Coulombs en el sustrato}}$$

$$\text{Coulombs recuperados} = \int_0^{tb} I dt$$

$$\text{Total de Coulombs en el ARS} = \frac{bes * Van * \Delta Csub}{Ms}$$

Para sustratos complejos, o agua residual, es conveniente usar la DQO como medida de la concentración del sustrato. Para un sistema por lotes, tandas o baches se tiene la siguiente ecuación desglosada de la CE: Ecuación 9. Eficiencia coulombica (EC) para agua residual.

$$CE = \left(\frac{M02 * \int_0^{tb} I dt}{F * bo2 * Van * \Delta DQO} \right) * 100$$

Donde:

CE= Eficiencia Coulombica de la CCM (%).

Mo2: peso molecular del oxígeno en gramos/ mol (32 g/mol)

$\int^t I(t)dt$: coulombios reales generados en la operación de la CCM en coulombios °(C).

F: constante de Faraday ($F = 96485 \text{ C/mol } e^-$) .

t: tiempo de reacción o ciclo de operación de la CCM en segundos (s).

bo2: número de moles de electrones generados por mol de oxígeno (4 mol)

Van: volumen total de la cámara anódica en litros (L).

ΔDQO : Cambio en la concentración del sustrato, $DQO_i - DQO_f$, en mg/L durante el ciclo de operación de la CCM.

3.3.8. Análisis de biodegradación de la materia orgánica.

El consumo de la materia orgánica se evaluó en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5).

3.3.8.1. Cálculo de eficiencia de Remoción de Demanda química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5). Al finalizar las réplicas experimentales se realizó los análisis de los parámetros de DQO y DBO_5 , las cuales son un parámetro para evaluar la calidad del agua, donde se determinará la cantidad de materia orgánica removida en las CCM. El cálculo de la eficiencia de remoción de DQO y DBO_5 se hizo utilizando la ecuación:

Ecuación 9. Eficiencia de Remoción de DQO

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

Ecuación 10. Eficiencia de Remoción de DBO_5

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

Donde:

nDQO o nDBO: Eficiencia de Remoción, en %

DQO_i: Demanda Química de Oxígeno inicial, en mg/L

DBOi: Demanda Bioquímica de Oxígeno, en mg/L

DQOf: Demanda Química de Oxígeno final, en mg/L

DBO5f: Demanda Bioquímica de Oxígeno, en mg/L

3.4. Variables de Estudio

3.4.1. Variable Independientes

Explica, condiciona o determina el cambio en las variables dependientes y se refiere a aquellos componentes que origina la alteración de las variables dependientes. Para el presente estudio las variables independientes corresponden a la resistencia externa y área del electrodo.

- Resistencia Externa (Ω)
- Área del electrodo de grafito (cm^2)

3.4.2. Variable Dependientes

Para determinar el desempeño eléctrico generado en las diferentes celdas de combustible microbiano, se midió mediante la obtención de corriente eléctrica (bioelectricidad) que se medirá en unidades de Voltaje. Además, para saber y conocer que un agua residual es tratada, dependerá de los parámetros a ser modificados que son parte de la materia orgánica.

- Voltaje(mV)
- Densidad de Potencia(mW/m^2)
- Eficiencia Coulombica (%)
- DQO
- DBO₅

3.4.3. Variables Intervinientes

Se interpone entre las variables antes mencionadas, no es objeto de estudio, pero puede debilitar o intensificar la relación aparente el problema y una posible causa. Estas variables intervienen el desempeño eléctrico generado en las diferentes celdas de combustible microbiano y así mismo intervienen en la biodegradación de la materia orgánica dado por los microorganismos existentes en el agua residual. Las variables intervinientes corresponden a:

- Temperatura agua (T °C)
- pH

3.5. Estudio y Diseño de Investigación

3.5.1. Tipo de investigación

El actual trabajo está orientado en una investigación cuantitativa de tipo pre-experimental, ya que, según Hernandez, Fernandez y Baptista (2010) esta clase de investigación viene a ser secuencial porque persigue técnicas para llegar al objetivo, y es demostrativo puesto que requiere de estudios para demostrar que los resultados sean ciertos. Además, la cogida de los datos se basa en los análisis de los parámetros físico-químicos, que es llevado por procesos estandarizados, debido que los resultados obtenidos son cantidades o números.

3.5.2. Diseño de la Investigación

Este proyecto por su naturaleza es de carácter experimental, consta de las siguientes fases.

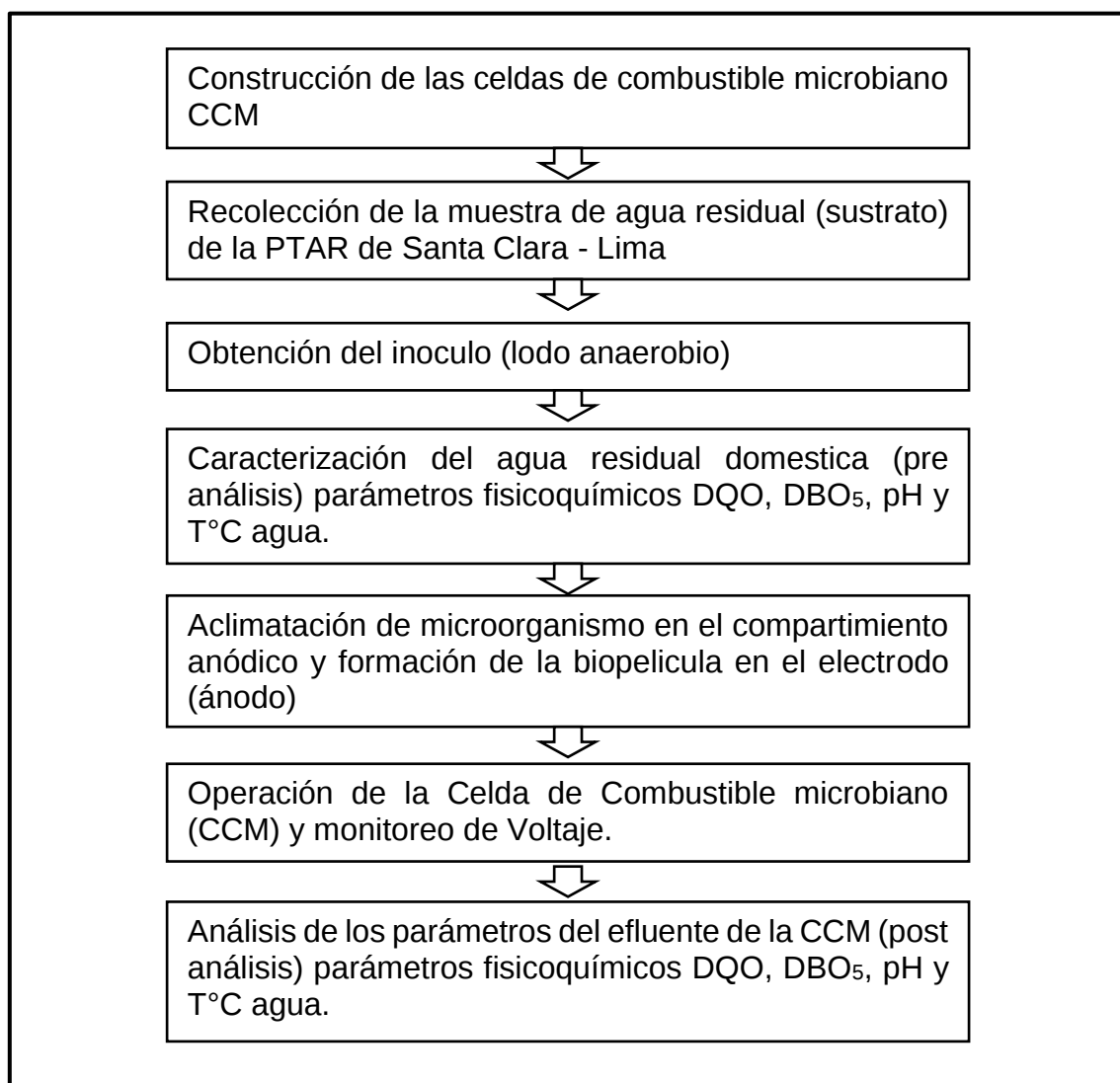


Figura 47. Procedimiento del diseño de la investigación

3.5.3. Matriz de Consistencia

Tabla 14

Matriz de Consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Fases	Actividad	Metodología
¿La biodegradación de la materia orgánica y la producción de bioelectricidad se pueden obtener en la Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica?	General Evaluar la biodegradación de la materia orgánica y la producción de bioelectricidad en las celdas de combustible microbiano a partir del agua residual doméstica.	Mediante la biodegradación de la materia orgánica se produce bioelectricidad en las Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica.	Dependiente: *Eficiencia de Remoción de la DQO Y DBO (%). *Voltaje (mV). *Densidad de Potencia (mW/m2). *Eficiencia Coulombica (%).	Diseño de la Celda de Combustible Microbiano	Logística de materiales económico, manejable y eficiencia de una Celda de Combustible Microbiano. Construcción de la Celda de Combustible Microbiano.	El actual trabajo está orientado en una investigación cuantitativa de tipo pre- experimental, ya que, según Hernandez, Fernandez, y Baptista (2010) esta clase de investigación viene a ser secuencial porque persigue técnicas para llegar al objetivo, y es demostrativo puesto que requiere de estudios para demostrar que los resultados sean ciertos. Además, la cogida de los datos se basa en los análisis de los parámetros físico-químicos, que es llevado por procesos estandarizados, debido que los resultados obtenidos son cantidades o números.
¿Se podrá remover la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual doméstica en las Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica.	Específico Analizar la eficiencia de remoción de materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual doméstica en las Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica.	Mediante las Celdas de Combustible Microbiano se remueve la materia orgánica en función de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual domestica	Independiente: *Area Superficial del Electrodo de Grafito (cm2). *Resistencia externa (ohm). Intervinientes: * pH. *Temperatura del agua (°C)	Recolección de la Muestra y obtención del inóculo	Recojo de Muestra de Agua Residual Domestica Recojo de lodo del reactor UASB de CITRAR-UNI	

¿Se podrá remover de materia orgánica en función a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) del agua residual domestica mediante Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica?	Analizar la eficiencia de remoción de materia orgánica en función a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) del agua residual domestica mediante Celdas de Combustible Microbiano a partir del agua residual doméstica.	Mediante las Celdas de Combustible Microbiano se remueve la materia orgánica en función de la Demanda Biológica de Oxígeno (DQO) del agua residual domestica		Caracterización del Agua Residual	Caracterización de los parámetros (DBO, DQO, pH, Temperatura, Conductividad.) fisicoquímicos del Agua Residual Domestica
¿Tendrá efecto de las diferentes resistencias y área superficial total del electrodo de Grafito en la generación de bioelectricidad?	Determinar el efecto de las diferentes resistencias y área superficial total del electrodo de Grafito en la generación de bioelectricidad	La Resistencia externa y el área superficial del electrodo son significativos en la Obtención de Bioelectricidad en las Celdas de Combustible Microbiano.			Limpieza de electrodos
				Formación de la biopelícula en el electrodo y aclimatación	Acondicionamiento de los electrodos para la formación de la biopelícula
					Colonización de los electrodos en cada cámara anaeróbica inmersos en el agua residual domestica
				Operación de las Celdas de Combustible Microbiano	Puesta en Marcha de las Celdas de Combustible Microbiano
					Monitoreo de las Celdas de Combustible Microbiano
				Eficiencia de Remoción en función de la DQO y DBO ₅	Análisis de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente.

3.6. Diseño estadístico

3.6.1. Diseño estadístico para la generación de bioelectricidad

Se empleó el diseño experimental factorial (2^2) con punto central que radica de 4 puntos factoriales, 1 puntos central, totalizando 5 experimentos. Los rangos y niveles de las variables independientes usados en la forma codificada y no codificada en este estudio son mostrados en la Tabla 15.

En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son más aplicables para el tipo de experimentos mencionados. Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores (Rodríguez, 2014).

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento.

Si varios de los factores de un experimento factorial son cuantitativos, se puede usar una superficie de respuesta para modelar la relación entre los parámetros establecidos y los factores del diseño para lo cual se generó el grafico de contorno de respuesta (Montgomery, 2004).

Los experimentos se realizaron en orden y los datos analizados por análisis de varianza, normalidad, para comparar el efecto de los tratamientos. Los parámetros del modelo de primer orden de los efectos para el diseño factorial de dos factores será (Rodríguez y lemma, 2014):

Ecuación 11. Diseño Experimental

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

Dónde: (y) es la respuesta predicha medida: β_0 es el intercepto; β_i y β_{ij} son los coeficientes del modelo lineal e interacción y X_i y X_j son los valores codificados de las variables independientes.

3.6.1.1. Análisis estadístico. Los gráficos de contorno y superficie de respuesta son usados para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente y deducir las condiciones óptimas. Todos los análisis estadísticos se realizaron a un nivel de significancia de 95 % ($p \leq 0.05$) usando el software S-TATISTICA versión 13.4.

Tabla 15

Diseño factorial variable codificada y no codificada para la obtención de los resultados de Bioelectricidad (mV)

Tratamiento S	Variables Independientes				Variable Dependiente Bioelectricidad		
	X_1	X_2	Resistencia (Ω)	Área del Electrodo (cm^2)	mV	DP	EC (%)
1	-1	-1	50	73 (8)	-	-	-
2	-1	1	50	151 (18)	-	-	-
3	1	-1	150	73 (8)	-	-	-
4	1	1	150	151 (18)	-	-	-
5	0	0	100	112 (13)	-	-	-

Nota: Voltaje (mV), Densidad de Potencia (DP) y Eficiencia Coulombica (EC)

3.6.2. Diseño estadístico para biodegradación de la materia orgánica presente en el agua residual domestica

Es una investigación pre-experimental con dos mediciones, la cual consta de pre prueba y post prueba (Hernandez, Fernandez y Baptista, 2010); con una distribución normal (Campana de Gauss); es decir es una distribución de variable

continua que queda especificada por dos parámetros de los que depende su función de densidad y que resultan ser la media y la desviación normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución. De esta manera, la media aritmética, la mediana y la moda de la distribución son iguales y se localizan en el pico; además, es simétrica alrededor de su media y es asintótica; es decir que la curva se acerca cada vez más al eje X, pero jamás llega a tocarlo, donde las colas de la curva se extienden de manera indefinida en ambas direcciones (Martínez y Mari, 2003). Todas estas características definidas sirven para determinar si los datos obtenidos en las mediciones se pueden ajustar conociendo los parámetros. Este diseño consiste en aplicar mediciones de los parámetros químicos del afluente previamente al tratamiento, dar un monitoreo durante el tratamiento del efluente y finalmente realizar mediciones de parámetros químicos del efluente, y así determinar el nivel de eliminación (remoción) de la materia orgánica.

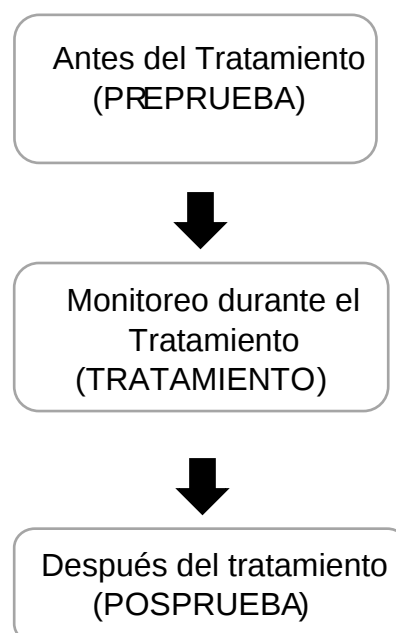


Figura 48. Diseño de la investigación para biodegradación de la materia orgánica

3.6.2.1. Análisis estadístico. Los resultados recogidos fueron insertados y examinados mediante el software Estadística. Al tener la totalidad de datos de esta investigación se iniciara contrastando su Distribución Normal mediante la prueba de Shapiro- Wilk, ya que es utilizado para comprobar si unos determinados datos han sido extraídos de una población normal, en esta prueba los parámetros a trabajar son la media y la desviación típica; y dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas las cuales son menores de 50 individuos o muestreos ($n < 50$) (Shapiro y Wilk, 1965). Posteriormente se evaluará si existen diferencias significativas entre el antes y después de cada parámetro químico, aplicando la prueba de T-STUDENT para muestras relacionadas, utilizando el software *Statistica* versión 13.4.

Análisis de T-STUDENT

Hipótesis de diferencias de medias:

H₀: No existe diferencia significativa entre las medidas de DQO y DBO antes (afluente) con el DQO y DBO después (efluente) del tratamiento.

H_a: Existe diferencia significativa entre las medidas de DQO y DBO antes (afluente) con el DQO y DBO después (efluente) del tratamiento.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

H₀: $\mu_1 = \mu_2$

H_a: $\mu_1 \neq \mu_2$

O de igual forma se puede expresar así:

H₀: DBO₅ antes = DBO₅ después

H_a: DBO₅ antes $\neq$ DBO₅ después

Estadística de prueba: A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12. Estadística de prueba

$$\frac{Xd}{Sd/\sqrt{n}} \Rightarrow Xd = \sum_1^n \frac{Xi1 - Xi2}{n}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d1 - Xd)^2}{n - 1}}$$

Donde

Xd = Media aritmética de las diferencias

Sd = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la T- Student, considerando $n - 1$ grados de libertad y $1 - \alpha$ de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación; se rechaza la H_0 si el P- calculado (sig.) es menor que el P-Valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre en antes(afluente) y después(efluente); pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencias significativas entre el antes (afluente) y el después (efluente).

Rechazar la H_0 , sig. $< \alpha$ (0.05)

Aceptar la H_0 , sig. $> \alpha$ (0.05)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del Aguas Residual Domestica

Los resultados de la caracterización del agua residual doméstica se compararon con los valores de composición típica del agua residual domestica de concentración débil, media y fuerte reportados por Melcalf y Eddy (2014). Los datos promedio de la caracterización del ARD de la PTAR Santa Clara y la comparación con el autor mencionado se muestran a detalle en la Tabla 16 donde indica que el agua residual a tratar tiene alto contenido de carga orgánica. Además, Antonio (2018) indica que los valores normales de conductividad en las aguas residuales domesticas oscilan en un rango de 500 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y valores $> 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ afectan al proceso biológico de depuración, por lo que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de valores normales de conductividad, permitiendo de esta manera el desarrollo de una comunidad bacteriana estable. Así mismo los Solidos Totales Disueltos (TDS) y la conductividad van estrictamente relacionados, ya que su cantidad total de iones móviles cargados, nos muestra la existencia de minerales como sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua (Panachlor S.A, 2015).

Tabla 16

Caracterización de las Aguas Residuales Domesticas

Parámetro	Unidad	Valores			Valor Promedio	Desviación Estándar	Clasificación
		Replica 1	Replica 2	Replica 3			
DBO ₅	mgO ₂ /L	1059	817	726	867.3	±172	Fuerte
DQO	mgO ₂ /L	1853	1341	1276	1490	±316	Fuerte
PH	Unidad pH	6.8	6.9	7	7	±0	--
Temperatura de agua	°C	24.3	24.1	24.2	242	±0	--
Conductividad	µs/cm	640	620	580	613	±31	--
Total de Solidos disueltos (TDS)	mg/L	1300	1270	1180	1250	±62	--

4.1.1. Biodegradabilidad del Agua Residual Domestica

La relación promedio de la DBO₅ /DQO se expresa en la Tabla 17. Donde se observa que la biodegradabilidad (DBO₅/DQO >0.4) del agua residual es 0.58 mayor que el valor establecido por Osorio y Peña (2002), indicando que la materia orgánica presente en el agua residual domestica puede ser biológicamente eliminada, a través de sistemas de tratamiento biológico como fangos activados o lechos bacterianos (Hernandez, 1992). De esta relación se deduce que un 58% de la materia orgánica es biodegradable, mientras que el 42% es materia inorgánica no biodegradable.

Tabla 17

Biodegradabilidad del Agua Residual Domestica

Parámetro	Unidades	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Valor promedio	Desviación Estándar	Biodegradabilidad (DBO ₅ /DQO) >0.4
DBO ₅	mgO ₂ /L	1059	817	726	867.3	±142	0.58
DQO	mgO ₂ /L	1853	1341	1276	1490	±316	

4.2. Análisis físico-químicos de los parámetros reales antes y después del tratamiento

Se inició con el tratamiento del ARD mediante las diferentes configuraciones de Celdas de Combustible Microbiano (CCM). Las CCM estaban diferenciadas por la variación que se les hizo en la resistencia externa y el área superficial del grafito. Todas las celdas iniciaron simultáneamente su tratamiento y cada CCM hizo 3 Réplicas. Cabe resaltar que cada replica se realizó en diferentes semanas y se sabe que las concentraciones de materia orgánica del agua residual que ingresa a la PTAR Santa Clara, varia con el pasar del tiempo, esto quiere decir que cada replica tuvo diferentes parámetros fisicoquímicos de ingreso al sistema de la CCM.

Los análisis químicos (DBO₅ y DQO), antes (Afluente) y después (Efluente) del tratamiento, mediante las CCM, fueron realizados por el laboratorio de ensayo Acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL-DA con Registro N° LE-077. En cuanto a los parámetros Físicos, como pH y temperatura, fueron analizados en Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento, se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18

Parámetros Fisicoquímicos antes y después del Tratamiento por replicas mediante el sistema de CCM

Prueba	Celdas	DQO (mgO ₂ /L)		DBO ₅ (mgO ₂ /L)		pH		T°C agua	
		Antes	después	Antes	después	Antes	después	Antes	después
Aclimatación	CCM1		183		104		6.6		21
	CCM2		244		139		6.6		21.2
	CCM3	1748	232	808	132	7.2	6.6	22.9	21.1
	CCM4		191		109		6.6		20.8
	CCM5		406		224		6.5		21.1
Replica 1	CCM1		244		140		6.5		23.1
	CCM2		240		138		6.5		23.1
	CCM3	1853	264	1059	152	6.8	6.6	24.3	22.9
	CCM4		175		99		6.5		23.1
	CCM5		337		193		6.6		23.4
Replica 2	CCM1		325		185		6.6		24.3
	CCM2		179		101		6.6		24.1
	CCM3	1341	268	817	154	6.9	6.6	24.1	24.3
	CCM4		289		165		6.6		24.6
	CCM5		350		199		6.6		24.1
Replica 3	CCM1		354		201		6.5		24.5
	CCM2		374		214		6.4		24.2
	CCM3	1276	317	726	181	7	6.6	24.2	24.8
	CCM4		366		209		6.5		24.1
	CCM5		394		230		6.6		24.1

4.3. Biodegradación de la Materia Orgánica en las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)

4.3.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual domestica proveniente de la PTAR Santa Clara, se observa que los valores de concentración de DQO oscila de 1276 mgO₂/L a 1853 mgO₂/L, considerado asi como un agua residual de tipo fuerte, de acuerdo a la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (2014). Así mismo, según esta clasificación el valor medio de la DQO de un agua residual típica se encuentra en 500 mgO₂/L, excediendo a este valor más del doble.

4.3.1.1. Aclimatación. Antes de la operación de las 5 CCM estas fueron aclimatadas con el agua residual domestica de la PTAR Santa Clara durante 9 días, logrando así la remoción de la materia orgánica. En la Tabla 19 se muestran los resultados de DQO obtenidos en la aclimatación, donde se observa una concentración de 1748 mgO₂/L al ingreso (afluente) de las 5 CCM y como resultado en el efluente, la DQO se redujo notablemente. De esta forma contrastando la aclimatación de los microorganismos electrogénicos presentes en la biopelícula del electrodo.

Tabla 19.

Valores de Demanda Química de Oxígeno en la fase de aclimatación

CCM	Concentración de DQO(mgO ₂ /L)		Eficiencia (%)
	Afluente	Efluente	
CCM1	1748	183	89.5
CCM2		244	86.0
CCM3		232	86.7
CCM4		191	89.1
CCM5		406	76.8

De la Tabla 19 se graficó la eficiencia de remoción y se obtuvo la Figura 49, en donde se observa que la CCM1 alcanzo valores de remoción de 89.5 %, seguidamente la CCM4 tuvo una diferencia del 0.4 % que la anterior celda. Así mismo la CCM2 con un 86 % y CCM3 86.7 % de remoción tuvieron un comportamiento similar diferenciándose de 0.7 % de la una a la otra. La CCM5 presento un valor mucho menor que las demás celdas.

De esta forma se distingue la influencia que tiene las resistencias externas y el Área superficial Total del electrodo de Grafito ($A_{ST\text{Grafito}}$) en la remoción de la DQO.

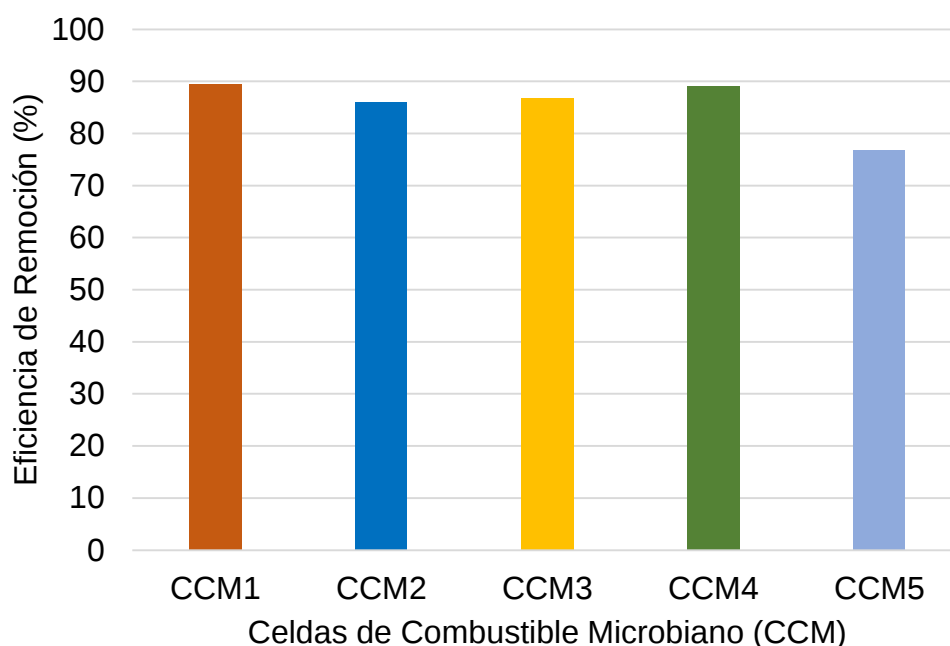


Figura 49. Eficiencia de Remoción en función de la DQO en la fase de aclimatación de las CCM

Con respecto a la comunidad microbiano presente en el ARD, los resultados de la aclimatación nos muestran que existen microorganismos que no solo tienen la capacidad de crecer formando una biopelícula sobre los electrodos (ánodo), sino que existe microorganismo electrogénicos que tienen la capacidad de transferir los electrones desde un sustrato ambiental (agua residual) al ánodo de la CCM, según lo indica Mora y Bravo (2017). Además, Kiely et al. (2011) mencionan que al utilizar el lodo anaerobio para la formación de la biopelícula en los electrodos (ánodo), este tuvo una influencia en la biodegradación de la materia orgánica ya que el lodo anaerobio contiene una alta variedad de comunidades bacterianas incluidas algunas cepas de bacterias electroquímicamente activas.

4.3.1.2. Puesta en marcha. La biodegradación de la materia orgánica en función de la DQO en las diferentes configuraciones de CCM después de la aclimatación, se realizó en 3 réplicas para el tratamiento del agua residual doméstica. Por lo que en cada replica se trabajó con diferentes concentraciones de DQO (p.ej.

para la réplica 1 la concentración de DQO fue de 1853 mgO₂/L, replica 2 con 1341mgO₂/L de DQO y Replica 3 con 1276 mgO₂/L de DQO). Cabe recalcar que cada replica se realizó en diferentes semanas y se sabe que las concentraciones de materia orgánica del agua residual que ingresa a la PTAR Santa Clara, varia con el pasar del tiempo.

La biodegradación de materia orgánica expresada en función de la DQO fue evaluada para 5 CCM de las distintas configuraciones. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 20.

Tabla 20

Remoción de la materia organica en función de la DQO

Replicas	Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Área superficial Total del electrodo Grafito(cm ²)	Concentración de DQO(mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
				Afluente	Efluente	
Replica 1	CCM1	150	151	1853	244	87
	CCM2	50	151		240	87
	CCM3	50	73		264	86
	CCM4	150	73		175	91
	CCM5	100	112		337	82
Replica 2	CCM1	150	151	1341	325	76
	CCM2	50	151		179	87
	CCM3	50	73		268	80
	CCM4	150	73		289	78
	CCM5	100	112		350	74
Replica 3	CCM1	150	151	1276	354	72
	CCM2	50	151		374	71
	CCM3	50	73		317	75
	CCM4	150	73		366	71
	CCM5	100	112		394	69

Al comparar el afluente y efluente del agua residual doméstica, se observa que la DQO redujo notablemente, logrando obtener valores de 175 a 394 mgO₂/L, dicha disminución se debió a la oxidación de la materia orgánica realizada por los

microorganismos presentes en el sustrato y la biopelícula formada en el ánodo. Así mismo, se muestra que la réplica 1, obtuvo la mayor biodegradación, debido que el ARD tenía una concentración de DQO mayor que las demás réplicas, donde los microorganismos electrogenéticos empezaron eficientemente a degradar la materia orgánica y así transferir electrones al electrodo (ánodo) para la generación de bioelectricidad tal como menciona Du et al. (2011).

4.3.1.3. Eficiencia de remoción promedio para DQO. La remoción de la materia orgánica se evaluó para las 5 CCM con diferentes configuraciones. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21.

Remoción promedio de la materia orgánica en función de la DQO

Celdas	Configuración de las Celdas de Combustible Microbiano		Concentración de DQO(mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
	Resistencia (Ω)	Área Superficial Total del electrodo de Grafito(cm ²)	Afluente	Efluente	
CCM1	150	151	1490	307.7	79.4±7.8
CCM2	50	151		264.3	82.3±9.2
CCM3	50	73		283.0	81.0±5.5
CCM4	150	73		276.7	81.4±10.1
CCM5	100	112		360.3	75.5±6.6

De la Tabla 21 resulta la Figura 50 donde se observa que la CCM2 obtuvo una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica con un 82.3 % con respecto a las demás celdas. Así mismo, las CCM4 y CCM3 lograron remover un 81.4 y 81 % respectivamente, sin apreciarse una disminución significativa entre una celda y la otra, estas dos celdas trabajaron con diferentes resistencias externa 150 y 50 ohmios respectivamente, pero con un igual $A_{STGrafito}$ de 73 cm². Así mismo, la CCM1 con una resistencia externa de 150 ohmios y $A_{STGrafito}$ de 151cm² obtuvo un 79.4 % de

eficiencia de remoción, asemejándose en 2 % a la eficiencia de las CCM3 y CCM4. En cambio, en la CCM5 con una configuración de 100 ohm de resistencia externa y 112 cm² de A_{ST}Grafito, se observó una ligera caída en la remoción alcanzando un 75.5 %, aun así, logró remover más del 70 % de la materia orgánica.

La remoción de la materia orgánica que presentaron las CCM se debe a la presencia de consorcios de microorganismos y especialmente los bioelectrogénicos presente en el agua residual y en la biopelícula del electrodo (ánodo) quienes descomponen la materia orgánica, y a la vez donan electrones al electrodo de grafito (ánodo) generando de esta forma bioelectricidad (Du et al., 2011).

Por otro lado con respecto a las resistencias externas utilizadas se observa que la remoción promedio de la materia orgánica expresada en DQO fue de 82, 80 y 76 %, con 50 ohm, 150 ohm y 100 ohm respectivamente, los resultados muestran que operar con resistencias externas más bajas conlleva una mayor remoción de materia orgánica, este resultado se asemeja con investigaciones realizadas por (Jang et al., 2004 y Alzate et al., 2008) donde obtuvieron una eficiencia de remoción de la materia orgánica expresada en DQO de 65 y 82 % con 100 ohm y 600 ohm respectivamente. Así mismo esto se corrobora con, Gonzales et al. (2014) donde menciona que al incrementar la resistencia externa el potencial eléctrico tiende a disminuir, así como también la remoción de materia orgánica.

Finalmente, las CCM operadas en esta investigación fueron capaces de llevar a cabo la biodegradación de la materia orgánica en función de la DQO, donde se obtuvieron porcentajes de remoción mayores al 70 % de eficiencia. Destacando la CCM2 y CCM4 con una mayor eficiencia de remoción frente a las demás celdas. Así mismo la variación de las configuraciones (Resistencia y área superficial del

electrodo) de las CCM nos permitio ver que estas tienen influencia sobre la remocion de la materia organica.

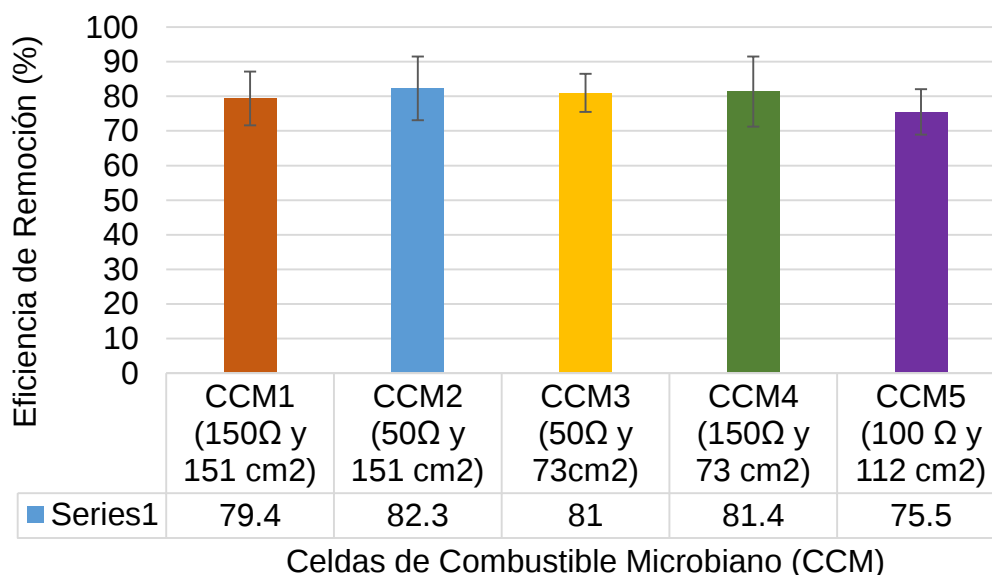


Figura 50.Eficiencia de Remoción promedio en función de la DQO en distintas configuraciones de CCM

4.3.2. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se aplicó para las 5 CCM en sus 3 réplicas de operación.

4.3.2.1. Prueba de Normalidad de Datos

Para facilitar información con altas bases de confiabilidad de la normalidad de datos se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, ya que es utilizada para comprobar si los datos fueron extraídos de una muestra normal y de un muestreo aleatorio; en esta prueba los parámetros a evaluar son la media y la desviación típica; dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas, las cuales son menores de 50 muestreos ($n < 50$).

En la Tabla 22 se observa que el P-Valor de Shapiro- Wilk para el afluente es de 0.197 siendo mayor que el P-valor (0.05); Así mismo el P-Valor de Shapiro Wilk para los efluentes de las 5 CCM son 0.491 CCM1, 0.593 CCM2, 0.130 CCM3, 0.787 CCM4 y 0.340 CCM5 respectivamente siendo mayor que el P-valor (0.05). Además,

en el gráfico de Normal P-Plot (Figura 51 y 52) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del parámetro DQO siguen una distribución normal.

Tabla 22

Normalidad de Datos mediante la prueba de Shapiro - Wilk para el parámetro DQO

Variable dependiente (mgO ₂ /L)	P-valor (afluente)	Pcal-Valor (efluente)	Nivel de Significancia >(α) 0.05
DQO	0.197	CCM1 0.491	>0.05
	0.197	CCM2 0.593	>0.05
	0.197	CCM3 0.130	>0.05
	0.197	CCM4 0.787	>0.05
	0.197	CCM5 0.340	>0.05

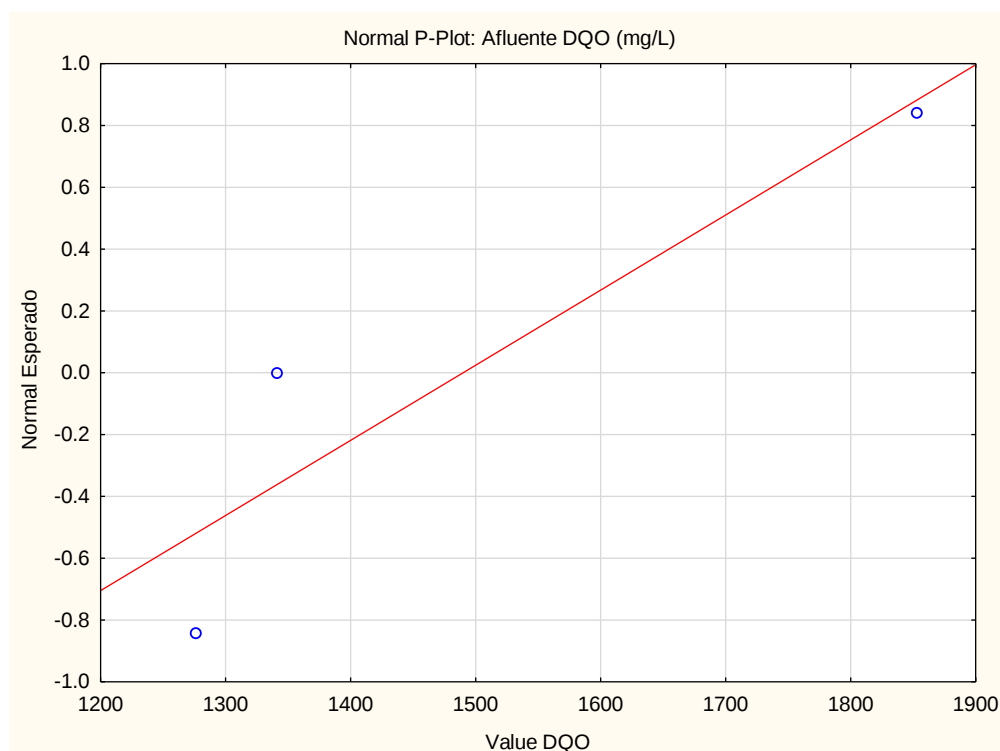


Figura 51. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO Afluente.

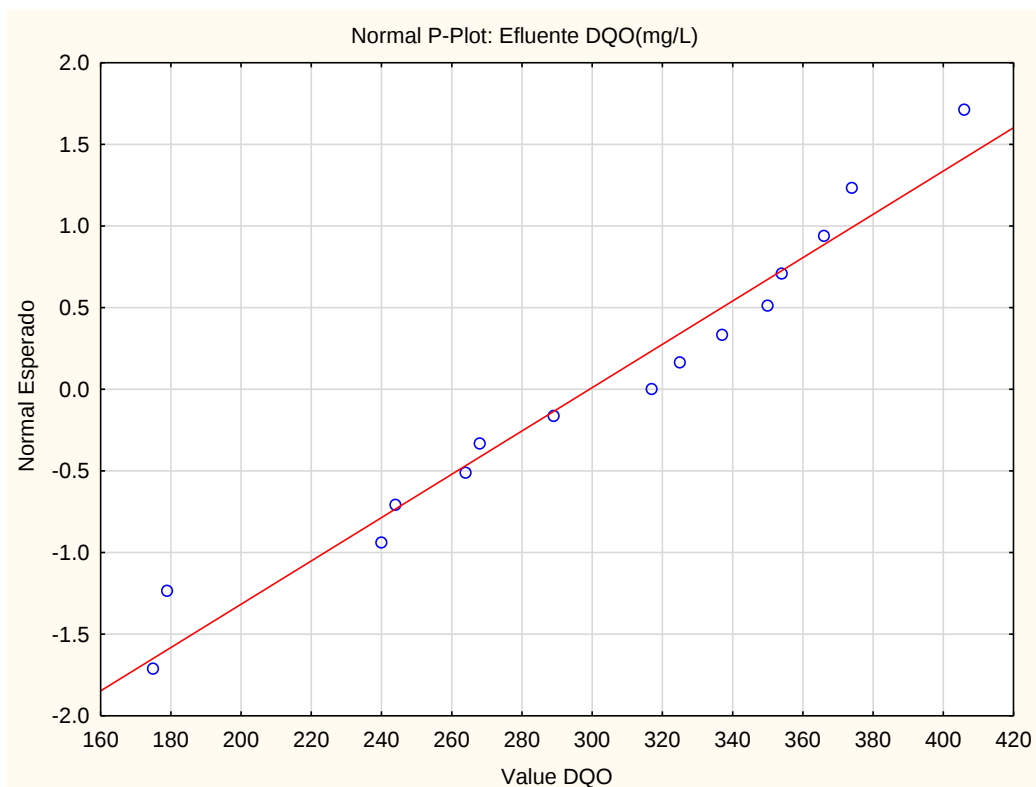


Figura 52. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO Efluente.

4.3.2.2. Análisis de T- STUDENT. Después de haber determinado que los datos de la DQO tienen una distribución normal, se pasó a realizar el análisis de diferencia de medias y *T-student* para muestras relacionadas.

Decisiones de la Estadística utilizando STATISTICA. Los resultados de la Tabla 23, muestran que la DQO antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un promedio de 1490 mgO₂/L y una variabilidad de 316. Sin embargo, después que el Agua Residual Domestica (ARD) paso por el proceso de tratamiento en las 5 Celdas de Combustible Microbiano (CCM), presento resultados favorables con un promedio de 307.7 mgO₂/L para la CCM1, 264.3 mgO₂/L CCM2, 283.0 mgO₂/L CCM3, 276.7 mgO₂/L CCM4 y 364.3 mgO₂/L CCM5, mostrando así que el sistema de CCM tuvo una eficiencia de remoción > 70 % de DQO en promedio, demostrando su efectividad en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tabla 23

Análisis de comparación de medias del parámetro DQO

Variable dependiente (mgO ₂ /L)	Media Antes (afluente)	* N	Desviación tip.	Error de media	Media Después(Efluente)	*N	Desviación tip.	Error de media	
DQO	1490	3	316.0	182.5	CCM1	307.7	3	57.0	32.9
					CCM2	264.3	3	99.8	57.6
					CCM3	283.0	3	29.51	17.0
					CCM4	276.6	3	96.1	55.5
					CCM5	364.3	3	36.7	21.2

Nota: *N: número de muestras

La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la DQO antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante las CCM se distingue notablemente con el promedio alcanzado después del tratamiento; Además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que “sig.” quien vendría ser el P-calculado es menor (0.032 CCM1, 0.028 CCM2, 0.025 CCM3, 0.036 CCM4 y 0.030 CCM5PC) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la materia orgánica en función a la DQO fue removido por el sistema de tratamiento mediante las Celdas de Combustible Microbiano (ver Tabla 24).

Tabla 24

Prueba de T-Student de muestras relacionadas del parámetro DQO

Variable Dependiente(DQO mgO ₂ /L)		Diferencias relacionadas							
Antes (Afluente)	Después (Efluente)	Media	Desviación estándar	Error de la media	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	P-Valor (bilateral) (<0.05)
					Inferior	Superior			
Afluente	CCM1	1182.3	372.5	215.1	257.0	2107.7	5.5	2	0.03
Afluente	CCM2	1225.6	359.8	207.7	331.9	2119.3	6.9	2	0.02
Afluente	CCM3	1207.0	335.7	193.8	373.1	2040.9	6.2	2	0.02
Afluente	CCM4	1213.3	409.6	235.9	198.2	2228.4	5.1	2	0.03
Afluente	CCM5	1125.7	343.4	198.3	272.6	1978.7	6.7	2	0.03

Por otro lado, en la Figura 53, se presenta las gráficas de box-plot donde se muestra claramente la diferencia de concentración de DQO del afluente y la disminución de la concentración de DQO luego del tratamiento reflejado en los datos del efluente.

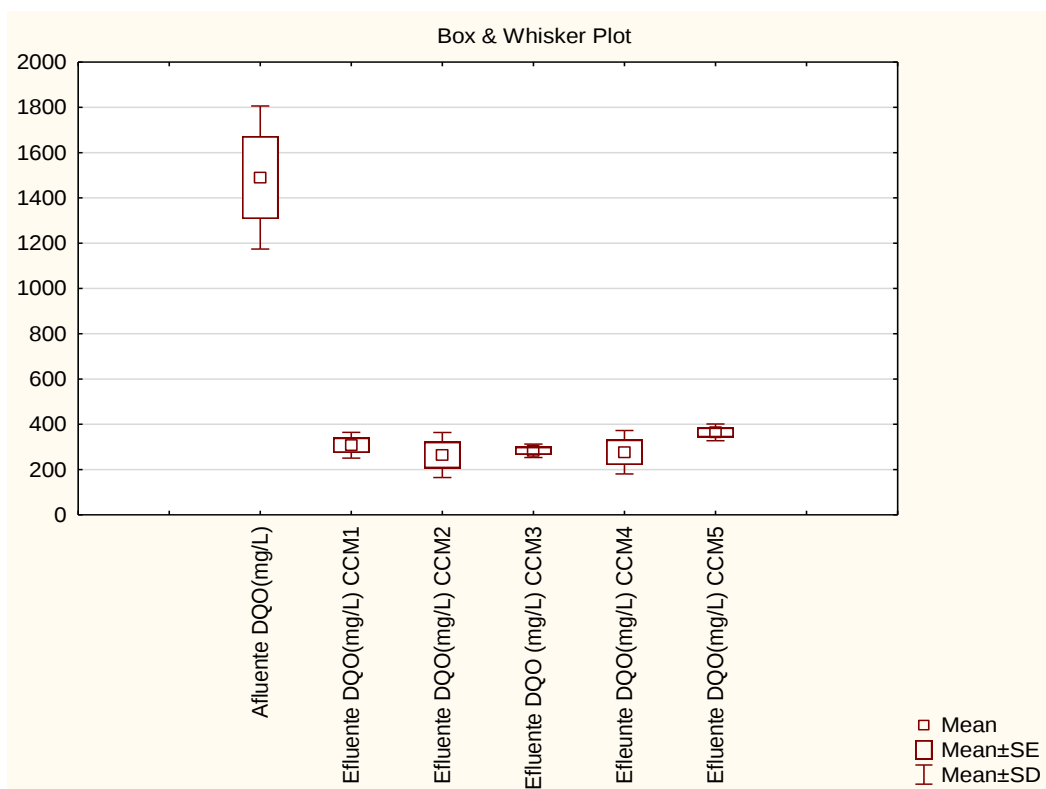


Figura 53. Diagrama de Bloques, para el parámetro de la DQO

4.3.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual domestica proveniente de la PTAR Santa Clara, se observa que los valores de concentración de DBO_5 oscila de 726 a 1059 mgO_2/L , considerado así como un agua residual de tipo fuerte, de acuerdo a la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (2014). Así mismo, según esta clasificación el valor medio de la DBO_5 de un agua residual típica se encuentra en 220 mgO_2/L , excediendo a este valor más del doble.

4.3.3.1. Aclimatación. Antes de la operación de las 5 CCM estas fueron aclimatadas con el agua residual domestica de la PTAR Santa Clara durante 9 días, logrando así la remoción de la materia orgánica. En la Tabla 25 se muestran los resultados de DBO obtenidos en la aclimatación, donde se observa una concentración de 808 mgO_2/L al ingreso (afluente) de las 5 CCM y como resultado en el efluente, la

DBO se redujo notablemente. De esta forma contrastando la aclimatación de los microorganismos electrogénicos presentes en la biopelícula del electrodo.

Tabla 25

Valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno en la fase de aclimatación

CCM	Concentración de DBO ₅ (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
	Afluente	Efluente	
CCM1	808	104	87.1
CCM2		139	82.8
CCM3		132	83.7
CCM4		109	86.5
CCM5		224	72.2

De la Tabla 25 resulta la Figura 54 donde se observa que todas las CCM, presentaron una eficiencia de remoción mayor al 70 %. Así mismo, se observa que la CCM1 alcanzo valores de remoción de un 87.1 %, seguidamente de la CCM4 quien obtuvo una diferencia del 0.6 % que la anterior celda. En tanto la CCM3 con 83.7 % y CCM2 al 82.8 % de remoción tuvieron un comportamiento casi similar, diferenciándose de un 0.9 % de la una a la otra. No obstante, la CCM5 presento un valor menor que las demás celdas.

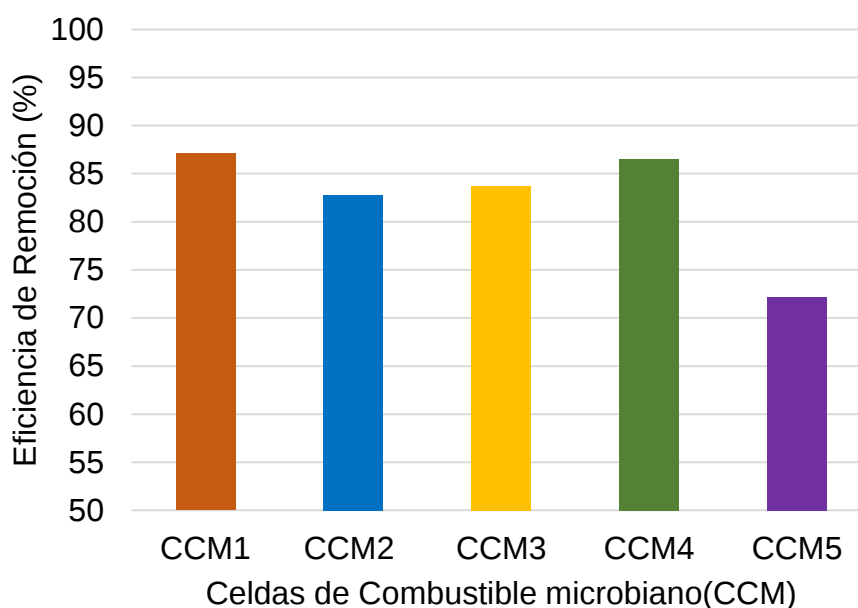


Figura 54. Eficiencia de Remoción en función de la DBO_5 para las distintas configuraciones de CCM.

4.3.3.2. Puesta en Marcha. Pasado la aclimatación se empezó con el tratamiento del agua residual mediante las diferentes configuraciones de Celdas de Combustible Microbiano (CCM). En donde se realizó 3 réplicas para el tratamiento del ARD. Por lo que, cada replica trabajó con diferentes concentraciones de DBO_5 (p.ej. para la réplica 1 concentración de DBO_5 fue $1059 \text{ mgO}_2/\text{L}$, replica 2 con $817 \text{ mgO}_2/\text{L}$ y replica 3 con $726 \text{ mgO}_2/\text{L}$). Cabe recordar que cada replica se realizó en diferentes semanas y se sabe que las concentraciones de materia orgánica del agua residual que ingresa a la PTAR Santa Clara, varía con el pasar del tiempo.

La remoción de materia orgánica biodegradable expresada como DBO_5 , fue evaluada para 5 CCM de distintas configuraciones. Los resultados del afluente y efluente obtenidos se expresan en la Tabla 26.

Tabla 26

Remoción de la materia organica en función de la DBO₅

Replicas	CCM	Resistencia (Ω)	Área Superficial Total del electrodo de Grafito(cm ²)	Concentración de DBO ₅ (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
				Afluente	Efluente	
Replica 1	CCM1	150	151	1059	140	87
	CCM2	50	151		138	87
	CCM3	50	73		152	86
	CCM4	150	73		99	91
	CCM5	100	112		193	82
Replica 2	CCM1	150	151	817	185	77
	CCM2	50	151		101	88
	CCM3	50	73		154	81
	CCM4	150	73		165	80
	CCM5	100	112		199	76
Replica 3	CCM1	150	151	726	201	72
	CCM2	50	151		214	71
	CCM3	50	73		181	75
	CCM4	150	73		209	71
	CCM5	100	112		230	69

En la Tabla 26, se presenta los resultados de biodegradación de la DBO₅ obtenidos en la operación de cada una de las CCM. Al comparar el afluente y efluente del agua residual doméstica, se observa que la DBO₅ se redujo notablemente, logrando obtener valores de 99 a 224 mgO₂/L, y mostrando una eficiencia de remoción de 69 a 91 %. Además, se muestra que la réplica 1, obtuvo la mayor biodegradación, debido que los microorganismos electrogénicos estuvieron aclimatados y eficientemente empezaron a degradar la materia orgánica y así transferir electrones al electrodo (ánodo) para la generación de bioelectricidad tal como menciona Du et al. (2011).

4.3.3.3. Eficiencia de Remoción promedio para la DBO₅.

La remoción promedio de la materia orgánica biodegradable expresada como DBO₅ fue evaluada para las 5 CCM. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 27.

Tabla 27

Remoción promedio de la materia organica en función de la DBO₅

Celdas de Combustible Microbiano			Concentración de DBO ₅ (mgO ₂ /L)		Eficiencia de Remoción (%)
Celdas	Resistencia (Ω)	Área Superficial del electrodo de Grafito (cm ²)	Afluente	Efluente	
CCM1	150	151	867	175	79.8±7.6
CCM2	50	151		151	82.6±9.5
CCM3	50	73		162	81.3±5.5
CCM4	150	73		158	81.8±10
CCM5	100	112		207	76.1±6.5

Se grafica las eficiencias de remoción en la Tabla 27 y resulta la Figura 55. Donde la CCM2 a resistencia de 50 ohm y área superficial de electrodo 151 cm² reporto una remoción de 82.6 %, seguida por la CCM4 y CCM3 quienes presentan una leve disminución de 0.5 % de la una a la otra, teniendo un A_{ST}Grafito similares (73 cm²) y diferentes resistencias externas (150 y 50 ohm) respectivamente. Para la CCM1 se obtuvo una remoción de 79.8 % bajando así la eficiencia en un 3 % en promedio, la tendencia siguió bajando en la CCM5 removiendo un 76.1 %, es decir 5 % menor que las CCM4 y CCM3.

Estas eficiencia de remoción se debe a la presencia de consorcio de microorganismos y especialmente los bioelectrogénicos presente en el agua residual y en la biopelícula del electrodo (ánodo) quienes descomponen la materia orgánica, y a la vez donan electrones al electrodo de grafito (ánodo) generando de esta forma bioelectricidad (Du, Li y Gu, 2011).

Por otro lado con respecto a las resistencias externas utilizadas se observa en la Tabla 26 la remoción promedio de la materia orgánica expresada en DBO₅ fue de 82, 81 y 76 % con 50 ohm, 150 ohm y 100 ohm respectivamente, los resultados muestran que operar con resistencias externas más bajas conlleva una mayor remoción de materia orgánica, este resultado se asemeja con investigaciones realizadas por (Jang et al, 2004 y Alzate et al., 2008) donde ellos obtuvieron una eficiencia de materia orgánica expresada en DQO fue de 65 y 82 % respectivamente con 100 y 600 ohm.

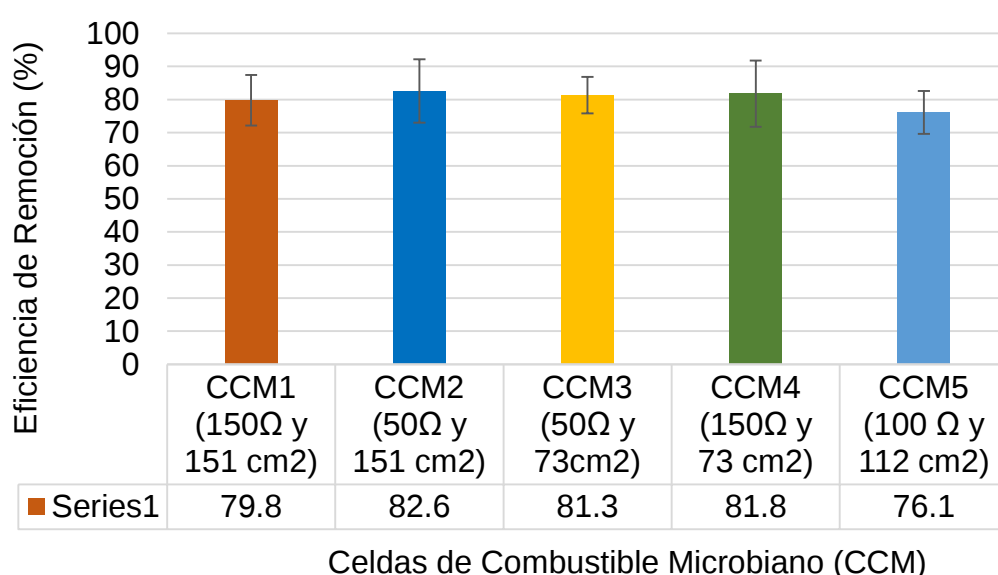


Figura 55. Eficiencia de Remocion en funcion de la DBO₅ a distintas configuraciones de CCM.

4.3.4. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se aplicó para las 5 CCM y sus 3 réplicas.

4.3.4.1. Prueba de Normalidad de Datos. Para proveer información con altas bases de confiabilidad de la normalidad de datos se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, ya que es utilizada para comprobar si los datos fueron extraídos de una muestra normal y de un muestreo aleatorio; en esta prueba los parámetros a evaluar

son la media y la desviación típica; dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas las cuales son menores de 30 muestreos ($n < 30$).

En la Tabla 28 se observa que el P-Valor de Shapiro-Wilk para el afluente es de 0.511 siendo mayor que el P-valor de 0.05. Así mismo, el P- Valor de Shapiro Wilk para los efluentes de las 5CCM son CCM1-0.488, CCM2-0.624, CCM3-0.118, CCM4-0.780 y CCM5-0.290 respectivamente. Además, en el gráfico de Normal P-Plot (Figura 56 y 57) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del parámetro DBO_5 siguen una distribución normal.

Tabla 28

Normalidad de datos mediante la prueba de Shapiro- Wilk para el parámetro DBO_5

Variable dependiente	P-valor (afluente)	P-Valor (efluente)	Nivel de Significancia $>(\alpha) 0.05$
DBO_5	0.511	CCM1 0.488	>0.05
	0.511	CCM2 0.624	>0.05
	0.511	CCM3 0.118	>0.05
	0.511	CCM4 0.780	>0.05
	0.511	CCM5 0.290	>0.05

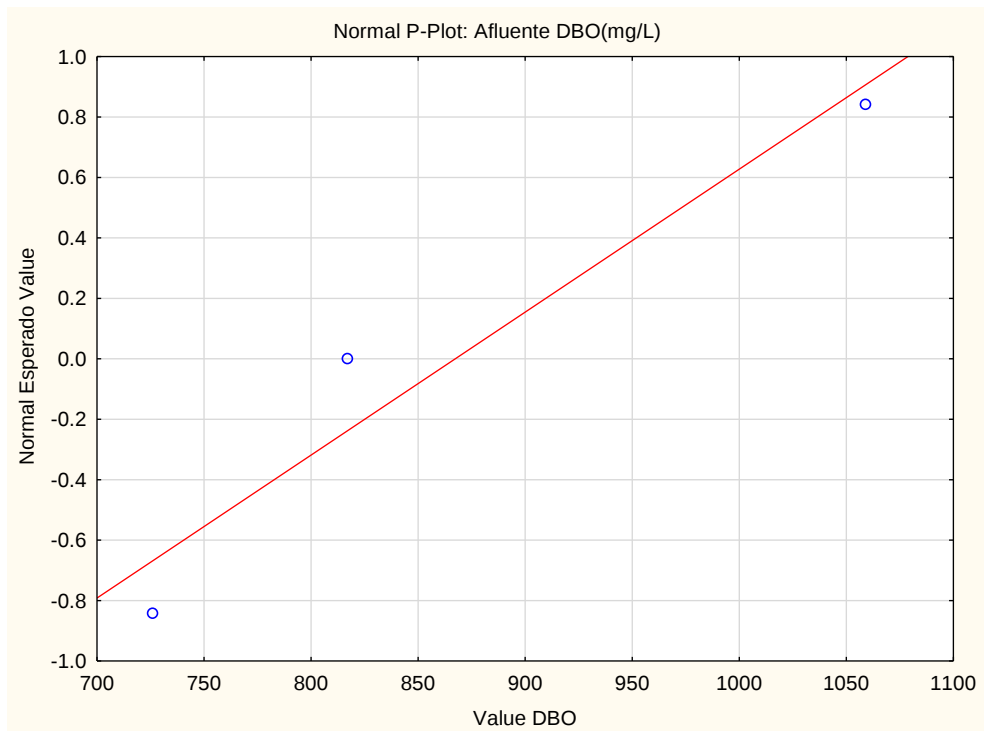


Figura 56. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO₅ Afluyente

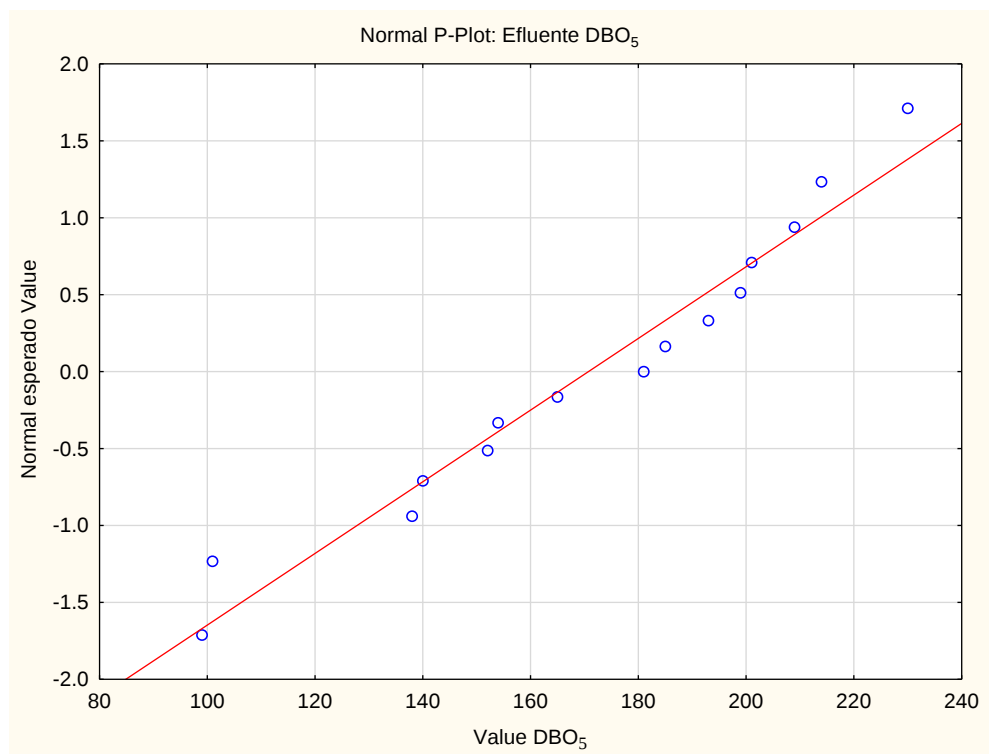


Figura 57. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO Efluente

4.3.4.2. Análisis de T- STUDENT. Como ya se determinó que los datos de la DBO₅ tienen una distribución normal, en primer lugar, se pasó a realizar el análisis de diferencia de medias y T-student para muestras relacionadas.

Decisiones de la Estadística utilizando software STATISTICA. Los resultados de la Tabla 29, muestran que la DBO₅ antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un promedio de 867.3 mgO₂/L y una variabilidad de 172.1. Sin embargo, después que el Agua Residual Domestica (ARD) paso por el proceso de tratamiento en las 5 Celdas de Combustible Microbiano (CCM), presento resultados favorables con un promedio de 175.3 mgO₂/L para CCM1, 151.0 mgO₂/L CCM2, 162.3 mgO₂/L CCM3, 157.7 mgO₂/L CCM4 y 207.3 mgO₂/L CCM5, demostrando así que el Sistema de Celdas de Combustible Microbiano (CCM) tuvo una eficiencia de remoción > 70 % de DBO₅ en promedio, demostrando su efectividad en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tabla 29

Análisis de comparación de medias del parámetro DBO₅

Variable dependiente (mgO ₂ /L)	Media (afluente)	N	Desviación Tip.	Error de media	Media (Efluente)	N	Desviación tip.	Error de media
DBO ₅	867.3	3	172.1	99.36	CCM 1 175.3	3	31.63	18.26
	867.3				CCM 2 151.0	3	57.61	33.26
	867.3				CCM 3 162.3	3	16.19	9.35
	867.3				CCM 4 157.7	3	55.36	31.96
	867.3				CCM 5 207.3	3	19.85	11.46

La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la DBO₅ antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante las CCM se distingue notablemente con el promedio alcanzado después del tratamiento; Además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que “sig.” que vendría ser el P-calculado es menor (0.028 CCM1, 0.026 CCM2, 0.022 CCM3, 0.032 CCM4 y 0.026 CCM5) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la DBO₅ fue removido por el sistema de tratamiento mediante las Celdas de Combustible Microbiano (ver Tabla 30).

Tabla 30

Prueba de T-Student de muestras relacionadas del parámetro DBO₅

Variable Dependiente (DBO5 mgO ₂ /L)		Diferencias relacionadas					t	gl	P-valor. (bilateral)
Antes (Afluente)	Después (Efluente)	Media	Desviación estándar	Error de la media	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Afluente	CCM1	692.0	203.7	117.6	185.9	1198.1	5.9	2	0.02
	CCM2	716.3	204.5	118.1	208.3	1224.3	6.1	2	0.02
	CCM3	705.0	184.6	106.6	246.4	1163.6	6.6	2	0.02
	CCM4	709.6	227.1	131.1	145.6	1273.7	5.4	2	0.03
	CCM5	660.0	188.5	108.8	191.6	1128.4	6.1	2	0.02

Por otro lado, en la Figura 58, se presenta las gráficas de box-plot donde se muestra claramente la diferencia de concentración del DBO₅ del afluente y la disminución de la concentración de DBO₅ luego del tratamiento reflejado, en los datos del efluente.

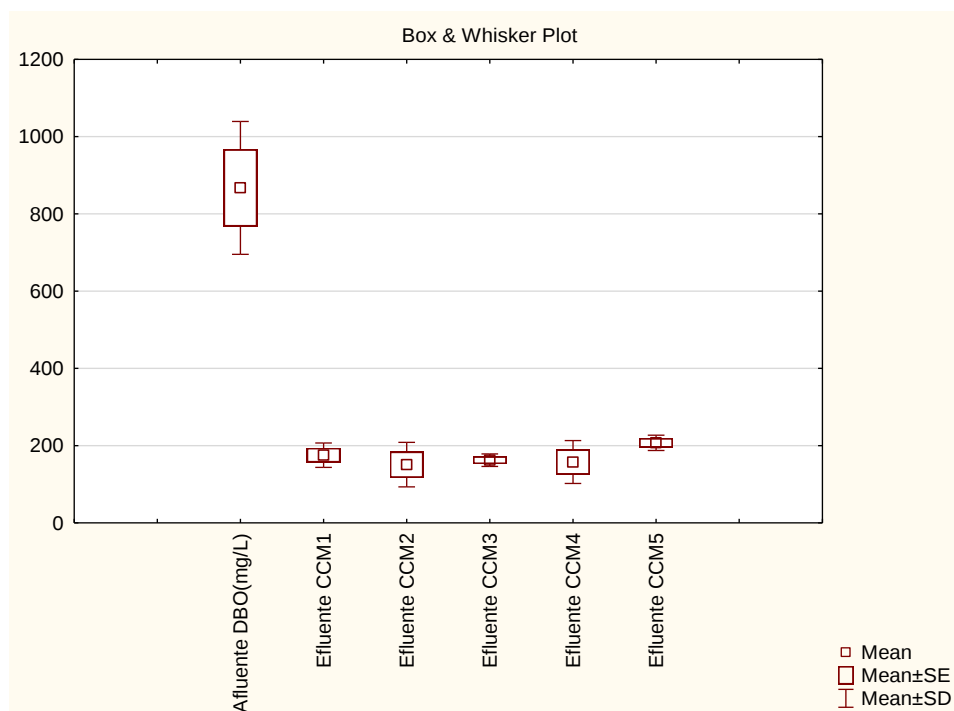


Figura 58. Diagrama de Bloques, para el parámetro de DBO₅

4.3.5. Análisis de Biodegradabilidad entre Afluente y Efluente

En la Tabla 31, se puede observar que la biodegradabilidad promedio del efluente aumento respecto al afluente en todas las configuraciones de las CCM. Esto se debe a la presencia de poblaciones microbianas en la cámara anódica quienes utilizan el agua residual como alimento y fuente de energía para su metabolismo y reproducción (Hernández, 1992). Sin embargo, según Osorio y Peña (2002) mencionan que la biodegradabilidad no es una propiedad neta de las aguas residuales, sino que depende de la población microbológica a la que se enfrente. A mayor población microbiana, mayor podría ser la biodegradabilidad.

Tabla 31

Biodegradabilidad del agua residual después del tratamiento

Celdas de Combustible Microbiano			Biodegradabilidad(DBO ₅ /DQO)	
	Resistencia (Ohm)	Área Superficial Total del electrodo de Grafito (cm ²)	Afluente(entrada)	Efluente(Salida)
CCM1	150	151	0.58	0.570
CCM2	50	151	0.58	0.571
CCM3	50	73	0.58	0.574
CCM4	150	73	0.58	0.570
CCM5	100	112	0.58	0.575

4.3.6. Remoción Total Obtenida

La biodegradación de la materia orgánica fue expresada en función de DQO y DBO₅, donde la DQO corresponde a todo el material orgánico e inorgánico tanto soluble como particulado susceptible de oxidación química y la DBO₅ representa el contenido orgánico biodegradable soluble y particulado.

En la Figura 59, se grafica las tendencias promedio de las remociones de los parámetros DQO y DBO₅ para las 5 configuraciones de CCM. Estos parámetros representan la remoción de la carga orgánica del agua residual doméstica. Como se observa en la gráfica, existe una relación entre ambos parámetros. Las eficiencias logradas en las 5 CCM son satisfactorias porque, removieron más del 70 % de la materia orgánica. Cabe destacar que la CCM2 tuvo mayor remoción con respecto a las demás celdas con valores de 82.3 % de DQO y 82.6 % de DBO₅. Sin embargo, la CCM4 con 81.4 % DQO y 81.8 % DBO₅ se asemeja a los resultados obtenidos por la CCM2 y seguidamente por la CCM4 quien tuvo una similar reducción con la CCM3.

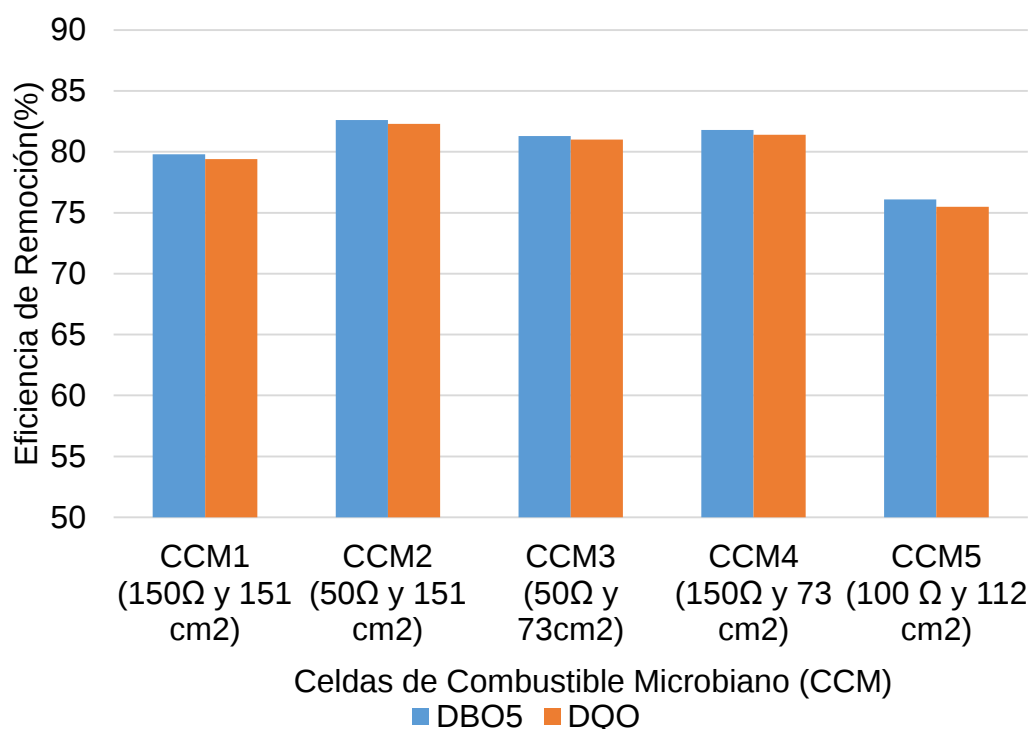


Figura 59. Eficiencia de Remoción Total de la Materia orgánica (DQO y DBO₅) presente en el Agua residual Domestica para las 5 configuraciones de las CCM

En los resultados obtenidos se observa que las CCM son auto sostenibles y este es un parámetro que puede corresponder a las complejas interacciones de las comunidades microbianas, y no solo a las bacterias que son parte de la biopelícula, sino a bacterias que no son parte de la biopelícula, porque estos desempeñarían un papel importante al degradar sustratos complejos en compuestos fácilmente metabolizables por los microorganismos electrogénicos (Pant et al., 2010).

Además, mediante el cálculo de la eficiencia de remoción (DQO y DBO₅) se demuestra la eficiencia de las 5 CCM, obteniendo valores promedios entre 75.5 a 82.3 % en DQO y 76.1 a 82.6 % para la DBO₅ en donde estos valores son significativamente altos, y que a su vez estaría demostrando el potencial de remoción de la materia orgánica que tienen estos sistemas. Según Pant et al. (2010) indica que esto se debe a las complejas interacciones entre los consorcios microbianos

presentes en la biopelícula del electrodo; Sin embargo, el potencial de biodegradación que posee este sistema estaría relacionado también con el metabolismo de todos los microorganismos presentes en el agua residual (Du et al., 2011). Por otro lado, Huggins et al. (2013) indican que la presencia de los electrodos puede actuar como catalizador y estimular el aumento de la tasa de degradación de la materia orgánica.

También se observa que los valores de DBO son ligeramente mayores que la DQO. Esto se corrobora con los estudios realizados por (Grady, Daigger y Lim, 1999) donde mencionan que no toda la materia orgánica en un agua residual puede degradarse biológicamente, puesto que las remociones de DQO son típicamente más bajas que las de la eliminación de DBO.

Con el fin de comparar la eficiencia de remoción de materia orgánica obtenida en esta investigación, en la Tabla 32, se describió algunas de las investigaciones realizadas en CCM y porcentajes de reducción de DQO y DBO. Para realizar la comparación se realizó una búsqueda de referentes bibliográficas con condiciones similares de operación a las CCM implementada. De estos valores se observa que el agua residual (afluentes) obtenidos en este estudio excede en más del doble a la concentración promedio de los antecedentes mostrados, Sin embargo, se logró alcanzar remociones similares o altos a las obtenidas con sustratos mucho menos complejos, a pesar que ellos utilizaron otro tipo de electrodos, diferentes membranas de intercambio protónico, residencias eternas, sustratos, concentración de DQO y DBO y tiempos de retención.

Tabla 32

Resultados de investigación realizadas en CCM Vs porcentajes de reducción de la DQO y DBO

Configuración de CCM(sistema Beth)	Sustrato Empleado	Volumen Concentración	% Reducción DQO o DBO	Tiempo (Horas o Días)	Referencia
Una Cámara	Agua Residual con glucosa	2.5 L(555.1 mgO ₂ /L)	71 % DBO	30 días	(Mora y Bravo, 2017)
Una Cámara	Lactosa	600 mL	89.1 % DQO	1824 horas	(Wang, Yun-Kun y al., 2014)
Doble cámara	Glucosa	22mL(158.4 mgO ₂ /L)	79 % DQO	15 días	(Min y Logan,2004)
Cámara Doble	Glucosa(cable de cobre) puente salino	1440 mL(980 mgO ₂ /L)	80 % DQO	9 días	(Kargi et al., 2007)
Cámara Doble	Agua residual Sintética (barra de grafito) MIP NAFIÓN	1300(780.4 mgO ₂ /L)	90 % DQO	7 días	(Jadhay y grangrekar, 2009)
Cámara Doble Tipo H	Agua residual Domestica(Barra de grafito) puente salino	1.6 L (1490 mgO ₂ /L y 860 mgO ₂ /L)	82%DQO y 83% DBO	9 días	Esta Investigación

4.3.7. Comparación de los valores DQO y DBO post tratamiento con la normativa

En la Tabla 33 y 34 se presenta los valores de DQO y DBO respectivamente en comparación con las normativas, Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Domésticas o

Municipales y con los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Tabla 33

Parametro de DQO post tratamiento en comparación con la Normativa

Configuración de las Celdas de Combustible Microbiano			Concentración de DQO(mgO ₂ /L)			
Celdas	Resistencia (Ω)	Área Superficial Total del electrodo de Grafito(cm ²)	Afluente	Efluente	Valores LMP	Valores VMA
CCM1	150	151		307.7		
CCM2	50	151		264.3		
CCM3	50	73	1490	283	200	1000
CCM4	150	73		276.7		
CCM5	100	112		360.3		

*LMP. Limites Maximos Permisibles

*VMA. Valores Maximos Admisibles

Tabla 34

Parametro de DBO post tratamiento en comparación con la Normativa

Celdas de Combustible Microbiano			Concentración de DBO ₅ (mgO ₂ /L)			
Celdas	Resistencia (Ω)	Área Superficial del electrodo de Grafito (cm ²)	Afluente	Efluente	Valores LMP	Valores VMA
CCM1	150	151		175		
CCM2	50	151		151		
CCM3	50	73	867	162	100	500
CCM4	150	73		158		
CCM5	100	112		207		

*LMP. Limites Maximos Permisibles

*VMA. Valores Maximos Admisibles

Al comprar las medias el Decreto supremo N° 003-2010-MINAM quien aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Domésticas o Municipales, se observa que

las medias del efuente para el parámetro DQO y DBO obtenidas después de pasar por el sistema de tratamiento Celdas de Combustible Microbiano no se encuentran dentro de los parametros establecidos por la normativa, por lo que no pueden ser descargados a un cuerpo receptor, ya que requiere un previo tratamiento. Así mismo es relevante mencionar que el tratamiento anaeróbico de aguas residuales es eficiente en la remoción de la materia orgánica, pero es necesario un post tratamiento que le permita cumplir con las concentraciones establecidas por la normativa, en donde se elimine los sólidos suspendidos y nutrientes, lo cual es conseguido con el tratamiento aerobio (Lagunas de oxidación, lagunas y entre otros) (Rodríguez, 2009).

Sin embargo, las concentraciones iniciales de DQO y DBO del Agua Residual Domestica (afluente) presentaron concentraciones elevadas de materia organica, asemejandose a un Agua Residual de tipo Industrial. Al comparar los valores de DQO y DBO del afluente de las 5 CCM con el “Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA: Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario” se observa que estos valores se encuentran por debajo de las concentraciones establecidas por la normativa, siendo para DQO (264 a 360 mg/L) y DBO (151 a 207 mg/L). Corroborando así que las Celdas de Combustible Microbiano es un sistema óptimo para la biodegradación de la materia organica.

4.3.8. Relación de la biodegradación de la materia organica y la bioelectricidad

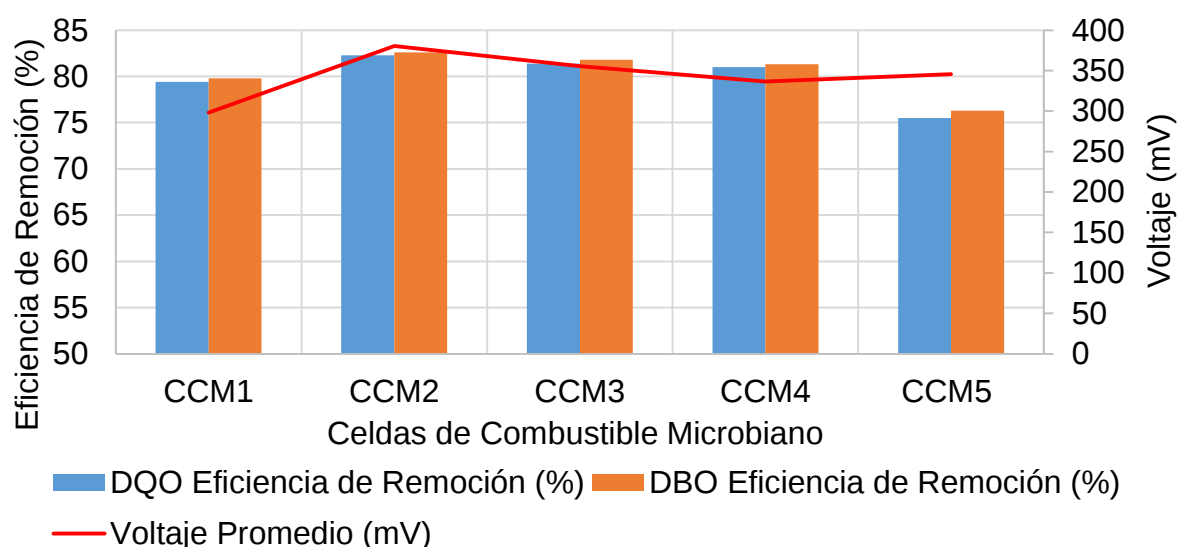


Figura 60. Relación de la biodegradación y la bioelectricidad.

En la Figura 60 se muestra la relación entre la eficiencia remoción de la materia orgánica y el voltaje, donde se observa que estas van directamente relacionadas. Asimismo se observa que la CCM2 fue quien presentó una mayor remoción de la materia orgánica en función de DQO (82.3 %) y DBO₅ (82.6 %) y simultáneamente un mayor voltaje (380.4 mV) sin una gran diferencias con respecto a las demás Celdas.

Esta relación se debe según Liu y Logan (2004) a medida que los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el sustrato, esta a la vez donan electrones al electrodo (ánodo), de esta manera generar bioelectricidad.

4.4. Desempeño electroquímico de las Celdas de Combustible Microbiano (CCM)

4.4.1. Aclimatación de las Celdas de Combustible Microbiano

La aclimatación se realizó para que el microorganismo electrogénicos adheridos en el electrodo pueda aclimatarse al sustrato y también las bacterias

presentes en la misma agua residual. Del mismo modo se realizó esta fase para demostrar, que efectivamente las celdas de combustible microbianas usadas en la investigación generan bioelectricidad a partir de la transformación del agua residual y no simplemente por una reacción electroquímica. Para ello se midió el voltaje generando a cada una de las CCM por un tiempo de 180 horas.

En la Figura 61 podemos observar el comportamiento de voltaje de las CCM en la fase de aclimatación. Cuando las CCM fueron inoculadas con el agua residual hubo una fase de latencia de 30 horas, seguida de un rápido incremento en el voltaje en las siguientes horas alcanzando un voltaje máximo de 387.2 mV CCM2, 308 mV CCM1, 307 mV CCM3, 310 mV CCM4 y 352 mV CCM5, posteriormente el voltaje se mantuvo en una etapa oscilatoria y disminuyendo debido a que la materia orgánica contenida en el sustrato fue consumida gradualmente.

Por otro lado, con respecto a la biopelícula, se observó que los electrodos se colonizaron paulatinamente pasado una semana de aclimatación se notó una biopelícula sobre el ánodo mucho más visible. En general, cuando las CCM fueron inoculadas con agua residual doméstica, se espera que las únicas bacterias en proliferar sean los electrogénicos. Sin embargo, como menciona Mora y Bravo (2017) al realizar el análisis de las comunidades de microorganismos en la biopelícula formada en el ánodo, no se han encontrado resultados en bibliografía de una sola bacteria dominante, sino de un consorcio, lo que sugiere que existe diversas bacterias que tienen las propiedades similares que los electrogénicos, que pueden contribuir a la generación de bioelectricidad. Estos autores trabajaron con un agua residual doméstica donde encontraron, formas que se asemejan a bacilos ($2.33 - 2.83 \mu\text{m} \times 10.71 \mu\text{m}$), cocobacilos ($1.33 - 1.5 \mu\text{m} \times 0.7 \mu\text{m}$) y cocos ($1.1 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m}$) entre otros.

Pueda ser que este tipo de bacterias también se hayan formado en la biopelícula del electrodo.

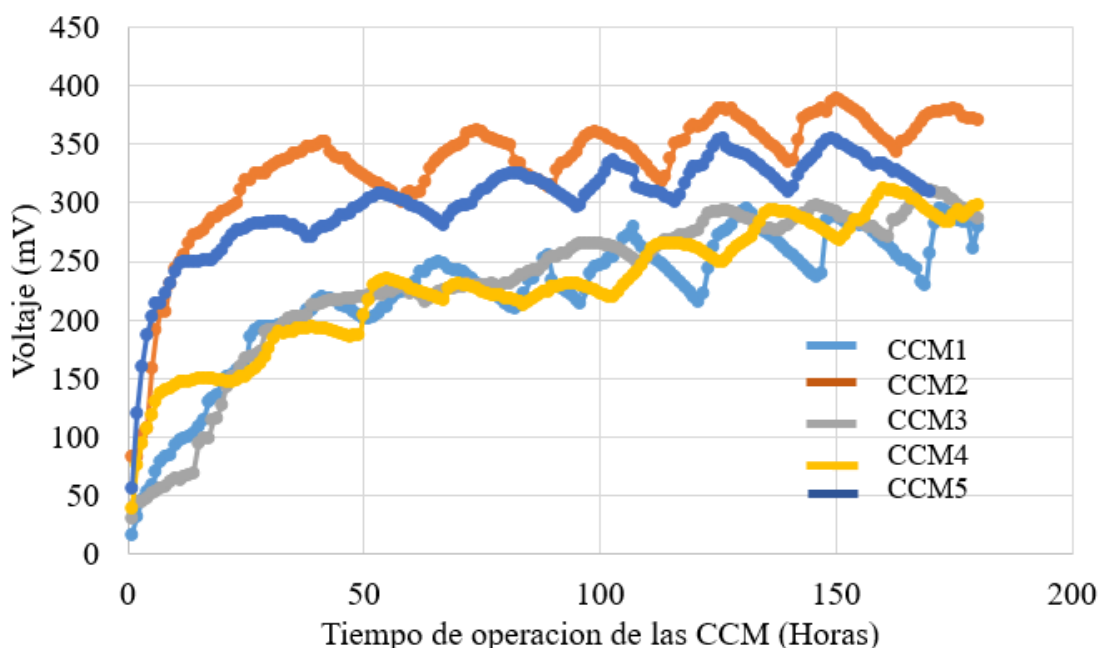


Figura 61. Comportamiento del voltaje en la fase de aclimatación

4.4.2. Generación de bioelectricidad en la fase de operación

Las Celdas de Combustible Microbiano (CCM) fueron operadas por 27 días (9 días por cada replica) donde se monitoreo el comportamiento eléctrico de cada una de las CCM. Cada una de las CCM fue alimentada exclusivamente con Agua Residual Domestica de la PTAR Santa Clara, sin realizar cambios al sustrato.

La generación del potencial eléctrico, se obtuvo a partir de la medición de voltaje (mV) en el conductor externo que está conectado a una resistencia entre el ánodo y el cátodo mediante el Multímetro PR-36 a tiempo real (Ver Figura 62), de la cual se derivó los cálculos de intensidad de corriente eléctrica (mA), potencia (mW), densidad de Potencia por unidad de Área (mW/cm^2), y Eficiencia Coulombica (EC), estos son parámetros necesarios para la caracterización electroquímica de la Celda de Combustible Microbiano (Logan y Rabaey, 2012).



Figura 62. Monitoreo de las CCM y medición de voltaje con el Multímetro digital PRASEK PREMIUM PR-36

4.4.3. Voltaje

4.4.3.1. Voltaje Registrado durante la Operación. Los resultados experimentales muestran que las 5 CCM pueden generar bioelectricidad expresada en Voltaje (mV) empleando como sustrato al Agua Residual Doméstica (ARD), el cual constituye el combustible para generar energía y las bacterias presentes en la misma como inóculo (Liu et al., 2009). Estudios preliminares han demostrado que la alimentación de la CCM con agua residual, es favorable para una colonización satisfactoria de bacterias generadoras de electricidad y como consecuencia a esto, la generación de energía debido a la transferencia de electrones (Buitrón y Perez, 2011).

Cuando se realizó la alimentación con ARD a las cámaras anódicas de las CCM, se registró inmediatamente un voltaje inicial de 70, 183, 60, 120 y 180 mV para cada una de las CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5 respectivamente. Esta energía creciente podría deberse a la aclimatación que se les dio a los electrodos (ánodo) y la interacción de los microorganismos presentes en el ARD con este. Así como

también a la diferencia de potencial entre los electrodos basada en factores químicos y biológicos (Min et al., 2005). A partir de entonces, el voltaje empezó a incrementar debido a la actividad biológica llegando a registrar voltajes máximos (Ver Tabla 35, de ahí empezó a entrar a una etapa oscilatoria, este comportamiento se mantuvo durante los 3 días finales. De esta manera el sustrato en la cámara anaerobia fue reemplazado, iniciando una nueva replica.

Tabla 35

Voltajes máximos de las Celdas de Combustible Microbiano para cada Replicas

CCM	Replica 1	Replica 2	Replica 3
CCM1	342.2mV/min	383mV/min	383mV/min
CCM2	399.5 mV/min	399.8mV/min	400 mV/min
CCM3	340 mV/min	380 mV/min	400 mV/min
CCM 4	320 mV/min	400 mV/min	400 mV/min
CCM5	400 mV/min	400 mV/min	359 mV/min

En la Figura 63, 64, 65, 66 y 67 se muestran el voltaje por horas registrado para cada CCM. Donde se observa que la generación de bioelectricidad de cada replica incluyo una fase de crecimiento y estacionaria (oscilatoria). Los datos muestran que los voltajes de salida son mayores en la tercera replica que la primera replica de cada CCM (p. ej., un máximo de 190.6 mV en la tercera réplica, contra 69.95 mV en la primera replica CCM1) esto podría deberse al crecimiento microbiano.

Se observó que los tiempos para alcanzar la fase estacionaria disminuyeron en la tercera replica, lo que se tradujo en una rápida recuperación del voltaje de salida generado después de reemplazar el sustrato en las CCM. Esto demuestra que los microorganismos anclados a la superficie del electrodo (ánodo) contribuyen en mayor grado a la generación de corriente eléctrica que los microorganismos plantónicos (los que se encuentran suspendidos en la cámara anaerobia). De lo contrario, el voltaje de salida debería disminuir debido a la remoción de la mayoría de las bacterias suspendidas con

el reemplazo del sustrato. Estos resultados son consistentes con la investigación hecha por (Bond y Lovley 2003).

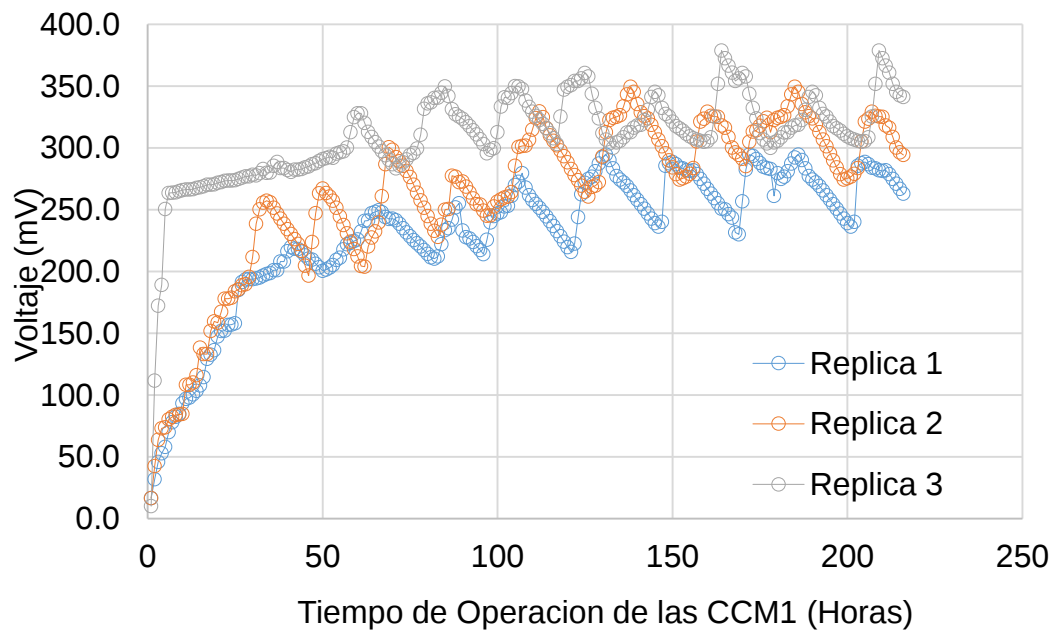


Figura 63. Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM1.

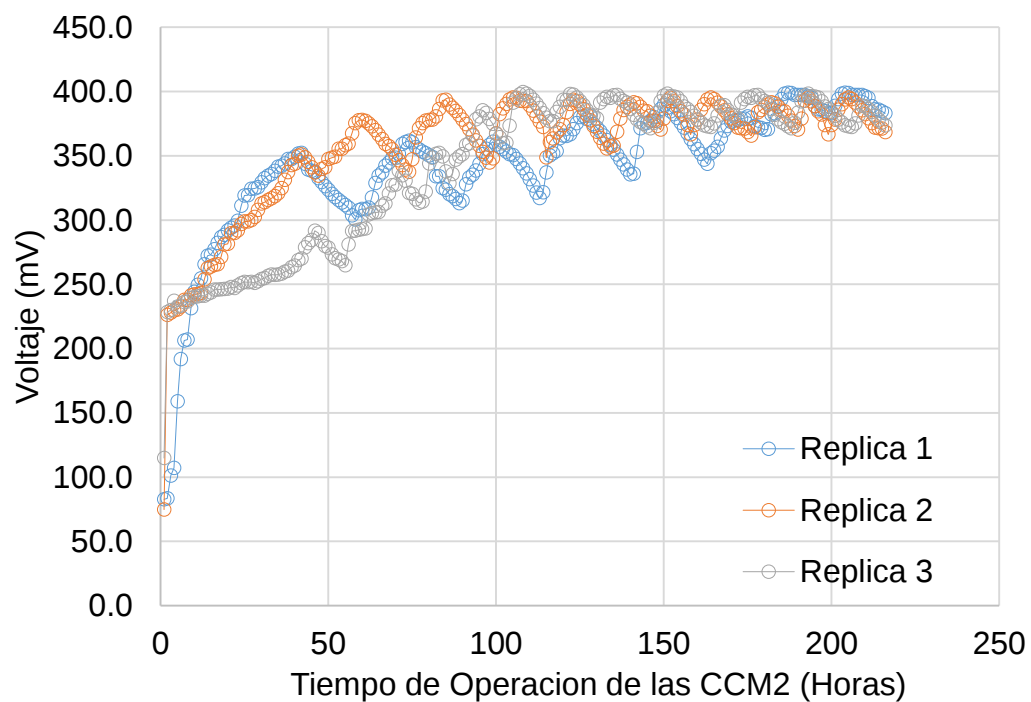


Figura 64. Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM2.

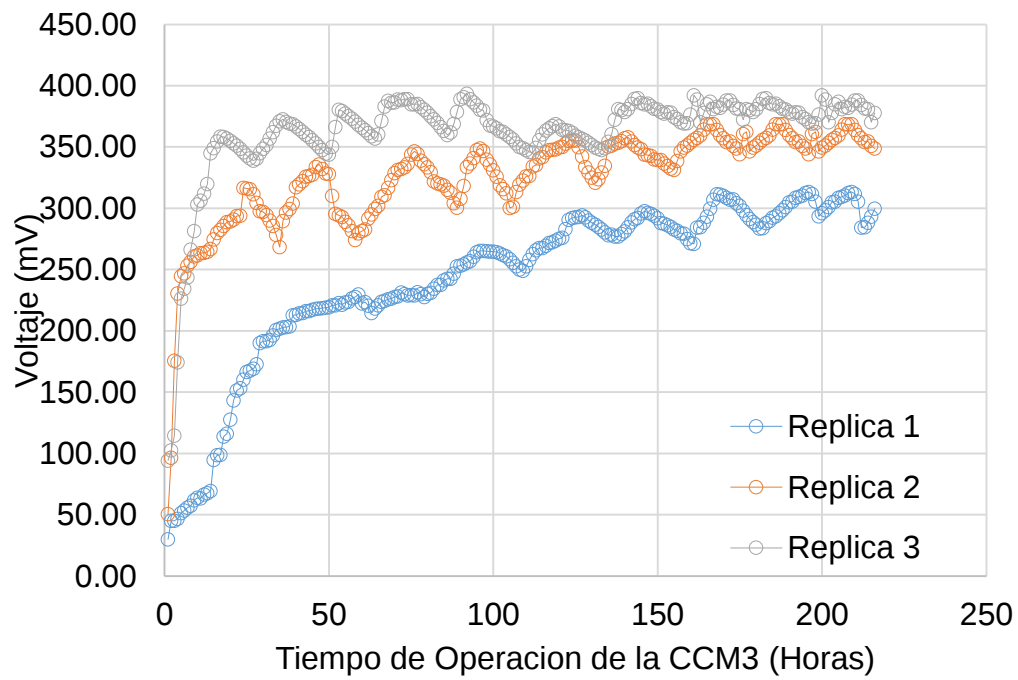


Figura 65.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM3

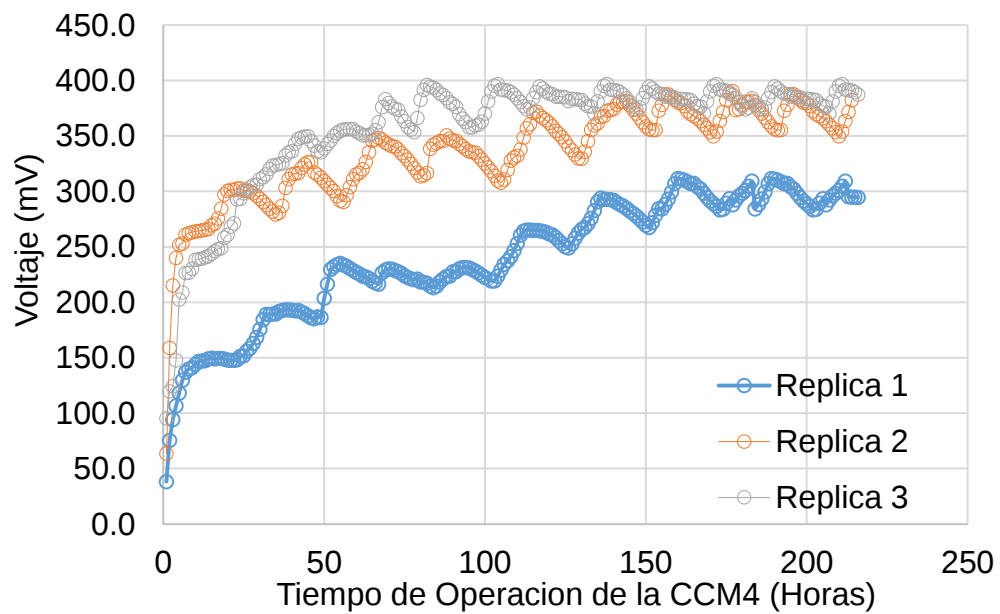


Figura 66.Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM4

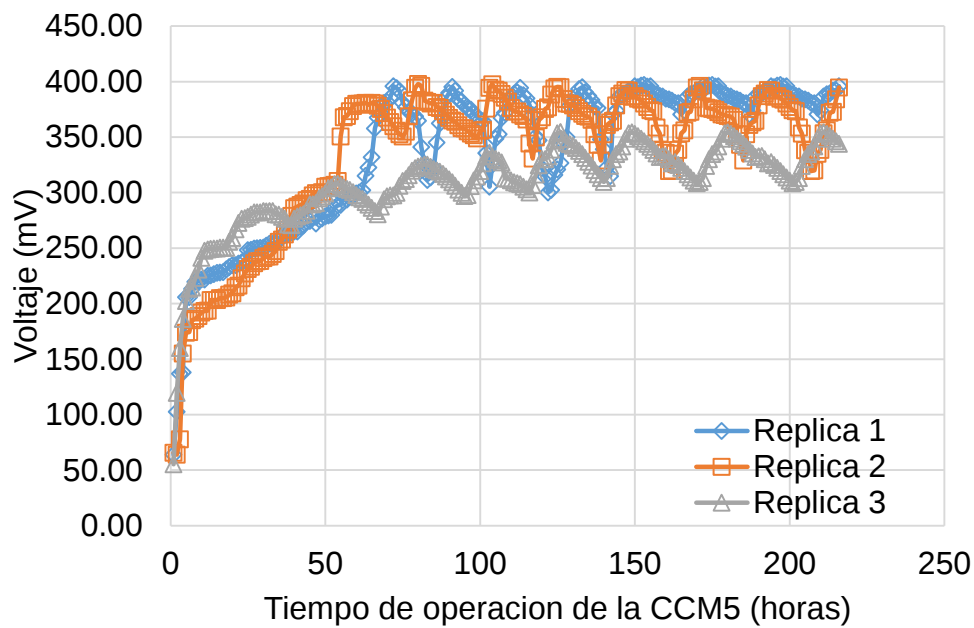


Figura 67. Comportamiento de voltaje registrado de las 3 réplicas durante 216 horas de operación de la CCM5

En la Figura 68, se presenta los voltajes promedio por día registrados en cada replica, donde se observa que en las réplicas 1, 2 y 3, la CCM1 registro un voltaje mínimo de 40.9 mV y un máximo 336.9 mV, CCM2 registro un voltaje mínimo de 176.27 mV y un máximo 391.86 mV, CCM3 registro un voltaje mínimo 60.69 mV y un máximo 383.62 mV, CCM4 registro un voltaje mínimo 120.52 mV y un máximo 385.81mV, finalmente la CCM5 registro un voltaje mínimo 150.56 mV y un máximo 380.40 mV. De esto podemos resaltar que la CCM2 oscilo valores máximos de voltaje durante todo el tratamiento frente las demás CCM, seguida por la CCM3, CCM4, CCM5 y CCM1. Esto se debió a que cada una de las Celdas operó a diferentes resistencias y área del electrodo grafito, sin embargo, todos mantuvieron un crecimiento en la curva de generación de energía.

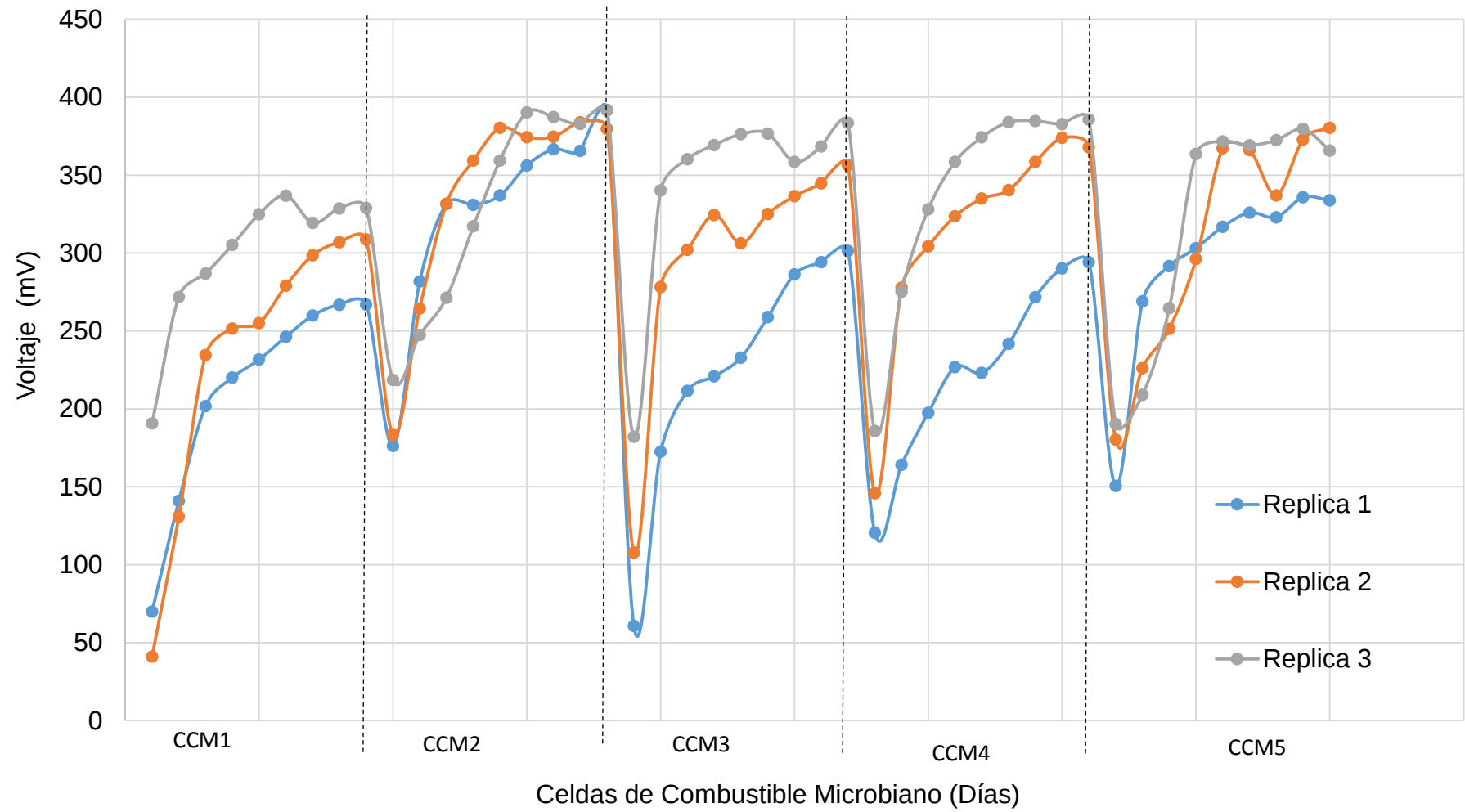


Figura 68. Comportamiento del voltaje registrado de las 3 réplicas durante los 27 días la operación de las 5 CCM.

4.4.3.2. *Voltaje promedio general durante la operación de las Celda de Combustible Microbiano (CCM)*

En la Tabla 36, se presenta los valores generales de voltaje promedio de cada una de las CCM para las 3 Replica realizadas. Los valores máximos fueron obtenidos por la CCM2 y los valores mínimos fueron para el caso de la CCM 1.

Tabla 36

Voltaje promedio de las Celdas de Combustible Microbiano

Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Área Superficial Total del electrodo de Grafito (cm^2)	Voltaje (mV)			
			Replica 1	Replica 2	Replica 3	Voltaje Promedio (mV)
CCM1	150	151	264.58	304.78	325.63	298.33 $\pm$ 31
CCM2	50	151	374.68	379.4	387.19	380.42 $\pm$ 6.3
CCM3	50	73	293.93	345.85	370.18	336.65 $\pm$ 38.9
CCM4	150	73	285.4	366.77	384.44	345.54 $\pm$ 52.8
CCM5	100	112	363.41	372.62	330.89	355.64 $\pm$ 21.

De la Tabla 36 resulta la Figura 69, donde se observa que la CCM2 configurada con una resistencia externa de 50 ohmios y un A_{ST} Grafito 151 cm^2 obtuvo una mayor generación de voltaje promedio en 380.42 mV, seguida por la CCM5 con 355.4 mV con resistencia externa de 100 ohmios y un área superficial de electrodo de 112 cm^2 .

Esto nos muestra que al utilizar una resistencia externa menor y A_{ST} Grafito mayor se registra un mayor voltaje. Álzate et al (2008) menciona que operar con bajas resistencias, los electrones se mueven más fácilmente a través del circuito. Así mismo, esto se corrobora con los estudios realizados por (Álzate et al., 2008) quien utilizó resistencias de 600 y 1000 Ω donde obtuvo un máximo de 306 mV y 504 mV respectivamente, quien trabajó con agua residual sintética con glucosa. Por

consiguiente, se puede inferir que la resistencia externa afecta a la eficiencia de CCM, mediante el control del flujo de electrones desde el ánodo al cátodo, Además una resistencia externa muy alta actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones, con un aumento en la resistencia interna de la celda (Rismani et al., 2011), como sucedió en las CCM4 y CCM1 quienes trabajaron con mayor resistencia externa (150 ohmios). Además, a mayor oxidación del sustrato por los microorganismos, se espera altos índices de oxidación de los transportadores de electrones en el cultivo a bajas resistencias (Jang et al., 2004).

Por otro lado, la CCM2 y CCM1 quienes operaron con mayor área superficial (151 cm^2) y diferentes resistencias externas de 50 y 150 respectivamente, generaron voltajes diferentes. Así mismos la CCM5 quien trabajo con un A_{ST} Grafito y Resistencia externa promedio mostro un votaje de 24.78 mV de diferencia de la CCM2. Se sabe que al incrementar el área superficial de un electrodo (ánodo) existe mayor contacto de los microorganismos electrogénicos con la materia orgánica presente en el sustrato para degradarlo y de esta manera donar sus electrones al ánodo, incrementado la generación de bioelectricidad tal como lo menciona (Antonili, 2015). Sin embargo, la CCM1 presento un voltaje menor que las demás celdas, a pesar de haber operado con un mayor A_{ST} Grafito (151 cm^2), esto se debe a la influencia que tiene la resistencia externa, ya que esta celda trabajo con una mayor resistencia, puesto que este actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo.

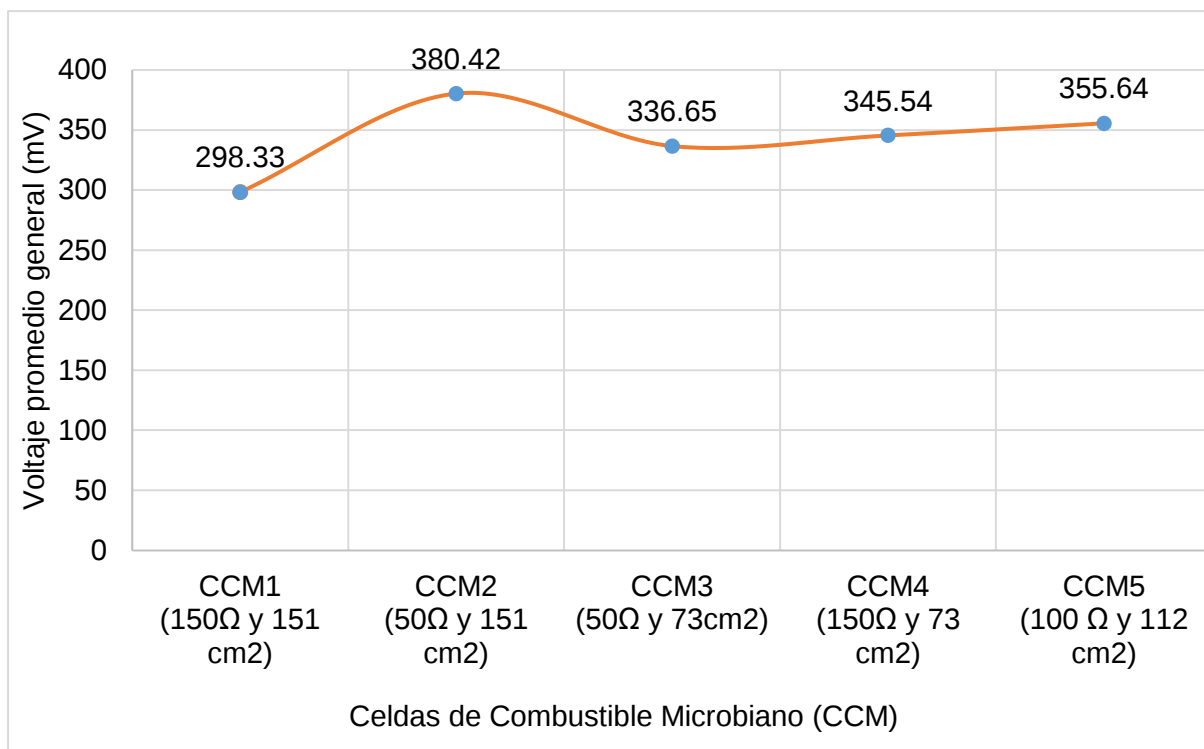


Figura 69. Voltajes promedio general de las Celdas de Combustible Microbiano.

4.4.3.3. Análisis estadístico

Mediante el diseño estadístico ANOVA Factorial, se evaluó si las variables independientes (Resistencia externa (Ω) y Área Superficial Total del electrodo de Grafito ($A_{ST\text{Grafito}} \text{ cm}^2$) presentan un efecto significativo ($p < 0.05$) en la generación de la bioelectricidad (Voltaje mV) con un nivel de confianza al 95 %.

Tabla 37

Análisis de varianza para la Resistencia externa y Área superficial Total del electrodo de Grafito sobre el Voltaje

Fuente de Variación	SS	df	MS	F	P
Curvatr.	569.49	1	569.492042	0.49172	0.49915
(1) Resistencia (Ohmio)	4019.78	1	4019.778075	3.47081	0.09206
(2) $A_{ST\text{Grafito}} (\text{cm}^2)$	8.86	1	8.858008	0.00765	0.93204
1 by 2	6207.57	1	6207.565408	5.35982	0.03413
Error Residual	11581.67	10	1158.167340		
Total SS	22387.37	14			

Nota: $R^2 = 0.48267$; $R^2_{\text{ajust}} = 0.3092$

En la Tabla 37 se observa que el diseño estadístico aplicado resulta significativo ($p < 0.03413$) para la interacción de la Resistencia (Ω) y el A_{ST} Grafito (cm^2) en la generación de bioelectricidad, en cambio los efectos principales de Resistencia (Ω) ($p = 0.09206$) y A_{ST} Grafito (cm^2) ($p = 0.93204$) no representaron significancia alguna. Por otra parte el $R^2 = 0.48$ indica que los efectos incluidos en el modelo ajustado (Resistencia, A_{ST} -Grafito y su interacción) presenta un 48 % de ajuste lo que implica que el modelo se ajusta relativamente a los datos, esto se debe probablemente a la cantidad de ensayos realizados, según Pagura, Hernandez y Dianda (2015) menciona que para un diseño factorial es necesario realizar máximo 4 réplicas, sin embargo la finalidad de esta investigación no solo fue probar en el diseño estadístico sino determinar el efecto de la Resistencia y el A_{ST} Grafito en el desempeño eléctrico de las Celdas de Combustible Microbiano utilizando como sustrato agua residual doméstica.

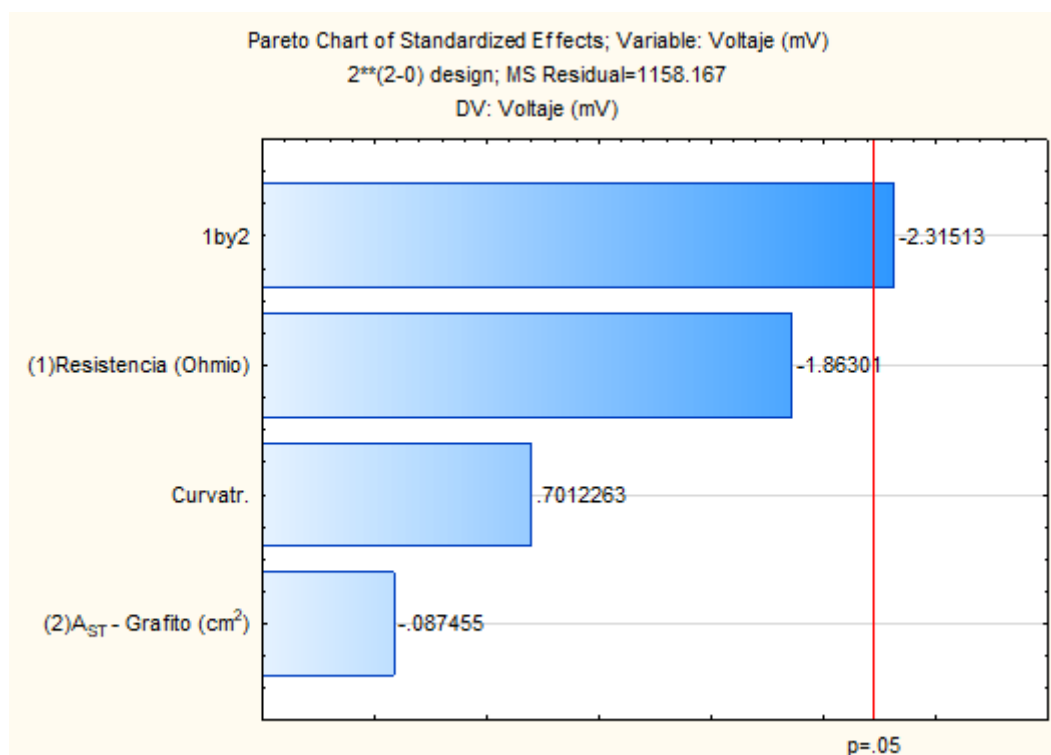


Figura 70. Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A_{ST} -Grafito (cm^2) en la generación de Bioelectricidad (mV)

De la Figura 70 del diagrama de Pareto, se representan los efectos estandarizados con ($p = 0.05$), donde se observa que la interacción de los efectos principales (Resistencia y A_{ST} -Grafito) son significativos, lo que implica que los efectos escogidos son determinantes para la generación de bioelectricidad; no obstante, los valores obtenidos en la interacción son negativos, esto nos conduce a un aumento de la bioelectricidad. Sin embargo, el valor negativo para el efecto principal (Resistencia externa) significa que a menor resistencia externa existe un incremento de la bioelectricidad.

En tanto al efecto del A_{ST} Grafito (cm^2) este no presentó un valor significativo. Esto se debería por las características físicas del material, ya que autores como Liu et al (2004) menciona que un electrodo de barra de Grafito presenta una superficie liza, lo cual limitaría el crecimiento de la biopelícula y la adhesión de microorganismo electrogénicos por completo en la superficie de grafito, ya que cada vez que se alimenta las CCM, la biopelícula formada sobre electrodo tiende a lavarse y tardar un tiempo en volver a formarse la biopelícula de microorganismo, al no ser este rugoso o poroso, a pesar de ser un buen conductor de electrones, por su baja porosidad este afectaría la generación de bioelectricidad

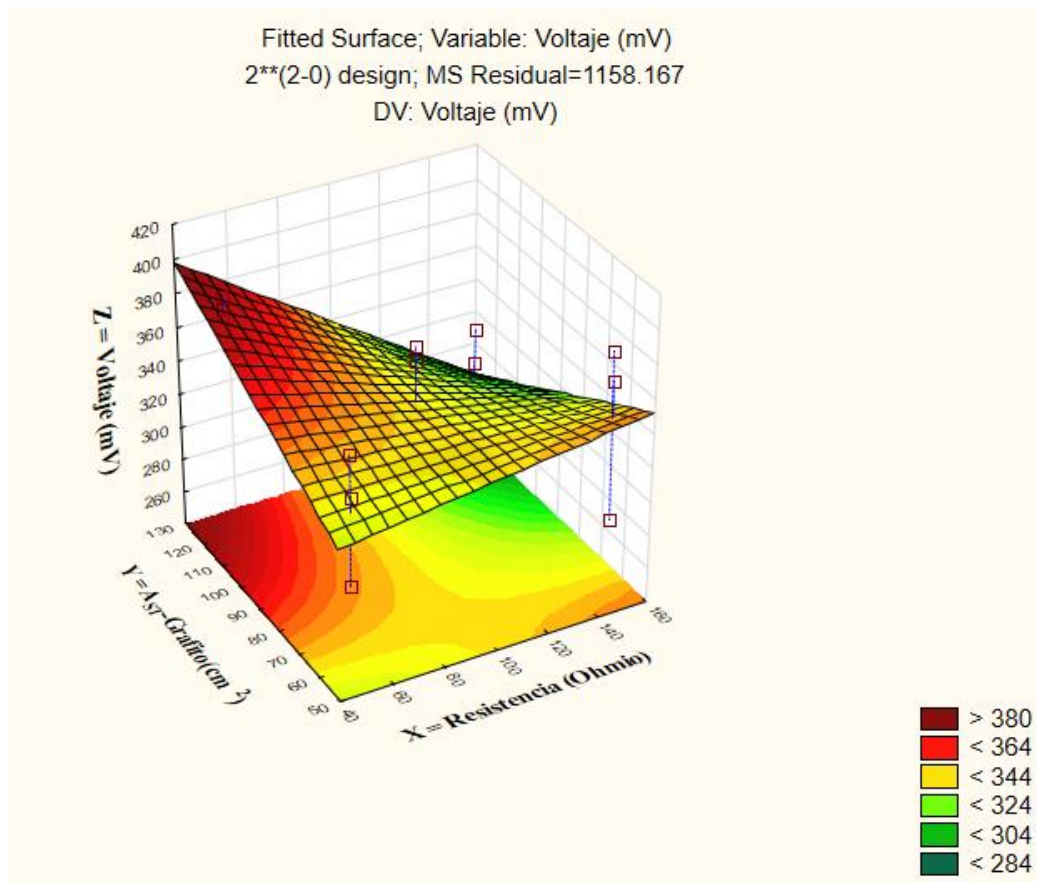


Figura 71. Diagrama de Superficie para la generación de Bioelectricidad

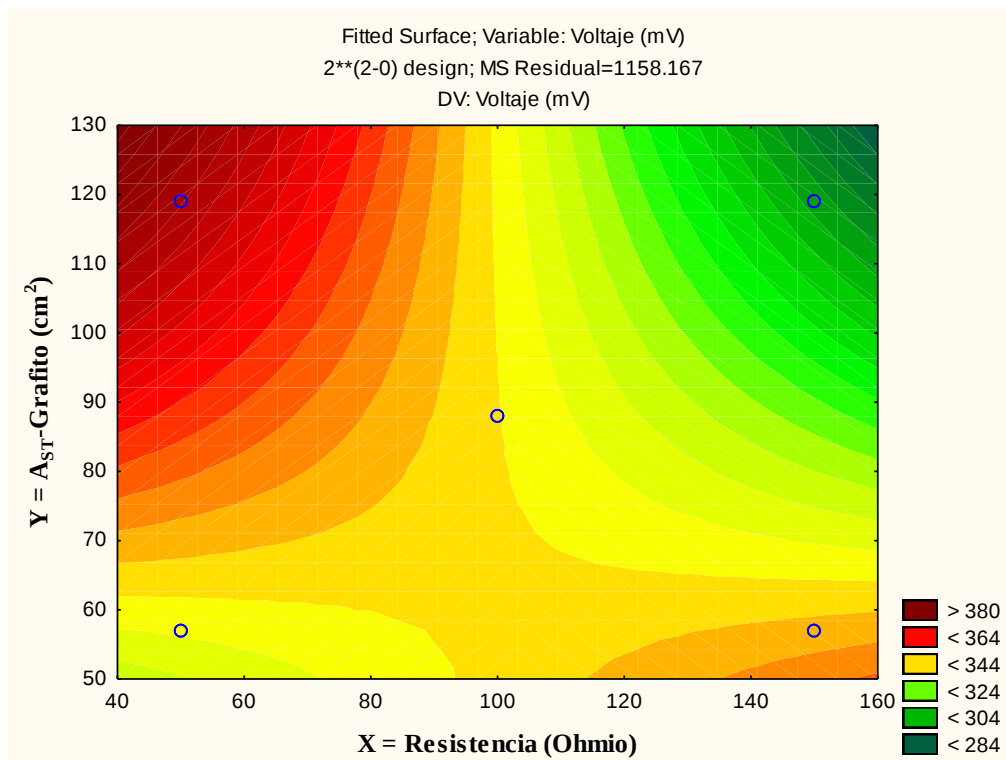


Figura 72. Curvas de contorno para la generación de Bioelectricidad

En la Figura 71 y 72 se grafica la superficie de respuesta y curvas de contorno, donde se observa que, en los intervalos estudiados, las mayores generaciones de bioelectricidad fueron obtenidas en la interacción de los efectos a una Resistencia de 50Ω y un $A_{ST}Grafito$ de 151 cm^2 . Las condiciones analizadas se ajustan a la Ecuación (16) generada por el diseño estadístico, utilizando este modelo se puede alcanzar una mayor generación de bioelectricidad promedio $> 380\text{ mV}$.

Ecuación 13. Modelo Matemático Lineal

$$Z = 250.15 + 0.93 * \text{Resistencia } (\Omega) + 1.45 * A_{ST}Grafito \text{ (cm}^2\text{)} - 0.015 * \text{Resistencia } (\Omega) * A_{ST}Grafito \text{ (cm}^2\text{)}$$

Donde:

X: Resistencia externa (Ω)

Y: $A_{ST}Grafito$ (cm^2)

Z: Bioelectricidad (mV)

Por otro lado el efecto de la Interacción de la Resistencia (Ω) y el $A_{ST}Grafito$ (cm^2) corrobora a los resultados obtenidos en la Tabla 36 y el comportamiento en la generación de energía, esto nos indica que la interacción de una Resistencia Menor y $A_{ST}Grafito$ (cm^2) sea mayor, se generara una mayor cantidad de energía, según Alzate et al (2008) esto se debe a que con bajas resistencias los electrones se mueven más fácilmente a través del circuito, además a mayor oxidación del combustible (agua residual domestica) por los microorganismos se espera altos índices de oxidación de los transportadores de electrones en el cultivo. Por lo tanto, una CCM puede comenzar a operar a bajas resistencias para remover contaminantes de altos índices orgánicos (Jang et al., 2004). Además, el voltaje mayor obtenido que se registró en la CCM2 se debe a que en dicho sistema siguió una cinética de saturación; es decir la

utilización del sustrato (agua residual domestica) en un sistema biológico en función de la concentración y la velocidad de transporte electrones (Liu y Logan, 2004).

4.4.4. Densidad de Potencia

De acuerdo a los valores de voltaje obtenidos durante toda la operación en las 5 CCM, se desarrolló el análisis de la Densidad de Potencia, expresado en relación al área superficial Total del electrodo de Grafito ($A_{\text{GrGrafito}}$) y la longitud de este, el cual nos permite ver la cantidad de bioelectricidad generada por unidad de área del electrodo.

En la Tabla 38, se muestra valores obtenidos de la Densidad de Potencia derivados de la ecuación (4). Donde se observa que durante las 3 réplicas las CCM reportaron un crecimiento bioelectrico continuo. De ello se visualiza, que para la CCM1 obtuvo un valor mínimo de 0.74 mW/m^2 y un máximo de 50.06 mW/m^2 , Para el caso de la CCM2 reporto un mínimo de 41.10 mW/m^2 a un máximo de 203.13 mW/m^2 , en tanto para la CCM3 un mínimo de 10.14 mW/m^2 a un máximo de 405.14 mW/m^2 , así mismo, para la CCM4 un mínimo de 13.33 mW/m^2 a un máximo de 136.59 mW/m^2 , finalmente para la CCM5 un mínimo de 20.25 mW/m^2 a un máximo de 129.29 mW/m^2 . De los valores de Densidad de Potencia reportados por cada una de las CCM, se puede ver que la CCM3 fue quien genero la mayor Densidad de Potencia frente a las demás CCM. Cabe recalcar que cada replica tuvo diferentes concentraciones de DQO y DBO₅.

Tabla 38

Valores de la Densidad de Potencia

Celdas	Resistencia (Ω)	Longitud del Electrodo (cm)	A _{ST} -Grafito (m ²)	Densidad de Potencia (mW/m ²)		
				Replica	Replica 2	Replica
CCM1	150	18	0.0151	2.16	0.74	16.02
				8.76	7.55	32.58
				17.95	24.27	36.28
				21.35	27.90	41.08
				23.65	28.68	46.57
				26.74	34.34	50.06
				29.79	39.32	44.98
				31.40	41.55	47.62
				31.43	42.05	47.70
CCM2	50	18	0.0151	44.46	41.10	63.25
				104.98	92.55	81.00
				145.32	145.55	97.42
				144.97	170.85	133.03
				150.20	191.32	170.88
				167.78	185.32	201.44
				177.80	185.66	198.41
				176.78	194.91	193.84
				203.13	190.73	202.76
CCM3	50	8	0.0073	10.14	31.92	91.25
				81.98	213.13	318.53
				123.09	251.21	357.30
				134.32	289.80	375.40
				149.26	258.19	389.79
				184.45	291.02	390.69
				225.53	311.72	353.94
				238.17	327.18	373.52
				250.16	349.48	405.14
CCM4	150	8	0.0073	13.33	19.52	31.71
				24.71	70.75	69.52
				35.79	84.93	98.80
				47.18	96.13	117.90
				45.65	102.94	128.56
				53.63	106.29	135.34
				67.77	117.92	135.84
				77.27	128.29	134.45
				79.45	124.23	136.59
CCM5	100	13	0.0112	29.05	20.25	32.38
				45.73	39.03	64.65
				56.45	62.60	75.97
				78.36	118.05	82.12
				120.51	123.44	89.71
				119.79	121.76	94.95
				101.50	123.94	93.19
				124.16	128.76	100.78
				129.29	119.56	99.59

De la Tabla 38 resulta la Figura 73 donde se observa a mayor detalle la Densidad de Potencia tomando en cuenta el $A_{ST}Grafito$ y la longitud del electrodo (ánodo) generada por las 5 CCM en función del tiempo de operación de las CCM en días.

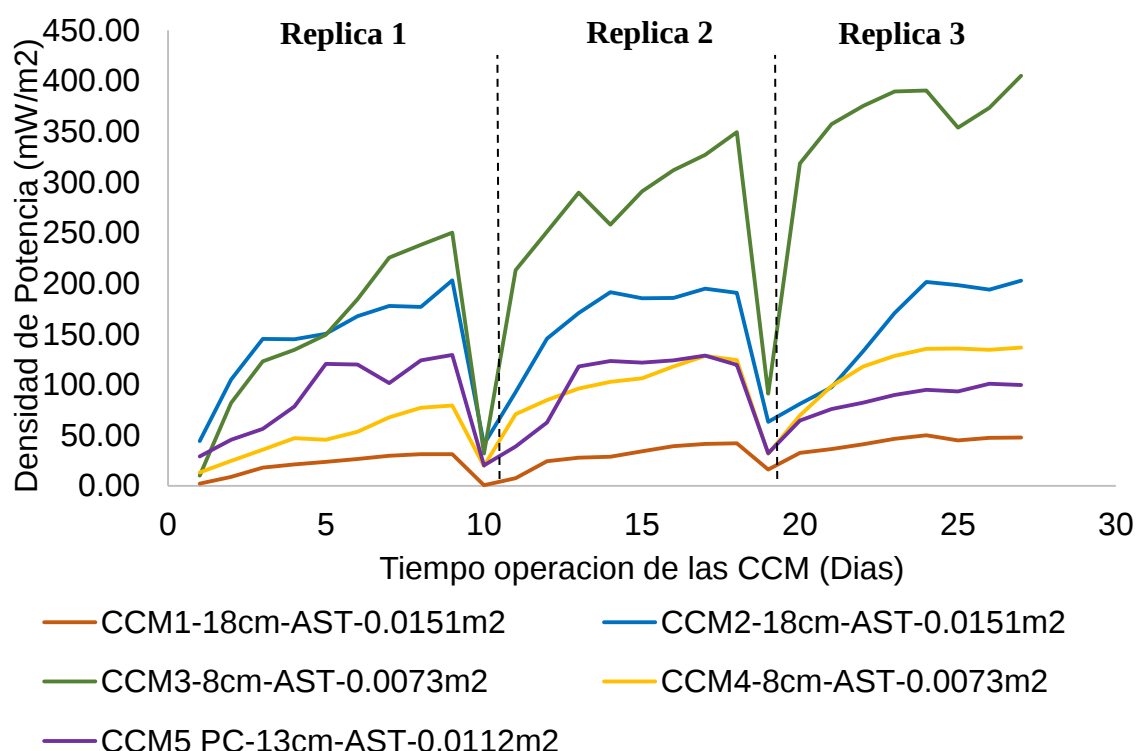


Figura 73. Efecto de la resistencia, longitud del electrodo y área superficial del grafito en la generación de la Densidad de Potencia (mW/m²)

En la Figura 73, se observa que, las CCM con mayores valores de Densidad de potencia fue la CCM3, quien opero con una resistencia externa de 50Ω y un $A_{ST}Grafito$ de $0.0073m^2$ con una longitud de electrodo de 8 cm, a obteniendo una Densidad de Potencia máxima de $405.14mW/m^2$ con un voltaje promedio de 368 mV. Seguidamente por la CCM2 con una resistencia de 50Ω , $A_{ST}Grafito$ $0.0151m^2$ y una longitud del electrodo de 18 cm genero una máxima Densidad de potencia de $203.13mW/m^2$ con un voltaje promedio de 392mV. En tanto para la CCM4, CCM5 y CCM1 con resistencias de 150Ω , 100Ω y 150Ω y un área superficial de electrodo de

0.0073 m², 0.0112 m² y 0.0151 m² diferenciados por la longitud de sus electrodos con 8 cm, 13 cm, 18 cm, respectivamente, registraron valores de Densidad de Potencia de 136.59mW/m², 129.29mW/m² y 50.06mW/m² respectivamente, estas fueron quienes registraron la menor cantidad de energía por unidad de área superficial en comparación a la CCM3 y CCM2. No obstante todas las CCM muestran una curva de Densidad de Potencia en crecimiento durante toda la operación experimental.

Autores como Kargi y Eker (2007) mencionan que al aumentar el área de superficie del ánodo (electrodo) aumenta la densidad de potencia, ya que estos son los sitios para las reacciones electroquímicas que generan protones y electrones. Sin embargo, de acuerdo a nuestros resultados de las CCM3 y CCM2 con un área superficial de 0.0073 m² y 0.0151m² y una densidad de potencia máxima generada fue de 405.14mW/m² y 203.13mW/m² respectivamente, nos indica que, a menor área superficial, mayor será la densidad de Potencia, contradiciendo a lo afirmado por (Kargi y Eker, 2007). Esto podría deberse a la resistencia del material de electrodo grafito. Freedman y Zemansky (2009) y Miguel (2014) mencionan, que la Resistencia (Ω) de un material conductor se relaciona con la Resistividad ($\Omega \cdot m$) del material y que por las dimensiones de este también influyen de forma decisiva en la resistencia del movimiento de los electrones, es decir, que la resistencia de un conductor incrementa de acuerdo con su longitud, como también la resistencia de un conductor disminuye con su área de la sección transversal del electrodo. Por lo que se necesita tener una menor sección transversal, para así tener una menor Resistencia (Ω) del material conductor ya que este influye en el movimiento de los electrones.

Para poder afirmar que la longitud del electrodo y la sección transversal, pudo haber influenciado en la obtención de la densidad de potencia. Se realizó los cálculos de Resistencia al Electrodo, para cada una de las CCM, de acuerdo a la ecuación (6)

(Freedman y Zemansky, 2009) cuyos resultados se muestra en la Tabla 34. De esto se puede apreciar que la resistividad del conductor grafito es de $3.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ y que la CCM3 quien opero con una longitud de electrodo de 0.08 m, tuvo una Resistencia del material conductor de 0.006Ω , dando valores de densidad de potencia promedio de 315 mW/m^2 y la CCM2 con una longitud del electrodo de 0.18 m, tuvo una Resistencia del material conductor de 0.013Ω con valores de densidad de potencia promedio de 190 mW/m^2 . De aquí podemos apreciar que las CCM2 tiene una menor resistencia del material del conductor, demostrando matemáticamente que la longitud y la sección transversal del conductor de electrones tuvo influencia en la generación de la variabilidad de la Densidad de Potencia, por lo que los resultados obtenidos muestran claramente que no solo influye el área superficial de un electrodo sino también la Resistencia de la materia conductora.

Por otro lado no descartamos de que la generación de variabilidad de Densidad de Potencia, pudo ser también influenciada por la diversidad microbiológica disponible y formada como una biopelícula en la superficie del electrodo anódico, sobre la cual se lleva a cabo la transferencia de electrones de los microorganismo vivos al consumir el sustrato, estudios realizados por Feng et al. 2009 y Pineda y Rosas, 2016 señalan que tanto la concentración del sustrato como la diversidad microbiológica disponible en el agua residual generan comunidades microbianas mixtas en las cuales se da una fuerte competencia entre bacterias electrogenicas y no electrogenicas, las cuales reduce la producción de densidad de potencia. Esto pudo haber ocurrido en la CCM evaluadas y se puede plantear como una de las causas por las cuales la densidad de potencia reportada fue baja en una y en otras altas.

Tabla 39

Resistencia del conductor de Grafito

Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	Longitud del Conductor de Grafito (m)	Sección del Conductor (m ²)	Resistencia del Conductor de Grafito (Ω)	Densidad de Potencia Promedio General (mW/m ²)
CCM1	0.18	0.000491	0.013	40
CCM2	0.18	0.000491	0.013	191
CCM3	0.08	0.000491	0.006	315
CCM4	0.08	0.000491	0.006	111
CCM5	0.13	0.000491	0.009	113

Por otro lado, con respecto a la resistencia externa utilizadas. En la Tabla 40, se aprecia que la CCM3 y CCM2 con resistencias externas de 50 Ω fueron quienes obtuvieron una mayor Densidad de Potencia promedio de 315 mW/m², 191 mW/m² y una eficiencia de remoción de la materia orgánica (DQO y DBO) al 81 y 82.3 % respectivamente, esto muestra que a una resistencia externa más baja aumenta la producción de Densidad de Potencia y que además con lleva una mayor remoción de materia orgánica. Esto se corrobora con los estudios realizados por (Alzate et al., 2008) donde emplearon resistencias de 600 Ω y 1000 Ω obteniendo Densidades de Potencia 640 y 336mW/m², respectivamente con eficiencias de remoción de materia orgánica expresada en DQO fue del 82 y 65 % respectivamente .

Tabla 40.

Densidad de Potencia promedio de las Celdas de Combustible Microbiano

Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	Resistencia (Ω)	Longitud del Electrodo de Grafito (m)	Área Superficial Total del Electrodo de Grafito (cm^2)	Área Superficial Total del Electrodo de Grafito (m^2)	Densidad de Potencia (mW/m^2)			Voltaje Promedio General (mV)	Densidad de Potencia Promedio General (mW/m^2)	Remoción de la Materia Orgánica e Inorgánica *DQO (mgO_2/L)	Remoción de la materia Orgánica Biodegradable **DBO (mgO_2/L)
					Replica 1	Replica 2	Replica 3				
CCM1	150	0.18	151	0.0151	30.87	40.96	46.76	290	40±8.04	79.4%	79.8%
CCM2	50	0.18	151	0.0151	185.71	190.42	198.32	380	191±6.4	82.3%	82.6%
CCM3	50	0.08	73	0.0073	237.84	329.29	377.25	337	315±27	81.0%	81.3%
CCM4	150	0.08	73	0.0073	74.75	123.44	135.62	346	111±12	81.4%	81.8%
CCM5	100	0.13	112	0.0112	118.00	124.06	97.83	356	113±13.7	75.5%	76.1%

Nota: *DQO: Es todo material orgánico e inorgánico tanto soluble como particulado, susceptible de oxidación química. **DBO: Representa el contenido orgánico biodegradable soluble y particulado.

4.4.4.1. Análisis estadístico

La evaluación del ajuste del modelo obtenido se ha realizado, en base al análisis de varianza (ANOVA), donde se determinó si el modelo resulta estadísticamente significativo ($p < 0.05$) en la Tabla 41 se observa que el modelo resulta estadísticamente significativo, con un nivel de confianza del 95 %. Así mismo se observa que los efectos principales de Resistencia ($p < 0.000005963$) y A_{ST} Grafito ($p < 0.000790956$) fueron altamente significativos. Los valores de $R^2 = 0.91$ y R^2 ajustado = 0.88 son más cercanos, entonces el modelo puede considerarse satisfactorio (Gonzales, Acosta, Davila, Rodriguez y Santana, 2007). Por consiguiente, se tiene un ajuste del 91 % lo que implica que el modelo se ajusta a los datos.

Tabla 41

Análisis de Variancia (ANOVA) del efecto de las variables independientes en la generación de Densidad de Potencia (mW/m²)

	SS	df	MS	F	p
Curvatr.	6235.3298	1	6235.33	4.91162	0.051020533
(1)Resistencia (Ohmio)	94770.8259	1	94770.83	74.65172	0.000005963
(2) A_{ST} Grafito (cm)	28534.3646	1	28534.36	22.47674	0.000790956
1 by 2	1994.4929	1	1994.49	1.57108	0.238563138
Error Residual	12695.0622	10	1269.51		
Total SS	144230.0754	14			

$R^2 = 0.91$; R^2 ajustado = 0.88; Ms Residual = 1269.506

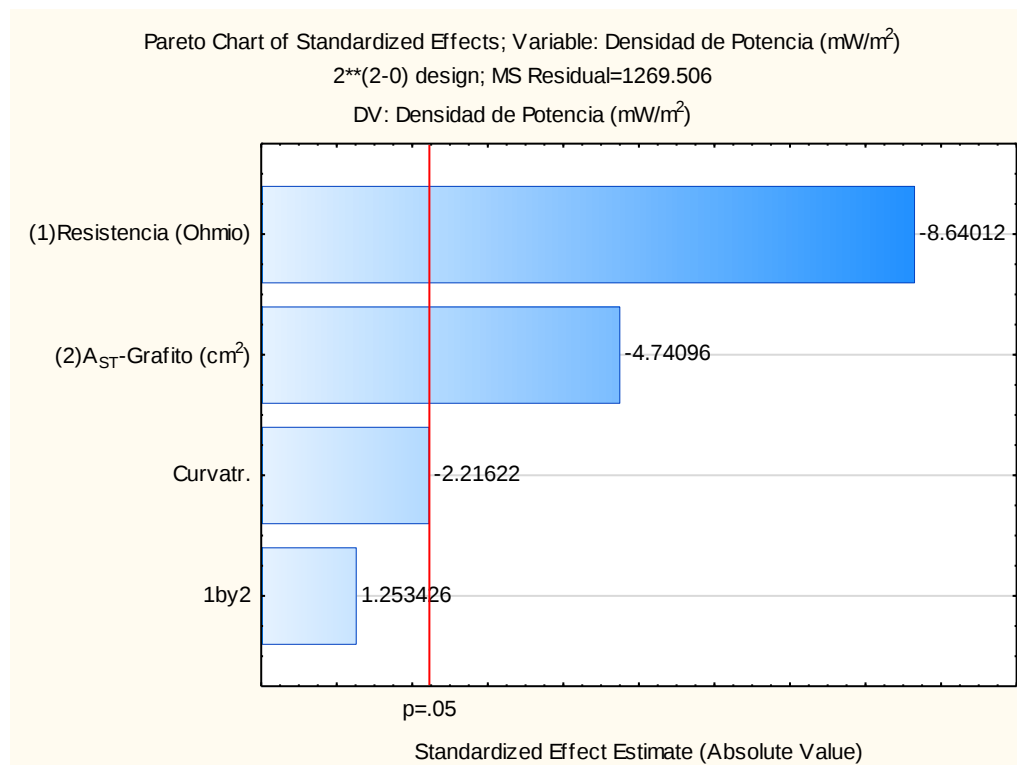


Figura 74. Significancia de los efectos principales Resistencia (Ω) y A_{ST} -Grafito (cm^2) en la generación de la Densidad de Potencia (mW/m^2)

De la Figura 74 del diagrama de Pareto se observa que los efectos principales (Resistencia externa y la A_{ST} Grafito) son estadísticamente significativos ($p = 0.05$) lo que indica que los efectos principales escogidos son determinantes para la generación de Densidad de Potencia. En tanto la Resistencia tiene mayor influencia, seguido del A_{ST} Grafito, no obstante, estos presentan valores negativos, esto muestra que la disminución de los valores de los efectos principales nos conllevaría al incremento de la Densidad de Potencia. Por lo tanto, la operación a una menor resistencia externa, A_{ST} Grafito, capacidad de Resistencia del electrodo conductor de Grafito, se obtiene una mayor Densidad de Potencia.

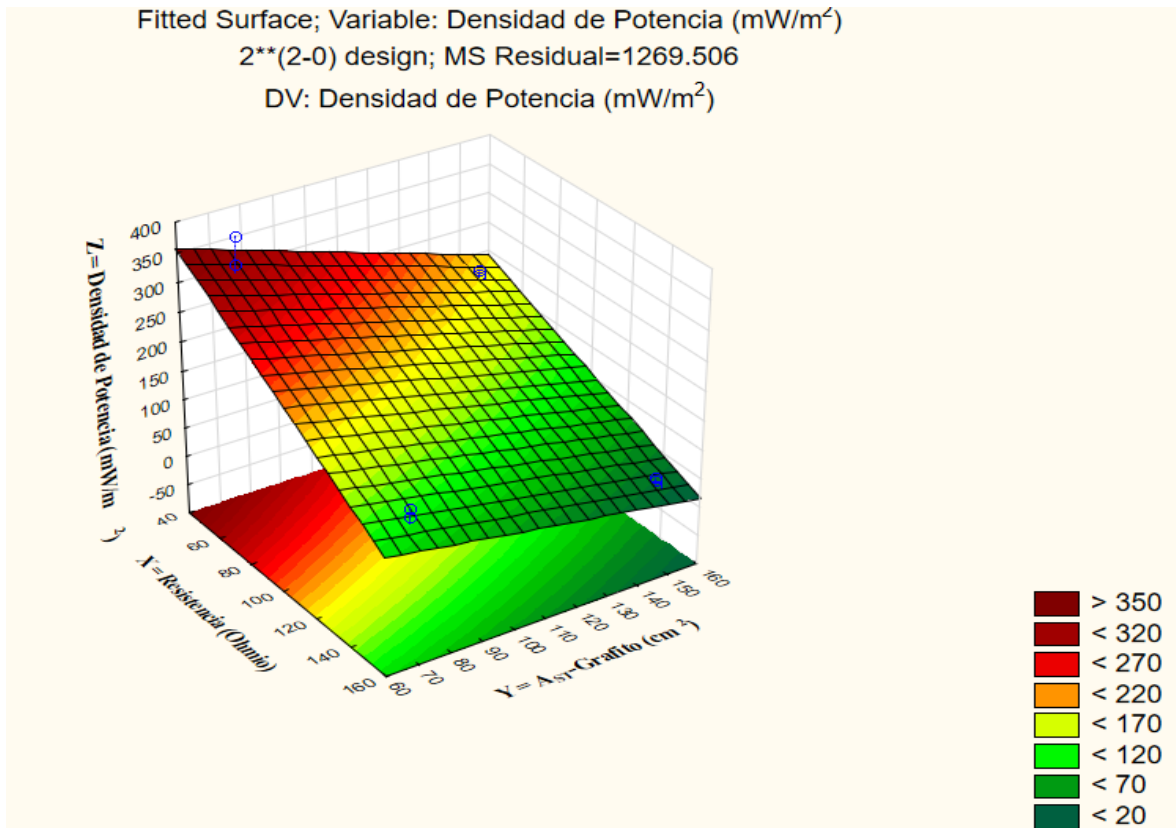


Figura 75. Diagrama de superficie para la generación de la Densidad de Potencia (mW/m^2)

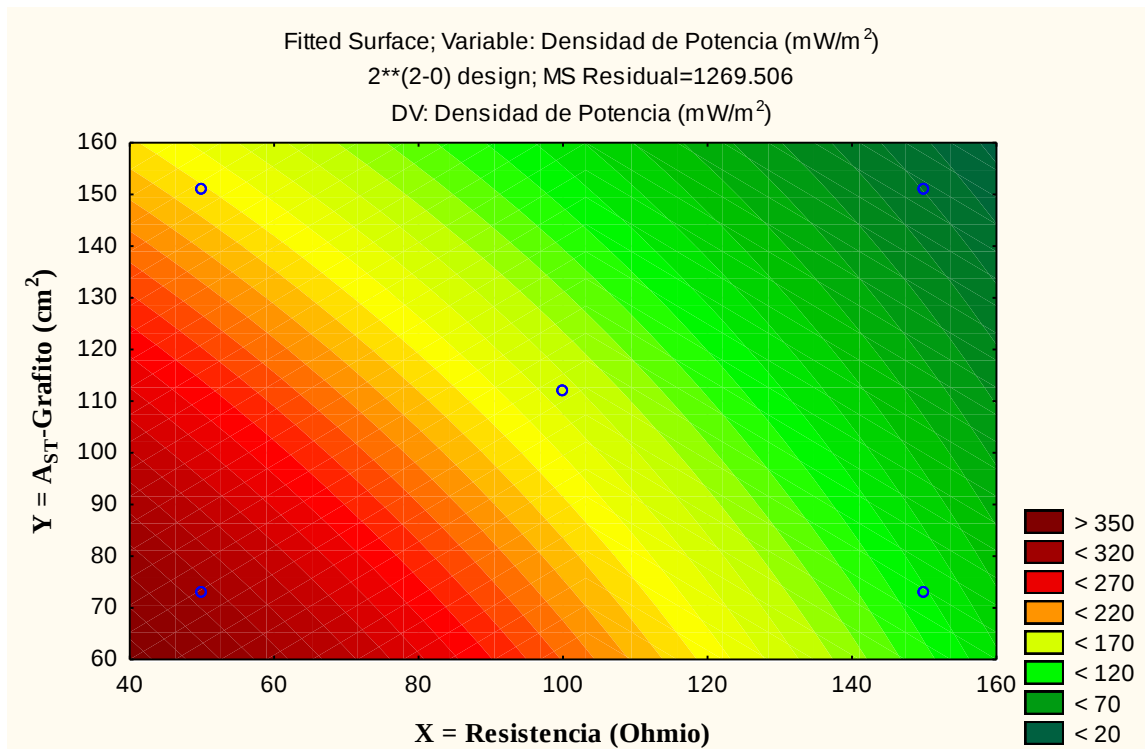


Figura 76. Curvas de contorno para la generación de Densidad de Potencia (mW/m^2)

En la Figura 75 y 76 se grafica la superficie de respuesta y curvas de contorno, donde se observa que cuando la Resistencia (Ω) y A_{ST} Grafito disminuye en sus valores, la Densidad de Potencia (mW/m^2) incrementa. Esto nos muestra y corrobora a los cálculos realizados con respecto a la Resistencia del electrodo y la influencia de este sobre la capacidad de resistencia del movimiento de los electrones. Las condiciones analizadas se ajustan a la Ecuación (15) resuelta por el diseño estadístico, utilizando este modelo se puede alcanzar una mayor generación de Densidad de Potencia Promedio $> 350 mW/m^2$.

Ecuación 14. Modelo lineal para Densidad de potencia

$$Z = 556.09 - 2.52 * \text{Resistencia } (\Omega) - 1.91 * A_{ST} - \text{Grafito } (cm^2) + 0.0066 * \text{Resistencia } (\Omega) * A_{ST} \text{Grafito } (cm^2)$$

Donde:

X: Resistencia externa (Ω)

Y: A_{ST} Grafito (cm)

4.4.5. Eficiencia Coulombica(EC)

La eficiencia coulombica (EC) se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como electricidad en las Celdas de Combustible Microbiano, se estima generalmente a partir de la reducción de la DQO. La EC se calculó como la razón entre la carga generada (Coulombios recuperados) entre la carga teórica presente en el agua residual de la cámara anódica (Coulombios totales en el sustrato) tal como lo indica (Luo et al., 2010). Para esto se utilizó el método de integración (Método del trapecio tomando 9 puntos). Donde se tomó la gráfica de la Intensidad de Corriente en función al tiempo de operación de las CCM, al integrar el área bajo la curva desde ($t=0$ hasta 216 horas). Para más detalle (Ver Anexo III- Tabla 51).

En la Tabla 42, se presenta los resultados de EC de cada una de las CCM. Donde se muestra que la EC incrementa por cada replica realizada y las EC obtenidas en este estudio varía de 4.4 a 35.73 %, esta variación se debe a las diferentes concentraciones de DQO de ingreso y las diferentes configuraciones de las CCM.

Tabla 42

Eficiencia Coulombica de las Celdas de Combustible Microiano

Celdas de Combustible Microbiano	Replica	Resistencia (Ω)	Área de Electrodo(cm^2)	Eficiencia Coulombica (EC) %
CCM1	1	150	151	4.4
	2			7.3
	3			9.7
CCM2	1	50	151	19.3
	2			26.7
	3			35.7
CCM3	1	50	73	12.9
	2			24.5
	3			31.5
CCM4	1	150	73	3.7
	2			8.3
	3			11.0
CCM5	1	100	112	10.2
	2			15.3
	3			13.9

También se observa que las diferentes Resistencia externa utilizadas en las CCM, tuvieron influencia en la Eficiencia Coulombica. Los máximos valores de EC se lograron cuando las celdas fueron operadas con una resistencia externa menor (50 Ω), siendo estas las CCM 2 y CCM3 con valores de 35.7 y 31.5 % de EC respectivamente. En cambio, los valores menores de EC (4.4, 3.7 %) son para las CCM que trabajaron una resistencia externa mayor (150 Ω). Estos resultados se relacionan con el trabajo realizado por (Cervantes, 2011), quien uso resistencias externa de 400 y 100 Ω , teniendo valores de 12 y 40% de EC respectivamente, utilizando como sustrato agua residual sintética, enriquecida con glucosa.

Tabla 43

Eficiencia Coulombica Promedio en relación a la remoción de DQO y Densidad de Potencia

Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Área de Electrodo(cm^2)	Densidad de Potencia(mW/m^2)	Remoción DQO (%)	Eficiencia Coulombica (EC) %
CCM1	150	151	40	79.4	7.13 $\pm$ 3.7
CCM2	50	151	191	82.3	27.23 $\pm$ 8.2
CCM3	50	73	315	81	22.96 $\pm$ 9.4
CCM4	150	73	111	81.4	7.66 $\pm$ 4.2
CCM5	100	112	113	75.5	13.13 $\pm$ 2.6

En la Tabla 43 se presenta las EC promedio, Remoción de DQO y densidad de potencia, para cada una de las CCM estudiadas. Alzate et al (2008) y Rabaey et al (2003) mencionan que a resistencias externas bajas favorecen el desarrollo de una biopelícula de microorganismos electrogénicos, lo que aumenta las densidades de potencia por ende mejora la remoción de la materia orgánica y la eficiencia coulombica. Los valores obtenidos son similares a mayores, al comparar con la investigación realizada por (Liu et al., 2004) quien trabajó con agua residual doméstica como sustrato e inóculo de una PTAR donde su EC fueron de 3-12% con remoción de DQO 50 a 80 % y densidad de potencia de 99 y 289 mW/m^2 .

Sin embargo, las EC obtenidos resultan bajos en comparación con otros autores quienes trabajaron con sustratos sintéticos (glucosa, acetato, entre otros). Lo que indica que hubo una remoción de DQO sustancial que no se asoció con la generación de bioelectricidad. Si bien las eficiencias Coulombica obtenidas son bajas, los reportados por otros han variado en un amplio rango de 3 - 97% (Ver Tabla 44). Estos valores bajos de EC, pueden estar asociados, si las bacterias emplean aceptores de electrones alternos al ánodo, ya sea que se encuentren presentes en la medio (agua residual), o que se difundan a través de la membrana de intercambio

protónico (puente salino), como el oxígeno (Liu et al., 2004), Otros factores que reduce la EC, son la desviación de electrones hacia el desarrollo anabólico de comunidades microbiológicas mixtas, el consumo de la materia orgánica a través de procesos metabólicos competitivos como la fermentación, la metalogénesis o la relación simbiótica entre las especies electroquímicamente activas y la reducción paulatina de área de transferencia anódica por la adherencia de material inerte que limita la transferencia de electrones. Ya que se trata de un agua residual doméstica, y se sabe que ahí hay un consorcio de microorganismos (Ah y Logan, 2013 y Nimje et al., 2012). No descartamos que esto pudo pasar en la experimentación realizada.

Tabla 44

Comparación de parámetros de desempeño de diferentes configuraciones en Celdas de Combustible Microbiano de Tipo H

Sustrato	Inoculo	Tipo de electrodo	Mediador Redox	Densidad de Potencia(mW/m ²)	Eficiencia Coulombica (%)	Referencia
Agua residual Doméstica	Bacterias presentes en aguas residuales	Grafito	No	289	3-12	(Liu et al., 2004)
Glucosa	Cultivo mixto	Grafito Plano	Hexacianoferrato de potasio	3600	97	(Rabaey et al., 2003)
Acetato	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel carbón	No	286±3	65	(Min y Logan., 2004)
Glucosa	<i>Geobacter metallireducens</i>	Papel carbón	No	264 - 494	12- 55	(Liu y Logan., 2004)
Acetato	<i>Geobacter metallireducens</i>	Papel carbón	No	40 ±1	19	(Min et al., 2005)
Acetato	Lodos activados	Grafito plano	No	788	63-78	(Oh et al., (2004)
Peptona	<i>Geobacter metallireducens</i> y <i>Shewanella</i>	Papel carbón	No	269 ±14	6	Heilmann y Logan., 2006)
Agua residual Doméstica	Agua residual doméstica y lodo anaerobio	Varilla de Grafito	No	315	7.1-27.2	Esta investigación

Así mismo en la Tabla 39 se muestra las eficiencias reportadas por otros estudios y se puede observar como de acuerdo al tipo de sustrato empleado varían las eficiencias producidas. Por ejemplo, con acetato se obtuvieron eficiencias de 65% (Min y Logan, 2004) y 63-78% (Oh et al., 2004). Con Glucosa, las EC fueron de 95% empleando hexafluoroferrato de potasio en su cátodo (Rabaey et al., 2003), mientras que Liu y Logan obtuvieron 55 % empleando un PEN (nafion) y 12% con uso de un puente salino, observándose que la mayor desventaja de este sistema fue la pérdida de sustrato debido a la oxidación aerobia en el ánodo, es decir, que con el uso de un puente salino existe una mayor difusión de O_2 de la cámara cátodo al ánodo.

Finalmente es posible decir que la eficiencia coulombica bajas están asociadas a las configuraciones de las CCM y los materiales de electrodos empleados, a las condiciones de operación y mantenimiento, y al desarrollo de un consorcio microbiológico determinadas por las características particulares del agua residual de la PTAR Santa Clara.

4.4.5.1. *Análisis estadístico*

Mediante el diseño estadístico ANOVA Factorial, se evaluó si las variables independientes (Resistencia externa (Ω) y Área superficial Total del electrodo de Grafito cm^2) presentan un efecto significativo ($p < 0.05$) en la obtención de la eficiencia Coulombica (EC) con un nivel de confianza al 95 %.

Tabla 45

Análisis de varianza-ANOVA del efecto de la Resistencia externa y Área de superficie total del electrodo de Grafito en la Eficiencia Coulombica (%)

Fuente de Variación	SS	f	MS	F	p
Curvatr.	23.688	1	23.6882	0.64329	0.441164
(1)Resistencia (Ohmio)	934.568	1	934.568	25.37976	0.000508
(2)A _{ST} Grafito (cm ²)	11.021	1	11.021	0.29929	0.596325
1 by 2	16.567	1	16.567	0.44992	0.517565
Error Residual	368.233	10	36.8233		
Total SS	1354.077	14			

Nota: R²= 0.728; Rajus: 0.61928

En la Tabla 45 , se observa que el diseño estadístico aplicado resulta significativo ($p < 0.000508$) para el efecto principal de la Resistencia externa (Ω) en la obtención de la Eficiencia Coulombica (EC), en cambio la interacción de los efectos principales de Resistencia (Ω) y A_{ST}Grafito (cm²) y el efecto principal A_{ST}Grafito (cm²), no representaron significancia alguna ($p = 0.517565$) y ($p = 0.596325$) respectivamente. Por otra parte El R² = 0.728 indica que los efectos incluidos en el modelo ajustado (Resistencia, A_{ST}Grafito y su interacción) presenta un 73 % de ajuste lo que implica que el modelo se ajusta relativamente a los datos, esto se debe probablemente a la cantidad de ensayos realizados, según Pagura et al (2015) menciona que para un diseño factorial es necesario realizar máximo 4 réplicas, sin embargo la finalidad de esta investigación no solo fue probar en el diseño estadístico sino determinar el efecto de la Resistencia y el A_{ST}Grafito en el desempeño eléctrico de las Celdas de Combustible Microbiano utilizando como sustrato agua residual doméstica.

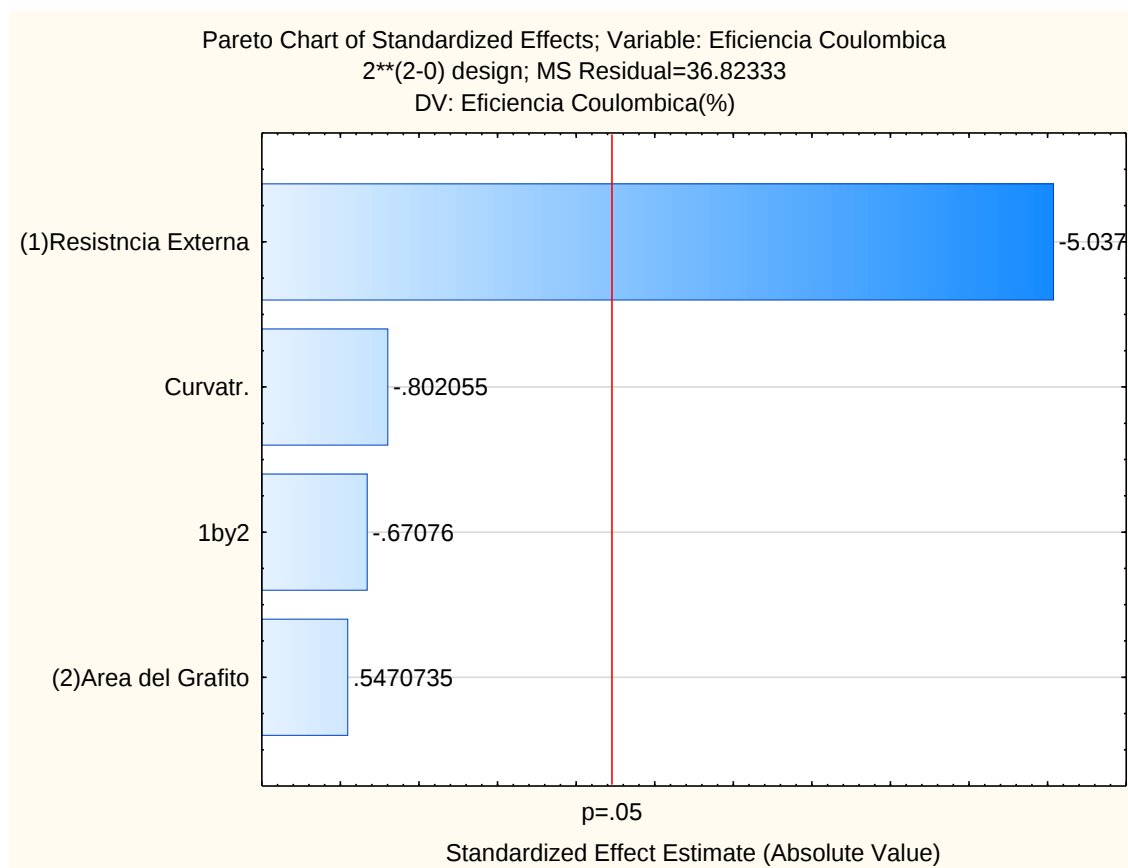


Figura 77. Significancia de los efectos principales Resistencia y A_{ST} Grafito (cm^2) en la Eficiencia Coulombica (EC)

De la Figura 77 del diagrama de Pareto, se representan los efectos estandarizados con ($p = 0.05$), donde se observa que el efecto principal (Resistencia externa Ω) es significativo, Por ende, el efecto principal de la Resistencia externa es un factor muy importante en la Eficiencia Coulombica (%), no obstante, el valor obtenido es negativo para el efecto principal (Resistencia externa) esto significa que a menor resistencia externa (Ω) nos conllevaría al aumento de la EC.

En tanto al efecto del A_{ST} Grafito (cm^2) este no presentó un valor significativo. Esto se debería por las características físicas del material, ya que autores como Liu et al (2004) menciona que un electrodo de barra de Grafito presenta una superficie liza, lo cual limitaría el crecimiento de la biopelícula y la adhesión de microorganismo

electrogénicos por completo en la superficie de grafito, ya que cada vez que se alimenta las CCM, la biopelícula formada sobre electrodo tiende a lavarse y tardar un tiempo en volver a formarse la biopelícula de microorganismo, al no ser este rugoso o poroso, a pesar de ser un buen conductor de electrones, por su baja porosidad este afectaría la generación de energía.

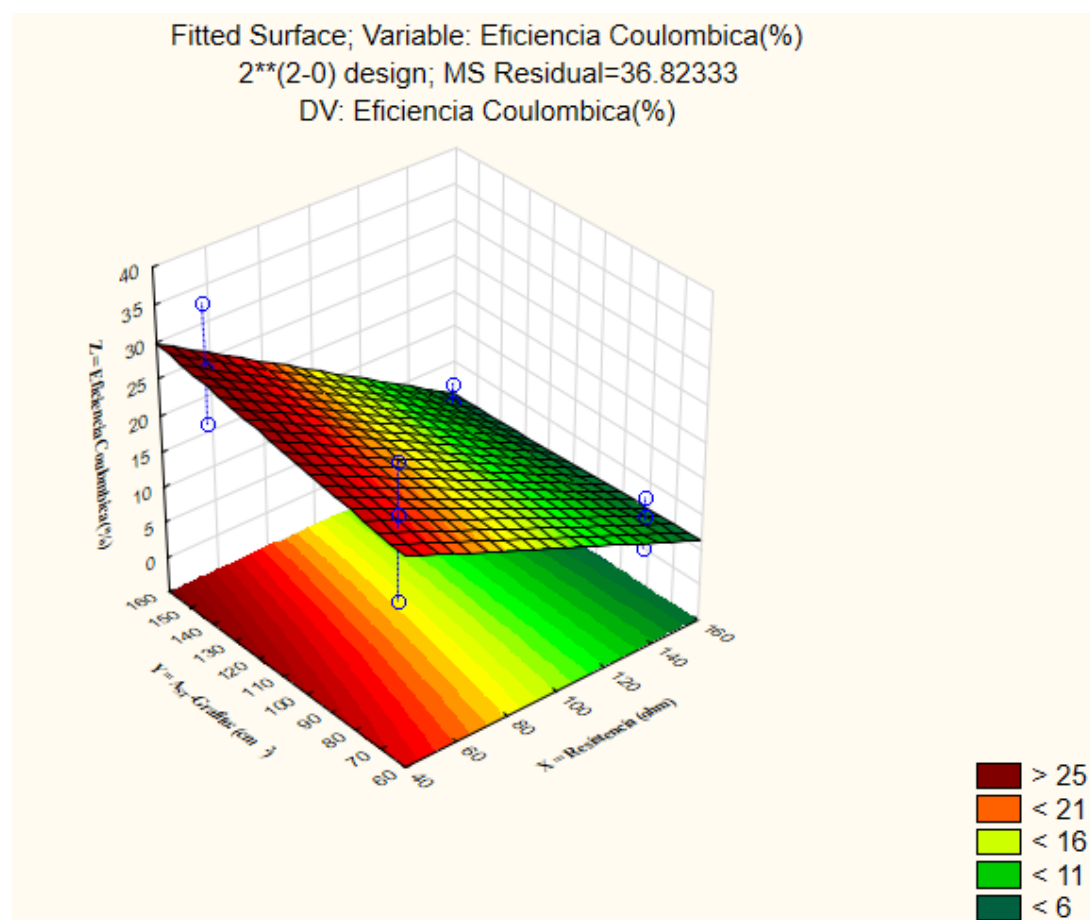


Figura 78. Diagrama de Superficie para la Eficiencia Coulombica

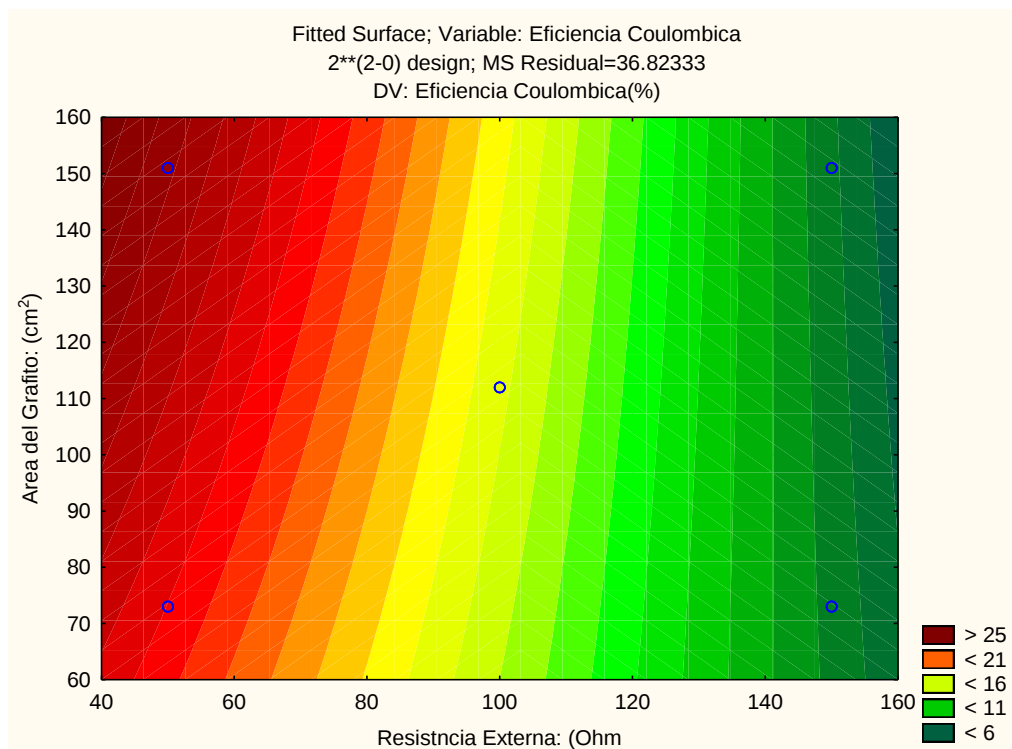


Figura 79. Curvas de contorno para la Eficiencia Coulombica

En la Figura 78 y 79 se grafica la superficie de respuesta y curvas de contorno, donde se observa que, en los intervalos estudiados, el mayor porcentaje de Eficiencia coulombica fueron obtenidas en la interacción de los efectos a una Resistencia externa de 50Ω y un $A_{ST}Grafito$ de 151 cm^2 . Las condiciones analizadas se ajustan a la Ecuación (16) arrojada por el diseño estadístico, utilizando este modelo se puede alcanzar una mayor eficiencia coulombica $> 25\%$.

Ecuación 15. Modelo lineal para la Eficiencia Coulombica

$$Z = 250.15 + 0.93 \cdot \text{Resistencia } (\Omega) + 1.45 \cdot A_{ST}Grafito \text{ (cm}^2\text{)} - 0.015 \cdot \text{Resistencia } (\Omega) \cdot A_{ST}Grafito \text{ (cm}^2\text{)}$$

Por otro lado, el efecto de la Interacción de la Resistencia (Ω) y el $A_{ST}Grafito$ (cm^2) corrobora a los resultados obtenidos en la Tabla 38, esto nos indica que la interacción de una Resistencia Menor y $A_{ST}Grafito$ (cm^2) mayor, se generara un mayor porcentaje de Eficiencia Coulombica.

4.5. Factores intervinientes en la eficiencia de las Celdas de Combustible Microbiano

4.5.1. Potencial de Hidrogeno

Cabe resaltar que el propósito de esta investigación no fue el incluir al pH como una variable independiente, sino como una de control. Sin embargo este parámetro influye en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de generación de electrones y protones. Los microorganismos únicamente pueden llevar a cabo sus funciones vitales en un intervalo de pH determinado. En el caso de los microorganismos electrogénicos, este intervalo está entre 6.5 - 8.5 (Behera y Ghangrekar, 2009). Por este motivo la mayoría de las CCM opera a un pH neutro. Por otro lado, algunos estudios han demostrado que el uso de sustratos con pH superiores a la neutralidad en las CCM, incrementan las eficiencias de disminución de materia orgánica y aceleran la transferencia de electrones entre la biopelícula y la superficie anódica debido al enriquecimiento de bacterias electroquímicamente activas (Ren, Chen, Li, Yang y Wang, 2018 y Liao et al., 2014). Sin embargo, cabe considerar que a pH entre 6.2 a 8 favorece la actividad del metabolismo metanogénico, generando una posible interacción sin trófica o de competencia con los microorganismos electrogénicos en la superficie anódica, por consiguiente, reducción de la producción de energía (Ferrer y Pérez, 2010).

4.5.1.1. Puesta en Marcha. Durante la puesta en marcha, las 5 CCM con diferentes configuraciones fueron aclimatadas con el Agua Residual de la PTAR Santa Clara, por un periodo de 9 días. Esto se hizo con la finalidad de que los microorganismos electrogénicos presentes en el agua residual y en la biopelícula de

los electrodos puedan aclimatarse al sustrato a utilizar. En la Tabla 46 se muestran los resultados de pH obtenidos durante la aclimatación.

Tabla 46

Valores de pH obtenidos en la aclimatación

CCM	Potencial de Hidrogeno (pH)	
	Afluente	Efluente
CCM1		6.6
CCM2		6.6
CCM3	7.2	6.6
CCM4		6.6
CCM5 PC		6.6

En la cámara anódica de las CCM, se observa una variación del pH de 0.6 unidades entre el afluente y efluente. Esta variación pudo deberse a que los microorganismos no electrogénicos presentes en el agua residual consumieron el sustrato en condiciones anaerobias produciendo ácidos según lo mencionado por Ren et al (2018) y Liao et al (2014). A si mismo se observa que las 5 CCM tuvieron un mismo pH en sus efluentes. A pesar de esta variación el pH se encontró dentro del rango establecido entre 6.5 y 8.5 para el desarrollo de los microorganismos electrogénicos tal como lo menciona Behera y Ghangrekar (2009).

4.5.1.2. Variación del pH durante la operación de las Celdas de Combustible Microbiano. Durante todo el periodo de investigación se monitoreo el comportamiento del pH, de forma interdiaria en las 5 CCM. Todas las CCM iniciaron simultáneamente con un mismo afluente en cada replica y por ende un igual pH (p.ej.

con pH de 6.9 para la primera réplica 1, seguido de pH 6.8 para la réplica 2 y como pH final de 7.1 para la réplica 3), cabe recalcar que cada repetición se hizo en semanas diferentes. En la Figura 80 se muestra la evolución del pH a lo largo de los tratamientos de cada una de las CCM en estudio.

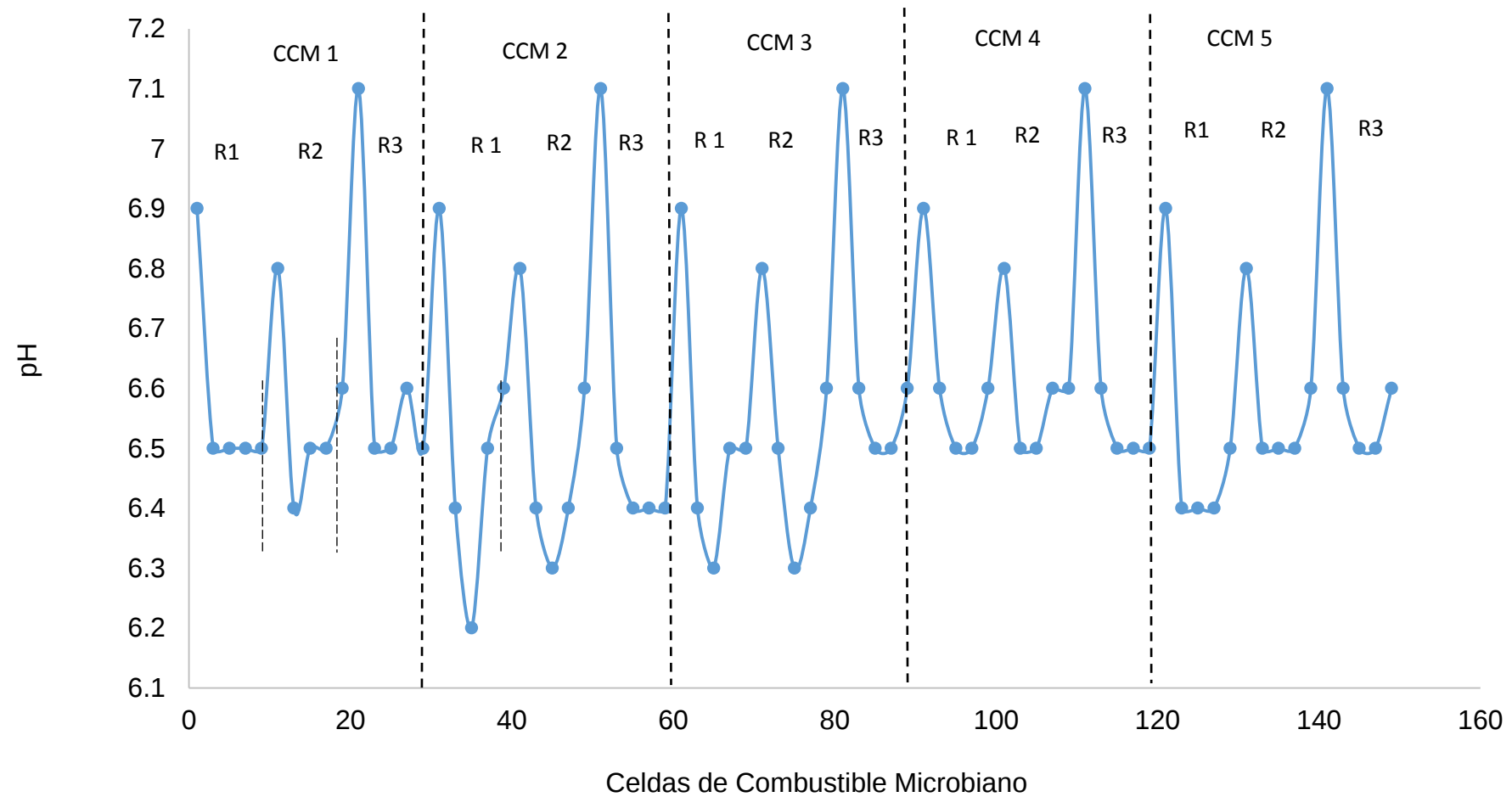


Figura 80. Valores de "pH" obtenidos durante la operación de las 5 CCM. R1: Replica 1; R2: Replica 2; R3: Replica 3

En la Figura 80, se puede observar que, a lo largo del estudio, el pH vario entre 6.2 y 7.1. En las 3 réplicas, la CCM4 y CCM1 tuvo un pH entre 6.5 - 7.1, este se encuentra dentro del intervalo óptimo para los microorganismos electrogénicos. En cambio en la CCM2 (R1, R2, R3), CCM3 (R1, R2) y CCM5 (R1) se observa un comportamiento anómalo ya que el afluente tuvo un pH inicial de 6.9 y 6.8, esta evolución pudo deberse a que a lo largo de cada tratamiento los microorganismos no electrogénicos consumieron el sustrato en condiciones anaerobias produciendo ácidos, lo que provoco una bajada del pH, esto se corrobora con los estudios realizados por Sarkar, Kannaiah, Subhash y Mohan (2013) donde se observa una caída de pH similar, acompañado de un aumento de la concentración de ácidos en la cámara anaerobia, durante los ciclos de una CCM que operaba en flujo Batch.

4.5.1.3. Variación del pH promedio a distintas configuraciones de Celdas de Combustible Microbiano. Se presenta en la Tabla 47 la variación promedio de pH para cada CCM y se observa que el pH disminuyo en el efluente en todas la CCM.

Tabla 47

Valores de pH promedio en las CCM

Celdas de Combustible Microbiano			pH	
CCM	Resistencia (Ω)	A _{ST} -Grafito (cm ²)	Afluente	Efluente
CCM1	150	151	7	6.5
CCM2	50	151	7	6.5
CCM3	50	73	7	6.6
CCM4	150	73	7	6.6
CCM 5	100	112	7	6.5

Así mismo, se observa que, la CCM3 y CCM4 en sus valores promedio de pH tuvieron una variación de 0.4 unidades entre su afluente y efluente. Mientras para las CCM1, CCM2 y CCM5 estas presentaron una variación de 0.5 unidades entre su afluente (7 Unid) y efluente (6.5 unid). Según Revelo (2013) menciona que esta disminución de pH en las cámaras anódicas de las CCM, es dada por la acidificación en el compartimiento anaerobio, cuando la difusión y la migración de los protones a través del puente salino hacia la cámara aerobia (cátodo) es lenta; da como resultado un pH ácido, ocasionando un descenso de la actividad microbiana electrogénica.

Sin embargo, a pesar de la variación, los valores promedio de pH obtenidos entre el afluente (7) y efluente (6.5) durante todo el tiempo de operación de las CCM, esta permaneció dentro del rango (6.5-8.5) para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia tal como lo menciona Behera y Ghangrekar (2009).

4.5.2. Temperatura del Agua

La temperatura es un parámetro operativo que se usa para controlar el crecimiento y el metabolismo de las poblaciones microbianas en las Celdas de Combustible Microbiano. En general el rendimiento de las CCM en la biodegradación de la materia orgánica de aguas residuales y generación de bioelectricidad varía de acuerdo a la temperatura en que se encuentre el proceso anaeróbico. Si bien algunos autores como Buitrón y Perez (2011) mencionan que existe una mejora en el desempeño de las CCM con un incremento en la Temperatura. El propósito de esta investigación no fue el incluir a la T °C como una variable independiente, sino como una de control. Los valores de temperatura durante la operación de las CCM cayeron en un rango mesofílico (15-35°C) obedeciendo a la temperatura del ambiente. Liu et al. (2005); Aelterman et al. (2006) y Oh y Logan (2007) mencionan que las CCM pueden trabajar en temperaturas moderadas entre 15 - 40 °C y tiene una ventaja

importante para que puedan producir electricidad a partir de cualquier agua residual y de esta manera remover la materia orgánica.

4.5.2.1. Puesta en Marcha. Durante la puesta en marcha, las 5 CCM con diferentes configuraciones fueron aclimatadas con el agua residual de la PTAR Santa Clara por un periodo de 9 días (En la Tabla 48 se muestran los resultados de temperatura obtenidos en la fase de aclimatación). Durante la puesta en marcha se observa un descenso de 2° C en la temperatura del efluente en todas las CCM, esto se debió porque se trabajó a temperatura ambiente.

Tabla 48

Valores de temperatura en la aclimatación

CCM	Temperatura del Agua (T ° C)	
	Afluente	Efluente
CCM1	24.1	21
CCM2		21.2
CCM3		21.1
CCM4		20.8
CCM5 PC		20.9

4.5.2.2. Variación de la temperatura del agua durante la operación de las Celdas de Comestible Microbiano. Durante todo el periodo de investigación se monitoreo la temperatura del agua de manera interdiaria. Todas las CCM iniciaron simultáneamente con un mismo afluente en cada replica y por ende con una misma temperatura (p.ej. con 24.3°C para la primera réplica 1, seguido de 24.1°C para la réplica 2 y 24.2°C para la réplica 3), cabe recalcar que cada repetición se hizo en semanas diferentes.

En la Figura 81 se presenta la evolución de la T°C agua por replica a lo largo de la operación de las 5 celdas, en el transcurso de la prueba la temperatura del agua

residual oscilo entre 21.4 a 25.4 °C, dando un comportamiento anómalo, lo ideal hubiera sido mantener la misma temperatura, pero se trabajó a temperatura ambiente y se sabe que la temperatura tiende a ser cambiante. Sin embargo, todas las CCM estuvieron en el rango óptimo de T°C (15-40) para que el sistema pueda trabajar de manera eficiente y así tener la biodegradación de la materia orgánica y la producción de bioelectricidad tal como lo mencionan Liu et al. (2005); Aelterman et al. 2006 y Oh y Logan, 2007.

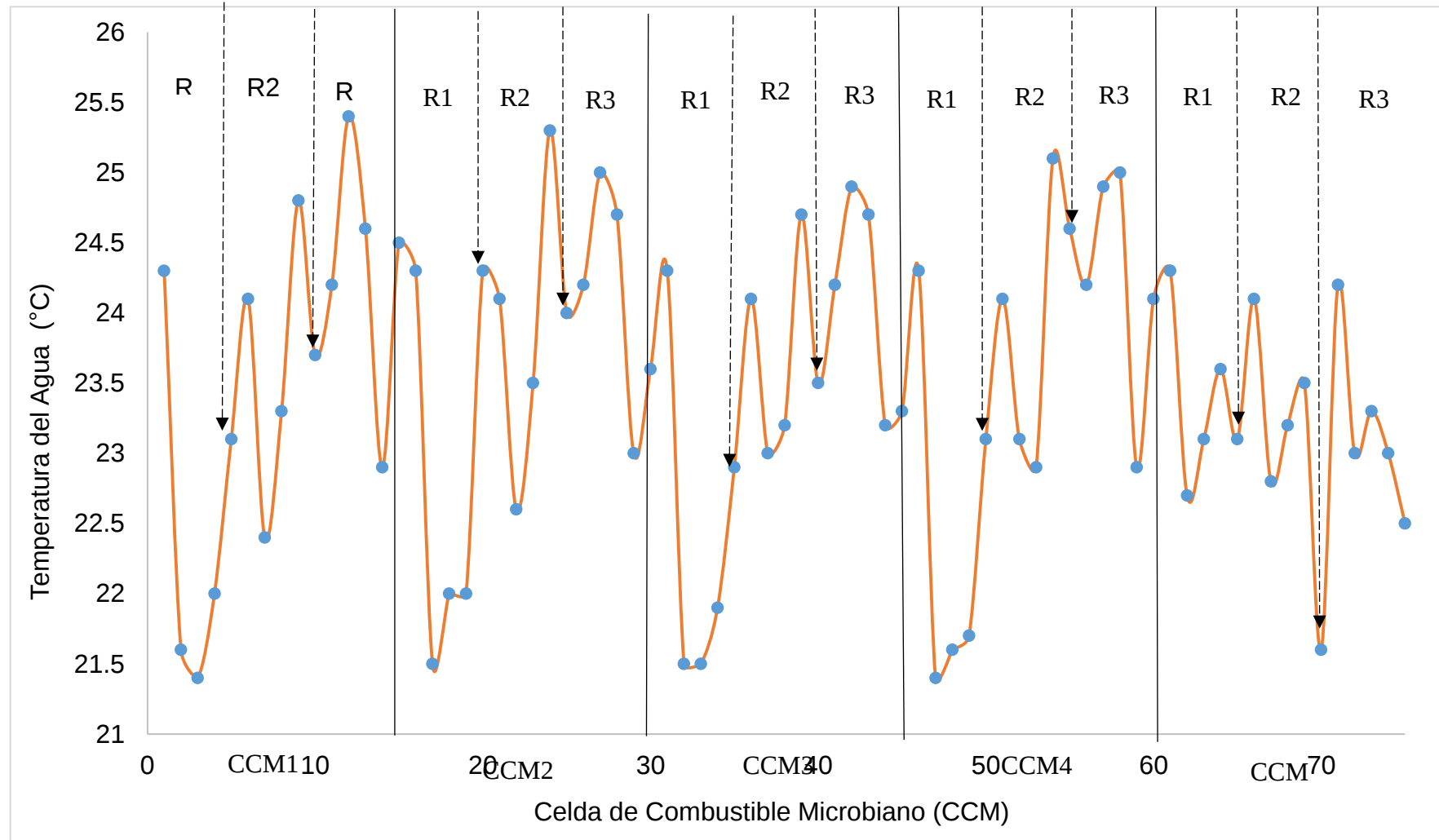


Figura 81. Valores de "T°C Agua " durante la operación de las 5 CCM. R1: Replica 1; R2: Replica 2; R3: Replica 3

4.5.2.3. Variación de la temperatura promedio en las diferentes configuraciones de CCM. Se muestra en Tabla 49 la variación promedio de la temperatura del agua para cada configuración de la CCM. Donde se observa que la CCM5 fue la que tuvo una variación de temperatura -1.3°C aproximadamente con la que inicio. Seguida la CCM1 quien presento -1.1°C de baja. Mientras que CCM 4 presento una leve variación de 0.5°C . Finalmente la CCM2 y CCM3 fueron las que mantuvieron a la $T^{\circ}\text{C}$ de inicio.

Tabla 49

Valores promedio de temperatura en las CCM

CCM	$T^{\circ}\text{C}$ Agua promedio	
	Afluente	Efluente
CCM1	24.3	23.2
CCM2	24.3	24.2
CCM3	24.3	24.0
CCM4	24.3	23.5
CCM5 PC	24.3	23.0

4.5.2.4. Influencia de la Temperatura del agua en la biodegradación de la Materia Organica. Torres, Rojas, Bautista y Iturbe (2005) señalan que el factor que más influye en la biodegradación de la materia organica es la Temperatura. El aumento de Temperatura (en un rango determinado) puede mejorar el crecimiento microbiano y su actividad por lo tanto estimula a la tasa de biodegradación, así que a bajas Temperaturas la degradación seria lenta. (Buitrón y Perez, 2011)

En la figura 82 se observa que la $T^{\circ}\text{C}$ tiene influencia en la remoción de la Materia organica expresada en DQO y DBO. Donde la CCM5 presenta una remoción baja en comparación con las demás celdas esto acompañado con una baja de la Temperatura, seguida de la CCM1. Según Feng et al. (2009) indica que, si se reduce

ligeramente la temperatura, esto afectaría en la remoción de la materia orgánica y por ende la producción de corriente eléctrica. Esto responde al comportamiento que tuvo la CCM5 y CCM1. Entonces se concluye que durante todo el proceso de generación de electricidad la temperatura con que se trabaja inicialmente debe de mantenerse constante, ya que si se varía podría influir de manera negativa en la eficiencia de la CCM.

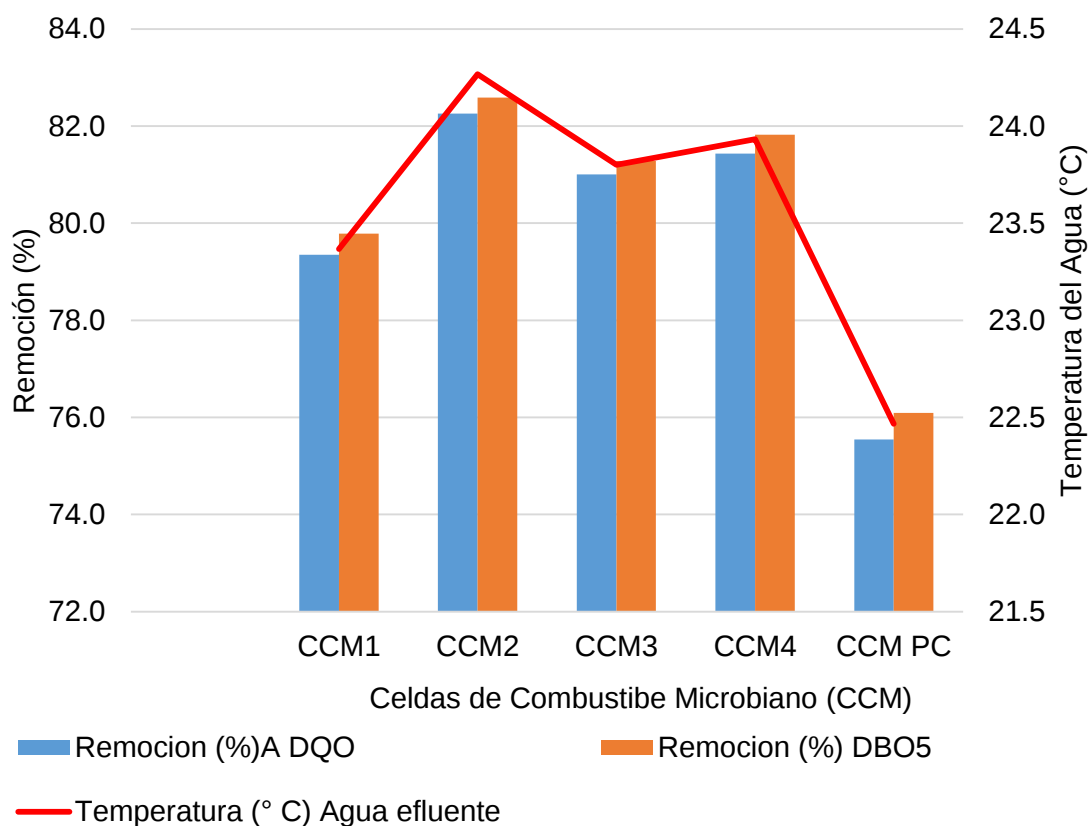


Figura 82. Influencia de la Temperatura del agua en la eficiencia de Remoción

CAPITULO V

CONCLUSIONES

De acuerdo a los ensayos de laboratorio se evaluó la biodegradación de la materia orgánica en términos de eficiencia de remoción a partir del agua residual domestica utilizando las Celdas de Combustible Microbiano, obteniendose una eficiencia de remoción de la materia orgánica mayores al 70 % (DQO y DBO₅), y en forma simultanea la producción de bioelectricidad, logrando voltajes de 41 a 392 mV, con Densidades de Potencia de 0.74 a 405 mW/m² y una Eficiencia Coulombica de 3.7 a 35.7 % resultando asi, un mayor voltaje a mayor área superficial del electrodo y menor resistencia externa

De acuerdo con los resultados obtenidos, con un nivel de confianza al 95%, se analizó la biodegradación de la materia orgánica en función a la Demanda Química de Oxigeno (DQO) considerando que los niveles promedio de concentración del agua residual domestica fueron altos (1490 mg/L), determinándose que las CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5 presentaron eficiencias de remoción promedio de 79.4, 82.3, 81, 81.4 y 75.5 % respectivamente, siendo la CCM2 quien tuvo mayor porcentaje de remoción de materia orgánica en comparación con las demás celdas, quienes presentan valores cercanos.

Así mismo, el análisis de la eficiencia de remoción de materia orgánica en función a la Demanda Biológica de Oxigeno (DBO₅), considerando que los niveles promedio de concentración del agua residual domestica fueron altos (867 mg/L), determinándose que las CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5 presentaron eficiencia de remoción promedio de 79.8, 82.6, 81.3, 81.8 y 76.3 % siendo la CCM2 quien obtuvo

mayor porcentaje de remoción de materia orgánica en comparación con las demás celdas, quienes presentan valores cercanos.

Por otro lado, mediante la simulación y predicción por superficie de respuesta con un diseño factorial 2^2 al 95 % de nivel de confianza, se determinó que al operar con resistencia externa de 50 ohm (menor) y el área superficial del electrodo 151 cm² (mayor) se generó una mayor producción de bioelectricidad. Además, mediante el diagrama de Pareto se determinó que el efecto principal de mayor significancia fue la interacción de la Resistencia externa y Área superior del electrodo, determinándose que el Voltaje, Densidad de Potencia y Eficiencia Coulombica fueron mayores en las CCM2 quien trabajó con una resistencia externa de 50Ω y área superficial del electrodo 151 cm².

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones enfatizar en el diseño experimental del montaje, específicamente en las dimensiones del mismo.

Además de lo anterior se propone llevar a cabo un estudio profundo de la parte microbiológica o la comunidad microbiana del sistema, puesto que este es el pilar de las celdas de combustible microbiano, la inoculación de un consorcio de microorganismos puede mejorar y optimizar el sistema, proporcionando así una mayor generación bioelectricidad.

Se recomienda que, en las siguientes investigaciones de celdas de combustible microbiano, se pueda monitorear el comportamiento de la remoción de la materia orgánica durante intervalos de tiempo en toda la etapa de operación de la investigación, para así ver el comportamiento de la generación de bioelectricidad.

Por razones logísticas se recomienda que los análisis de los parámetros físico químicos sean realizados en el menor tiempo posible, pues los resultados nos demoraban en llegar más de 7 días en todos los laboratorios acreditados por INACAL a los que se consultó, esto hizo que el tiempo de la investigación se extienda considerablemente pues se necesitaba conocer los valores para poder continuar con la siguiente prueba experimental.

Los parámetro de conductividad, DBO y DQO volátil no fueron considerados, debido a que no fue uno de los objetivos principales en esta investigación, sin embargo se recomienda para futuras investigación la medición de estos parámetros ya que este nos permitirá ver la calidad del efluente tratado después del sistema de Celdas de Combustible Microbiano, así mismo se recomienda implementar los equipos de análisis para DQO y DBO en los laboratorios de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, para facilitar y reducir los costos de los análisis de los

parámetros mencionados. Por otra parte la conductividad eléctrica nos indica la cantidad de sales disueltas en el agua residual y identificar la conductividad de electrones del electrolito, por ello se recomienda medir un pre y pos análisis.

Finalmente se apreció que una mayor parte de la materia orgánica en el agua residual se eliminaba mediante procesos que no generan electricidad. Para aumentar la generación de bioelectricidad del sistema, tendremos que encontrar métodos de aumentar la fracción de la materia orgánica que se convierte en electricidad. Sin embargo, la materia orgánica en las aguas residuales es esencialmente libre. Mientras se logre la biodegradación de la materia orgánica, mediante la generación de electricidad u otros métodos, se logrará el objetivo del tratamiento de aguas residuales.

REFERENCIAS

- Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H., Boon, N., & Verstraete, W. (2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environ Sci Technol*, 40:3388–94.
- Ah, Y., & Logan, B. (2013). Domestic wastewater treatment using multi-electrode continuous flow MFCs with a separator electrode assembly design. *Applied Microbiology and biotechnology*, 409-416.
- Allen, R., & Bennetto, H. (1993). Microbial fuel-cells: electricity production from carbohydrates. *Appl Biochem Biotechnol*, 39/40:27–40.
- Alzate, G. L., Fuentes, A. C., Alvarez, G. A., & Sebastian, P. (2008). Generacion de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe*, 33(7), 503-509.
- Antonili, E. (2015). Composite materials for polymer electrolyte membrane microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 69, 54 - 70. doi:10.1016/j.bios.2015.02.013
- Antonio, T. (23 de Febrero de 2018). *Analisis de Aguas Residuales*. Obtenido de http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf
- Arriaga, E. B., Romano, J. H., Sanchez, L., Garces, R. A., Bahena, E., Perez, O., & Chavez, G. E. (2018). Domestic wastewater treatment and power generation in continuous flow air-cathode stacked microbial fuel cell: Effect of series and parallel configuration. *Journal of Environmental Management*, 232-241. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.007>
- Asociacion de Ingenieros Sanitarios de Antioquia . (1993). *Tratamiento Biologico de Aguas Residuales*. Medellin: INSA.

- Bayona, R. M., & Gutierrez, E. A. (2013). Un Mecanismo de Supervivencia de *Helicobacter pylori*. 335-348. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a07.pdf>
- Behera, M., & Ghangrekar, M. (2009). Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresour Technol*, 5114-5121.
- Bermudez, R. C., Rodriguez, S., Mirna de la C, M., & Adis, I. T. (2007). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales liquidos para la obtencion de biogas. *Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente*, 1-11. Obtenido de <https://docplayer.es/11450442-Ventajas-del-empleo-de-reactores-uasb-en-el-tratamiento-de-residuales-liquidos-para-la-obtencion-de-biogas.html>
- Bond, D., & Lovley, D. (2003). Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Applied And Environmental Microbiology* , 1548-1555.
- Buitrón, G., & Perez, J. (2011). Produccion de electricidad en celdas de Combustible Microianas utilizando agua residual: efecto Distancia entre electrodos. *tip.revista especializada en ciencias quimico biologicas*, vol.14,no1,p.5.
- Caicedo, F. (2006). Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB Piloto para el tratiento de lixiviados . *Universidad Nacional de Colombia*.
- Carrion, C. G. (2008). *Manual Tecnico de Difusion: Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales para ALberguez en zonas Rurales*. Lima: Ministerio de Comercio Exterior y Turismo.
- Castillo, A. (2002). Caracterización de lodos Anaerobios y aguas residuales. En U. N. Colombia, *Digestión Anerobia* (págs. 104-167). Bogota, Colombia: UNIBIBLOS.

- Cervantes, A. C. (2011). *Biodegradación de la materia orgánica de aguas residuales y producción de bioelectricidad en una Celda de Combustible Microbiana*. Mexico: UNAM.
- Chae, K., Choi, M., Lee, J., Kim, K., & Kim, I. (2009). Effect of different substrate on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 100, 3518-3525.
- Chang, I. S., Moon, H., Jang, J. K., & Kim, B. H. (2005). Improvement of a microbial fuel cell performance as a BOD sensor using respiratory inhibitors. *Biosensors and Bioelectronics*, 18, 1856-1859.
- Chaudhuri, S. K., & Lovley, D. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 21(10): 1-4.
Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12960964>
- Chernicharo, C. (2013). *Reactores Anaerobios* (1ra edición ed.). San Juan de Pasto: Universitaria, Universidad de Nariño.
- Comisión Europea [CE]. (2003). *Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales Adaptados a las pequeñas y medias colectividades (500 – 5.000 H. E.)*. Francia: Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas.
- Correa, V., & Gordi, J. (2015). *Microorganismos bioelectrogenicos*. Obtenido de Bioelectrogenesis:
https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2015/143673/TFG_lissetdelavegacorrea.pdf
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogota-Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Crombet, G. S., Perez, P. N., & Avalos, R. A. (2013). Caracterización de las Aguas residuales de la comunidad " Antonio Maceo" de la Universidad de Oriente.

Revista Cubana de Química, 134-142. Obtenido de <https://www.redalyc.org/html/4435/443543735003/>

- Delaney, G. B., Mason, J., Roller, S., Stirling, J., & Thurston, C. (1984). (1984). Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. 2. Performance of fuel cells containing selected microorganism-mediator-substrate combinations. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Biotechnology*, 13-27. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/jctb.280340104>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 464-482.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2011). Material empleado para la construcción de una celda de combustible microbiano.
- Estrada, A. E. (2014). *Generacion de Energia ELectrica a partir del Tratamiento de Aguas Residuales por medio de Bioceldas*. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua.
- Falcón, A., Lozano, E., & Juárez, K. (2009). Bioelectricidad. *BioTecnología*, 62-78.
- Feng, Y., Lee, H., Wang, X., & Liu, Y. (2009). Electricity generation in microbial fuel cells at different temperature and isolation of electrogenic bacteria. *In Power and Energy Engineering Conference-APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 1-5.
- Ferrer, Y., & Pérez, H. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43 (1), 9-20. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120681002>
- Ferrero, J. (1974). *Depuración Biológica del Agua*. Mexico: Alambra.

- Fisheries and aquaculture management division fisheries and aquaculture management division. (1990). *Training manual on gracilaria culture and seaweed processing in china*. China AB730.
- Freedman, Y., & Zemansky, S. (2009). *Fisica Universitaria, con Fisica Moderna* (Vol. 2). Mexico: D.R. © 2009 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V. Obtenido de https://www.ucursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2__ed_12%28Sears-Zemansky%29.pdf
- Gadini, M. (2009). *Reutilizacion del agua residual tratada en la cerveceria del valle S.A.(Tesis de Pregrado)*. Santiago de Cali: Universidad Autonoma de Occidente. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10614/6259>
- Garcia, C. F. (2014). *Minimizacion de la carga organica de efluentes municipales tipicos empleandi Celdas de Combustibles Microbianas (Tesis de Pregrado)*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Garga, B. E. (2015). *Tecnologia de membraans en pilas de combustiblemicrobianas*.
- Gil, Cheol, G., & etal. (2003). Operational parameters affecting the performance of a mediator - less microbial fuel cell. 327-334.
- Gonzales, S., Acosta, E., Davila, C., Rodriguez, S., & Santana, Y. (2007). *Ejercicios resueltos de econometria. El modelo de regresion multiple*. Madrid: Delta, Publicaciones Universitarias.
- Grady, C., Daigger, G., & Lim, H. (1999). *Biologica Wasterwater Treatment*. New York: 2n ed; Marcel Dekker.
- Ha, Thi, P., Tae, B., & Chang, I. s. (2007). Performance and Bacterial Consortium of Microbial Fuel Cell Fed whit Formate. *ENERGY & FUELS* , 164-168.

- Habermann, W., & Pommer, E. (1991). Biological fuel Cells with sulphide storage capacity. *Applied Microbiology Biotechnology*, 35: 128-133. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00180650>
- He, Z., & Angenent, L. T. (2006). Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells. *Environmental and Chemical Engineering*, 18: 19-20. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/elan.200603628>
- He, Z., Minteer, S., & Angenent, L. (2005). Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environ SciTechnol*, 5262–5267. doi:10.1021/es0502876
- Helmenstine, A. (2016). Table of electrical resistivity and conductivity. *consultado el 22 de Noviembre del 2018*, <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608494>.
- Hernandez, A. (1992). Depuración de Aguas Residuales. Madrid: Colegio de Ingenieros, caminos, canales y puertos.
- Hernández, F. F., de los Ríos, A. P., Salar, G. M., Ortiz, M. V., Lozano, B. L., Godínez, C., & Quesada, M. J. (21 de Mayo de 2015). Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology*, 138, 284-297. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.022>
- Hernandez, M. A. (2001). *Depuración y Desinfección de Aguas Residuales* (5Ta ed.). Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Holliger, C., & A, Z. (1996). Anaerobic biodegradation of hydrocarbons Current Opinion in Biotechnology. *Biotechnology advances*, 7: 326-330.

- Huggins, T., Fallgren, P., & Jin, S. R. (2013). Energy and performance comparison of microbial fuel cell and conventional aeration treating of wastewater. *Microb Biochem Technol*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4172/1948-5948.S6-002>
- Iyovo, D., & Du, G. y. (2010). Sustainable Bioenergy Bioprocessing: Biomethane Production, Digestate as Biofertilizer and as Supplemental Feed in Algae Cultivation to Promote Algae Biofuel Commercialization. *J Microbial Biochem Technol*, 2:100-106. doi:doi:10.4172/1948-5948.1000032
- Jang, J., Pham, T., Chang, I., Khan, K., Moon, H., Cho, K., & Kim, B. (2004). Construction and operation of a novel mediator and menbrae less microbial fuel Cell. *Biochem*, 1007-1012.
- Jincheng, W., Peng, L., & Xia, H. (2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(20), 9335-9344. doi:10.1016/j.biortech.2011.07.019
- Jumma, S., Patil, N., & Pandhre, R. (2016). Microbial Fuel Cell: Design and Operation. *Research and Reviews: Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32-39. Obtenido de <http://www.rroij.com/open-access/microbial-fuel-cell-design-and-operation-.pdf>
- Kargi, F., & Eker, S. (2007). Electricity generation with simultaneous wastewater treatment by a microbial fuel cell (MFC) with Cu and Cu–Au electrodes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 658-662.
- Kiely, P., Regan, J., & Logan, B. (2011). The electric picnic: Synergistic requirements for exoelectrogenic microbial communities. *Current Opinion in Biotechnology*, 378-385.
- Kumar, S., & Babu, G. K. (2012). A study on the electricity generation from the cow dung using microbial fuel cell. *Department of Biotechnology, Singhania*

- University, 3(4) :442- 447. Obtenido de <http://www.jbiochemtech.com/index.php/jbt/article/view/281/282>
- Lache, M. A. (2018). *Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generacion de energia electrica*. Bogota D.C.: Fundación Universidad de Americas Facultad de Ingenieria Quimica.
- Lansiti, E., & Niehaus, F. (2008). *Repercusiones de la produccion de Energia en la Concentracion de Gases de Efecto Invernadero en la Atmosfera*. Viena: Boletin del Organismo Internacional de Energia Atómica.
- Larios, M. F. (2015). *Las aguas Residuales y sus consecuencias en el Perú*. Lima: Universidad San Ignacio de Loyola. Obtenido de <http://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- Lee, J., Phung, N. C., Kim, B., & Sung, H. (2003). Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16s rDNA analyses. *Microbiol*, 223: 185-191.
- Li, F., Yin, C., Sun, L., Li, Y., Guo, X., & Song, H. (2017). Synthetic Klebsiella pneumoniae-Shewanella oneidensis Consortium Enables Glycerol-Fed High-Performance Microbial Fuel Cells. *Biotechnology Journal*, 1-8. doi:10.1002/biot.201700491
- Liang, & Peng. (2007). Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells. *applied microbiology and biotechnology*, 551-558.
- Liao, Q., Zhang, J., Li, J., Ye, D., Zhu, X., Zheng, J., & Zhang, B. (2014). Electricity generation and COD removal of microbial fuel cells (MFCs) operated with alkaline substrates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33): 19349-19354.

- Liu(a), H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. (2004a). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environ. Sci. Technol*, 3, 2281-2285.
- Liu, H., & Logan, B. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science Technology*, 14:38.
- Liu, Z., Liu, J., Zhang, S., & Su, Z. (2009). Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates. *Biochemical Engineering Journal*, 45, 185-191.
- Logan, B. (2008). Microbial Fuel Cells.
- Logan, B. E., & Regan, J. (2006). Microbial fuel cells and challenges and applications. *Environ Sci Technol*, 17, 5172- 5180.
- Logan, B., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337(6095):686-690.
- Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol*, 41:3341-3346.
- Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science y Technology*, 40(17):5181–5192.
- Lovley, D. R. (2008). The microbe electric: Conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology*, 19: 564-571.
- Luo, & Yong. (2010). Power generation from fuel using the microbial fuel cell. 190-194.

- Luo, Y., Zhang, R., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 759–764. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409019001?via%3Dihub>
- Madigan, M. T., Martinko, J., Bender, K., Buckley, D., & Sthal, D. (2004). *Brock. Biología de los microorganismos*. Pearson Educación.
- MatWed and Automation Creations. (2017). *Online materials información*. <http://www.matweb.com/search/materialGroupSearch.aspx>.
- Mayo, P. E. (2010). *Proyecto Ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Xochiapa (Tesis de Pregrado)*. Universidad Veracruzana, Xalapa. Obtenido de <https://docplayer.es/14608051-Universidad-veracruzana-facultad-de-ingenieria-civil-region-xalapa-proyecto-ejecutivo-de-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-para-la-localidad.html>
- Mejia, J. (1999). *Diseño, Construcción y evaluación de un Reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales. (Tesis Doctoral)*. Cochabamba. Bolivia: Facultad de Ciencias y Tecnología Universidad Nacional de San Simón.
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal, Reuse*. McGraw-Hill.
- Mendez, M. F., & Muñoz, F. O. (2010). *Propuesta de un Modelo Socioeconómico de Decisión de uso de Aguas Residuales Tratadas en Sustitución de Agua Limpia para áreas verdes (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional de Ingeniería , Lima. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/217>
- Metcalf, & Eddy. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: S.A. McGraw-Hill.

- Miguel, P. A. (2014). *Electrotecnia* (Vol. 6). Madrid: Paraninfo. Obtenido
- Min, B., & Logan, B. E. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, 38: 5809- 5814.
- Min, B., Cheng, S., & Logan, B. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*, 1675–1686. doi:10.1016/j.watres.2005.02.002
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [VIVIENDA]. (2017). *Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento*. Obtenido de http://www3.vivienda.gob.pe/ejes/agua_saneamiento/agua_y_saneamiento.html
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (7 de Junio de 2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM .- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. *El Peruano*, págs. 10-19. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Moeller, C. G., Sandoval, Y. L., Ramirez, C. E., Cardoso, V. L., Escalante, E. V., & Tomasini, O. A. (2009). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Lodos Activados* (Septima ed.). Cuernavaca, Morelos- Mexico: Tecnológico Educativa.
- Moon, H., Chang, I. S., Jang, J. K., & Kim, B. H. (2005). Residence time distribution in microbial fuel cell and its influence on COD removal with electricity generation. *Biochemical Engineering Journal*, 27, 59-65. doi:10.1016/j.bej.2005.02.010
- Mora, C. A., & Bravo, M. E. (2017). Caracterización molecular del biopelícula anódica. *Acta Biológica Colombiana*, 77-84.

- Navarro, F. A., Sanchez, G. J., & Collado, F. D. (1999). *Mineria, Industria y Medio Ambiente en la Cuenca Mediterranea*. Barcelona: Universidad de Almeria.
- Nazar, J. (2012). Biofilms bacterianos. *revista de otorrinolaringologia y cirugia de cabeza y cuello*, 161-172.
- Nemerow, N. L., & Bascaran, G. M. (1997). *Aguas Residuales Industriales: Teorias, aplicaciones y tratamiento*. Madrid : Blume.
- Nevin, K. R., Covalla, S., Jhnson, J., Woodard, T., Orloff, A., Jia, H., & Lovley, D. (2008). Power output and coulombic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. *Environmental Microbiology*, 2505-2514. doi: 10.1111/j.1462-2920.2008.01675.x.
- Nimje, V., Chen, C., Chen, H., Chen, C., Huang, Y., Tseng, M., & Chang, Y. (2012). Comparative bioelectricity production from various wasterwaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *shewanella oneidensis*. *Bioresources technology*, 315-323.
- Ocola, S. J. (27 de Mayo de 2010). *Autoridad Nacional del Agua*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Riego
- Oh, S., & Logan, B. E. (2006). Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. *Microbiol. Biotechnol*, 70, 162-169.
- Oh, S., Min, B., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol*, 38, 4900-4904.
- Organismo de Evaluacion y Fiscalizacion Ambiental [OEFA]. (2014). *Fiscalizacion Ambiental en Aguas Residuales*. Lima: Cyclus Print Matt.

- Ortiz, G., Moreno, L., & Jiménez, J. (2014). Bacterias eléctricas. 74-77. Obtenido de https://www.upo.es/moleqila/export/sites/moleqila/documentos/Articulo_destacado_numero_4.pdf
- Osorio, C. P., & Peña, D. (2002). *Determinacion de la relacion DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con poblacion menor a 25.000 habitantes en la VIII region*. Panachlor S.A. (2015). Obtenido de [http://panachlor.com/wp-content/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-\(TDS\)-Electroconductividad-\(EC\).pdf](http://panachlor.com/wp-content/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-(TDS)-Electroconductividad-(EC).pdf)
- Pant, D., Van, B. G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresour Technol*, 1533-1543.
- Park, H. D., & Zeikus, G. J. (2002). Improved Fuel Cell and Electrode Designs for Producing Electricity from Microbial Degradation. *Department of Biochemistry and Molecular Biology, Michigan State University, East Lansing, MI 48824*, 349-355. doi:10.1002/bit.10501
- Park, Y., Park, S., Nguyen, V. K., Kim, J., Kim, H., Kim, B., & Lee, T. (2016). Effect of gradual transition of substrate on performance of flat- panel air-cathode microbial fuel cells to treat domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 226:158-163. doi:10.1016/j.biortech.2016.12.022
- Parkash, A. (2015). Desing and fabricación of a double chamber microbial fuel cell for voltage generation from Biowaste .
- Passos, V. F., & al, e. (2016). Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. *SCIENTIA AGRICOLA* , vol.73,no.5, p. 424-428.

- Patil, Sunil, A., & et al. (2009). Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. 5132- 5139.
- Pineda, M. A., & Rosas, T. M. (2016). *Estado del Arte en Celdas de Combustible Microbianas (CCM) para la Producción de Bioenergía*. Bogotá. D.C: UNIVERSIDAD DISTRITAL francisco José de caldas facultad del medio ambiente y recursos naturales proyecto curricular de ingeniería ambiental. obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3837/2/pinedamar%c3%adnanadelpilarrosastafurmarthalizeth2016.pdf>
- Potter, M. C. (14 de Julio de 1911). Electrical Effects accompanying the Decomposition of Organic Compounds. *Communicated by Dr. A. D. Waller, F.R.S.*, 1-17., 260-276. Obtenido de Obtenido de <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/84/571/260>
- Puigagut, J., & Corbella, C. (2018). Improving domestic wastewater treatment efficiency with constructed wetland microbial fuel cells: Influence of anode material and external resistance. *Science of The Total Environment*, 1406-1414. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.084>
- Rabaey, k., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 292-298. doi:10.1016/j.tibtech.2005.04.008
- Rabaey, K., Angenent, L., Schroder, U., & Keller, J. (2009). *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*. Londres, Reino Unido: IWA Publishing.

- Rabaey, K., Lissens, G., Siliciano, S., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol*, 25: 1531-1535.
- Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverte.
- Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverte. S.A.1996.
- Ramos, A. C. (2008). Aguas Residuales Generadas en Hospitales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXIX(2), 56-60. Obtenido de <https://studylib.es/doc/7634803/aguas-residuales-generadas-en-hospitales?fbclid=IwAR1kX8URB9tJ6U9C6JcPdfNqJmrSHrWIOmkDW2FIXdxOiknHCyhMAW4czC8>
- Ren, Y., Chen, J., Li, X., Yang, N., & Wang, X. (2018). Enhanced bioelectricity generation of air-cathode buffer-free microbial fuel cells through short-term anolyte pH adjustment. *Bioelectrochemistry*, 120: 145-149.
- Revelo, D., 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 (26) 17-28.
- Rinaldi, A., Mecheri, B. G., Nardo, P., & Traversa, E. (2008). Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review. *Energy y Environmental Science*, 417-429. doi:10.1039/b806498a
- Ringeisen, B., Henderson, E., Wu, P., Pietron, J., Ray, R., Little, B., . . . Meehan, J. M. (2006). High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environ Sci Technol*, 2629–2634. doi:10.1021/es052254w

- Rismani, H., D, A., M, S., Yu, Z., A, B., & Olli, D. (2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 278-283.
- Rodriguez, A. (2009). *Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas comunidades (Tesis de Pregrado)*. Mexico: Universidad de Sonora.
- Rojas, R. (2002). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Curso Internacional "Gestion Integral de Tratamiento de Aguas Residuales"* (págs. 1-19). Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Romero, J. ((2008).). *Tratamiento de aguas residuales* (Capitulo 10 ed.). Colombia.
- Romero, M. A., Vásquez, J., & Lugo, G. A. (2012). Bacterias, Fuente de energia para el futuro. *Tecnura*, 16 (32), 117-142. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257024143011>
- Sacco, N., Bonetto, M. C., & Corton, E. (2010). Generacion de Electricidad en una Celda de Combustible Microbiana Mediana Utilizando Micro-anodos Descartables. *INAOEP*, 388-392.
- Salazar, A. (1993). *Teoria del Tratamiento Biologico*. Medellin: AINSA.
- Samayoa, L. (2016). *Trtamiento de aguas Residuales Municipales en una Celda de Combustible Microbiana Utilizando Compositos de Espuma de poliuretano, grafito y Polipirrol (Pregrado)*. Mexico: UNAM. Obtenido de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8443>.
- Santoro, C. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *A review*, 225-244.
- Sarkar, O. R., Kannaiah, G. G., Subhash, V. S., & Mohan, V. (2013). Relative effect of different inorganic acids on selective enrichmentof acidogenic biocatalyst for

- fermentative biohydrogen production from wastewater. *Bioresource Technology*, 321-331. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.021>
- Sawyer, C., Carty, P., & Parking, E. (1994). *Chemistry for environmental engineering*. New York: Graw Hill.
- Sears, F. W., Ford, A. L., & Freedman, R. A. (2005). *Fisica Univerisitaria*. Pearson Educación.
- Shapiro, M., & Wilk, B. (1965). *An Analysis of Variance Test for Normality(Complete Samples)*. *Biometrika*.
- Sharma, Y., & Li, B. (2010). Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC). *international journal of hydrogen energy*, 3789–3797.
- Shukla, A., Suresh, P., Berchmans, S., & Rejendran, A. (2004). Biological Fuel Cell and Their Applications. *Current Science*, 87(4), 455-468. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/242092112_Biological_Fuel_Cells_and_Their_Applications
- Song, H., Liming, S., Yuanxiu, L., Xuewu, G., & Changji, Y. (2017). Synthetic *Klebsiella pneumoniae*-*Shewanella oneidensis* consortium enables glycerol-fed high-performance microbial fuel cells. *Biotechnology Journal*.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS]. (2015). *Diagnostico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ambito de operación de las entidades prestadoras de servicios de Saneamiento*. SUNASS. Lima: SUNASS. Obtenido de <https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>

- Torres, C., Kato, M. A., Lee, H.-S., Parameswaran, P., Krajmalnik, B., & Rittmann, B. (2010). Akinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-respiring bacteria. *Microbiology*, 34: 3-17.
- Torres, L., Rojas, N., Bautista, G., & Iturbe, R. (2005). Effect of temperatura, and surfactant's HLB and dose over the TPH diesel biodegradation process in aged soils. *Process Biochemistry*, 3296-3302.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2007). *Introducción a la Microbiología*. Buenos Aires: Medica panamericana.
- Tremblay, P., & Zhang, T. (2015). Electrifying microbes for the production of chemicals *Front. Microbiol*, 6:201. doi:10.3389/fmicb.2015.00201
- Valentina, V., & al, e. (2016). Increased power generation from primary sludge by a submersible microbial fuel cells and optimun operation conditions. *BIOPROCESS AND BIOSYSTEMS ENGINEERSING*, 635-642.
- Veritas. (2008). *Manual para la Formacion en Medio Ambiente*. Valladolid: Lex Nova.
- Wang, C., Chen, W., & Huang, R. (2010). nfluence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by Escherichia coli. *ScienceDirect*, 35(13):7217-7223. Obtenido de http://biotech.niu.edu.tw/files/writing/476_09e95a84.pdf
- Wang, Yun-Kun, & al., e. (2014). A novel electrochhimical membrane bioreactor as a potencial net energy produce sustainable wastewater treatment. *Scientific Reports*, 1864.
- Wu, S., He, W., Yang, W., Ye, Y., Huang, X., & Logan, B. (15 de Julio de 2017). Combined carbon mesh and small graphite fiber brush anodes to enhance and stabilize power generation in microbial fuel cells treating domestic wastewater.

Journal of Power Sources, 348-355. Obtenido de
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.041>

Zhou, & Minghua. (2014). Bioelectrochemistry of Microbial fuel Cell and their Potential Applications in Bioenergy. 131-152.

Zhu, L., & Kocher, W. (1998). *"Biofiltration of Benzene Contaminated Air Streams Using Compost-Activated Carbon Filter Media*. Mexico.

ANEXOS

8.1. Anexo I- Implementación del Proyecto de Investigación

8.1.1. Construcción de las Celdas de Combustible Microbiano



Figura 83. Enaves de Vidrio para las camaras de las CCM

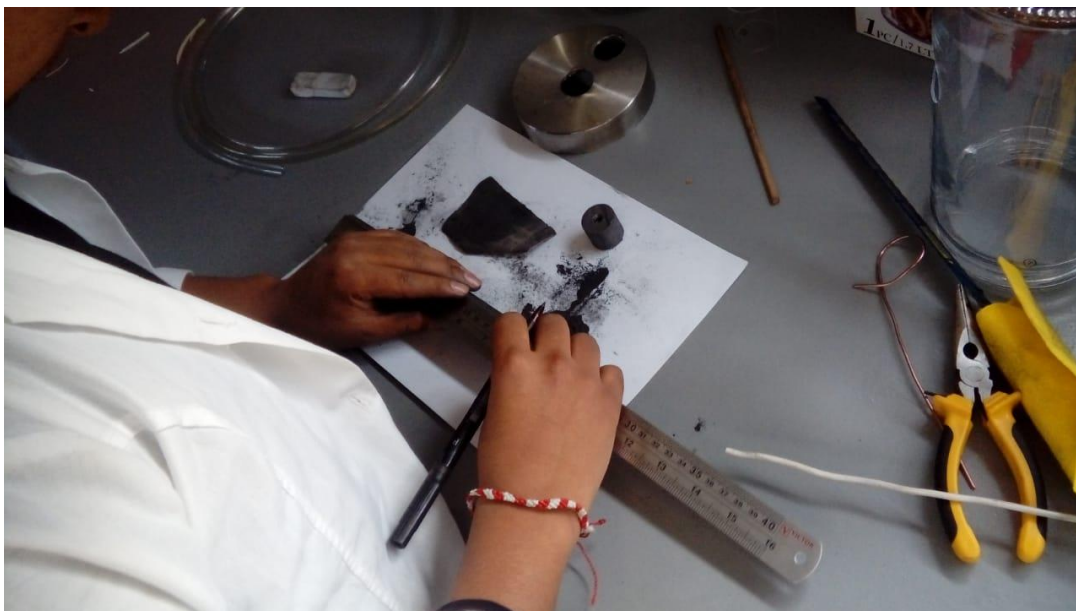


Figura 84. Corte de los elctrodo de grafito



Figura 85. Armado de las Celdas de Combustible Microbiano



Figura 86. Preparación del Puente Salino



Figura 87. Materiales para la limpieza de los Electroodos de Grafito



Figura 88. Campana extractora de gases

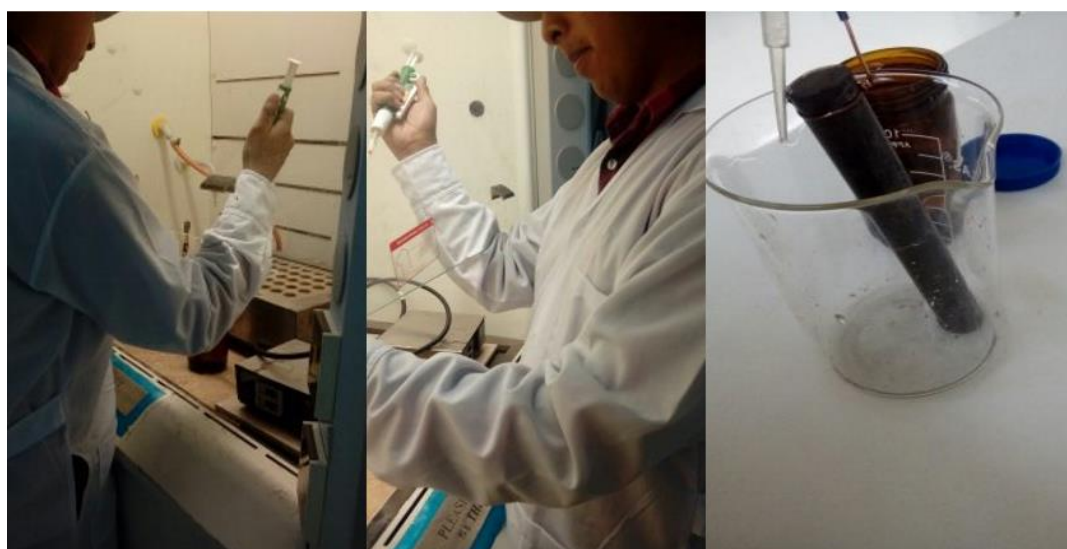


Figura 89. Limpieza de los Electrodos de Grafito con Ácido Clorhídrico (1M) en la campana de extracción de Gas.

8.1.2. Acondicionamiento de los Electroodos (Ánodo) para la formación de la biopelícula de microorganismos electrogénicos



Figura 90. Materiales para el acondicionamiento de los electrodos y enriquecimiento de los microorganismos



Figura 91. Incubación de los electrodos (ánodo) a 35°C

8.1.3. Inversión de los electrodos en la cámara ánodica de las Celdas de Combustible Microbiano



Figura 92. Inmersión de los electrodos en las CCM y cerrado hermético inmediatamente



Figura 93. Electrodo de la derecha sin formación de la biopelícula de microorganismos y electrodo de la derecha con formación de biopelícula de Microorganismos.

8.1.4. Instalación de las resistencias externas en las celdas de combustible microbiano



Figura 94. Soldadura de las resistencias externa (150,100,50 Ω) con estaño

8.1.5. Monitoreo y medición del voltaje de las celdas de combustible microbian



Figura 95. Puesta en marcha de las celdas de combustible microbianas

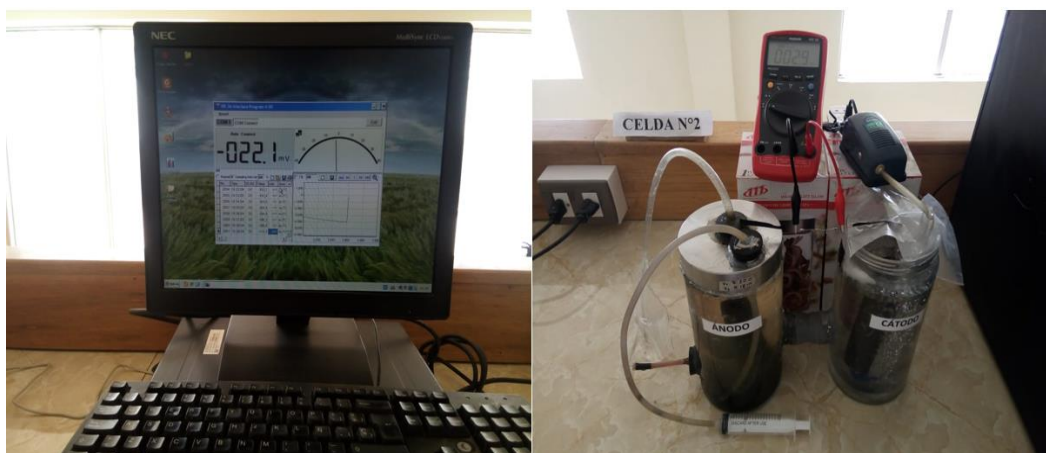


Figura 96. Medición de Voltaje con el software-RP-36 Multímetro

8.1.6. Muestreo del agua residual de las Celdas de Combustibles Microbiano para los análisis fisicoquímicos



Figura 97. Muestreo de agua residual después de 9 días y medición de pH, Conductividad,

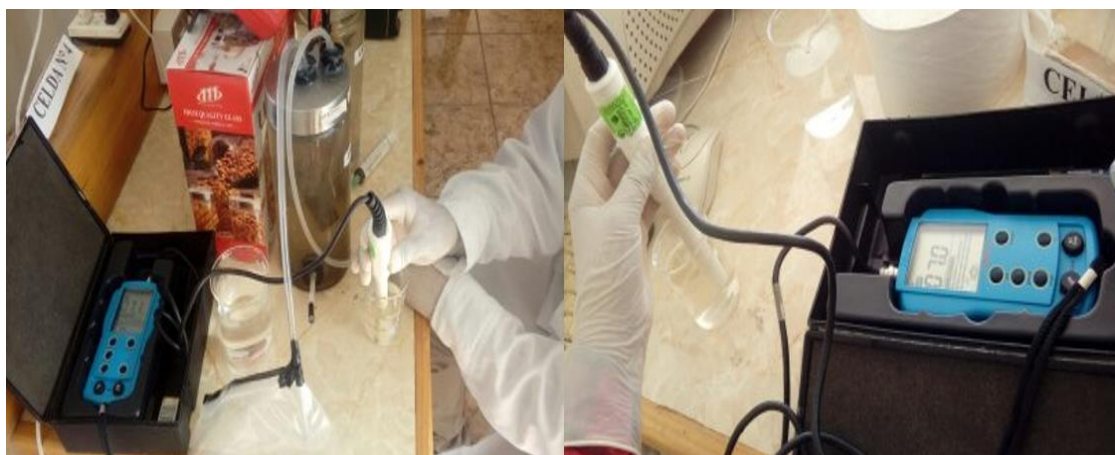


Figura 98. Medición de pH con el Multiparámetro HANNA-HI9811-5



Figura 99. Etiquetado, Rotulado y anotación en la cadena de custodia



Figura 100. Muestras para el análisis de DQO y DBO₅



Figura 101. Muestra de agua residual antes y después

8.1.7. Celdas de Combustible Microbiano



Figura 102. Celda de Combustible Microbiano 1, 2, 3, 4 y 5

8.2. Anexo II- Cálculos

8.2.1. Calculo de la Densidad de Potencia

Paso 1. Calculo de la Intensidad de Corriente (mA)(Ecuación N°2)

$$\frac{V}{R_{ext}} = I$$

*Para el caso de la CCM1, se utilizó una resistencia externa de 150Ω , entonces reemplazamos los respectivos datos de Voltaje máximo (mV) dentro las 24 horas de operación de la CCM, de la Tabla 49 en la Ecuación (2), donde se obtiene la intensidad de Corriente (mA).

$$\frac{70 \text{ mV}}{150\Omega} = I$$

$$I = 0.47 \text{ mA}$$

- Paso 2. Calculo de la Potencia (mW) (Ecuación N°3)

$$P(\text{mW}) = \frac{V(\text{mV}) * I(\text{mA})}{1000}$$

$$P(\text{mW}) = \frac{70(\text{mV}) * 0.5(\text{mA})}{1000}$$

$$P = 0.0326 \text{ mW}$$

- Paso 3. Calculo de la Densidad de Potencia (mW)

*La Densidad de Potencia se puede determinar a partir de la potencia (mW) y el área de Contacto del Electrodo.

$$\text{Area de Contacto del Electrodo (m}^2\text{)} = 2 * \pi * r * h + 2 * \pi * r^2$$

$$\text{Area de Contacto del Electrodo (m}^2\text{)}$$

$$= 2 * 3.1416 * 0.0125 \text{ m} * 0.18 \text{ m} + 2 * 3.1416 * (0.0125 \text{ m})^2$$

$$\text{Area de Contacto del Electrodo (m}^2\text{)} = 0.0151 \text{ m}^2$$

Para la CCM1, el área de contacto del electrodo fue de 0.0151m². Ecuación

N° 4. *Densidad de Potencia (DP)*

$$P_{An} = \frac{V^2}{A_{An} * R_{ext}}$$

$$P_{An} = \frac{70 \text{ mV}^2}{0.0151 \text{ m}^2 * 150 \Omega}$$

$$P_{An} = \frac{2163.36}{1000}$$

$$P_{An} = 2.16 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Densidad de Potencia} \left(\frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Potencia (mW)}}{\text{Area de contacto del electrodo (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Densidad de Potencia} = \frac{0.0326 \text{ mW}}{0.0151 \text{ (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Densidad de Potencia} = \frac{0.0326 \text{ mW}}{0.0151 \text{ (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Densidad de Potencia} = 2.16 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

8.2.2. Cálculo del Porcentaje de Remoción (%)

Ecuación N° 11. Eficiencia de Remoción DQO (%)

$$\text{Remocion (\%)} = \frac{\text{DQO (inicio del proceso)} - \text{DQO (final del Proceso)}}{\text{DQO (inicio del proceso)}}$$

$$\text{Remocion (\%)} = \frac{1853 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 244 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1853 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}$$

$$\text{Remocion} = 86.83\%$$

Ecuación N° 12. Eficiencia de Remoción DBO₅ (%)

$$\text{Remocion (\%)} = \frac{\text{DBO (inicio del proceso)} - \text{DBO (final del Proceso)}}{\text{DBO (inicio del proceso)}}$$

$$\text{Remocion (\%)} = \frac{1059 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 140 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1059 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}$$

$$\text{Remocion} = 86.78 \%$$

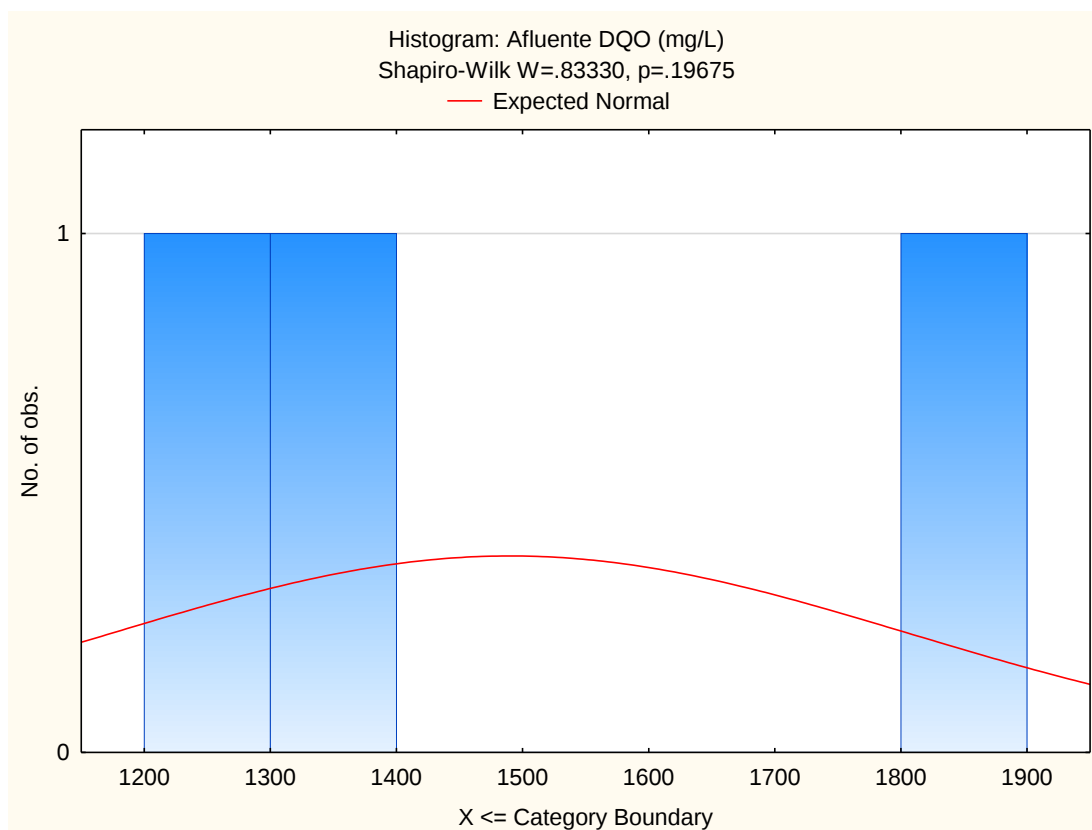


Figura 103. Shapiro Wilk- Campana de Gaus para el Afluyente

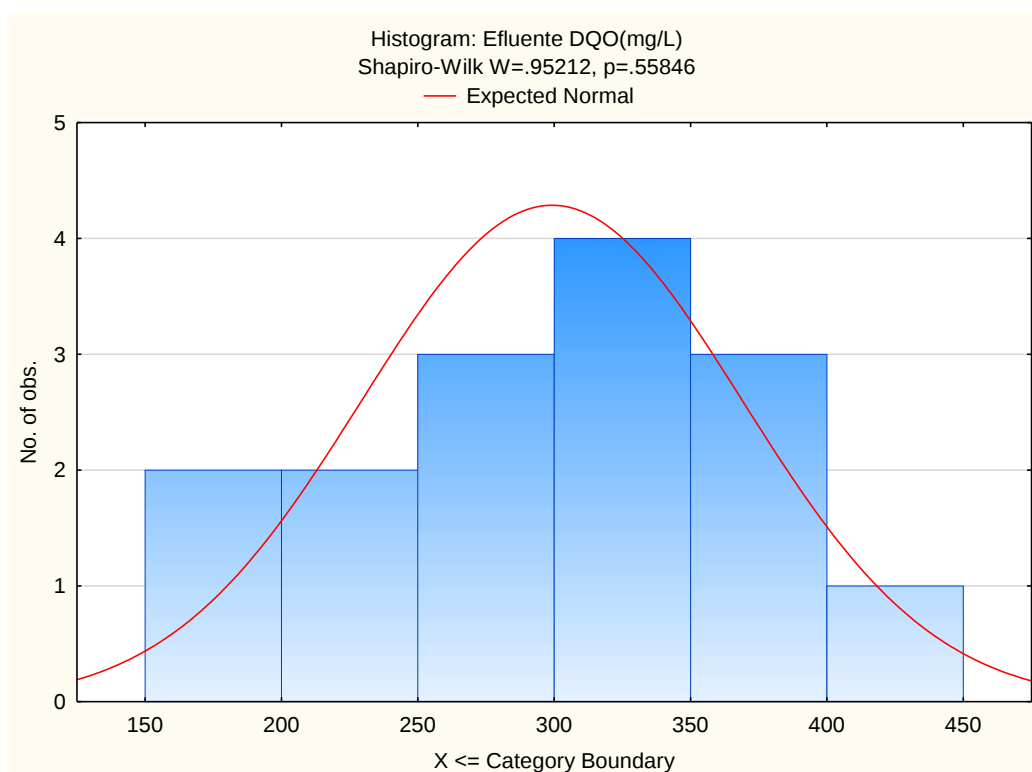


Figura 104. Shapiro Wilk- Campana de Gaus para el Efluente

Tabla 50

Remoción de la materia orgánica en función de la DQO y DBO₅ en las Celda de Combustible Microbiano

Celdas de Combustible Microbiano	Resistencia (Ω)	Longitud del Electrodo Grafito (m ²)	Área Superficial Total del Electrodo de Grafito (m ²)	Afluente (DQO mgO ₂ /L)	Efluente (DQO mgO ₂ /L)	Remoción de la Materia Orgánica e Inorgánica *DQO (mgO ₂ /L)	Afluente (DBO ₅ mgO ₂ /L)	Efluente (DBO ₅ mgO ₂ /L)	Remoción de la materia Orgánica Biodegradable- **DBO ₅ (mgO ₂ /L)
CCM1	150	0.018	0.0151	1853	244	86.83%	1059	140	86.78%
				1341	325	75.76%	817	185	77.36%
				1276	354	72.26%	726	201	72.31%
CCM2	50	0.018	0.0151	1853	240	87.05%	1059	138	86.97%
				1341	179	86.65%	817	101	87.64%
				1276	374	70.69%	726	214	70.52%
CCM3	50	0.08	0.0073	1853	264	85.75%	1059	152	85.65%
				1341	268	80.01%	817	154	81.15%
				1276	317	75.16%	726	181	75.07%
CCM4	150	0.08	0.0073	1853	175	90.56%	1059	99	90.65%
				1341	289	78.45%	817	165	79.80%
				1276	366	71.32%	726	209	71.21%
CCM5	100	0.013	0.0112	1853	337	81.81%	1059	193	81.78%
				1341	350	73.90%	817	199	75.64%
				1276	406	68.18%	726	230	68.32%

8.2.3. Cálculo de la Eficiencia Coulombica

Tabla 51

Datos registrados de CCM1 en un intervalo de 24 horas

Datos		
mV (máximo)	Horas (X)	mA(Y)
0	0	0.0
237.5	24	1.6
253.4	48	1.7
254.1	72	1.7
244	96	1.6
273.3	120	1.8
295.1	144	2.0
294.6	168	2.0
304.2	192	2.0
342.2	216	2.3

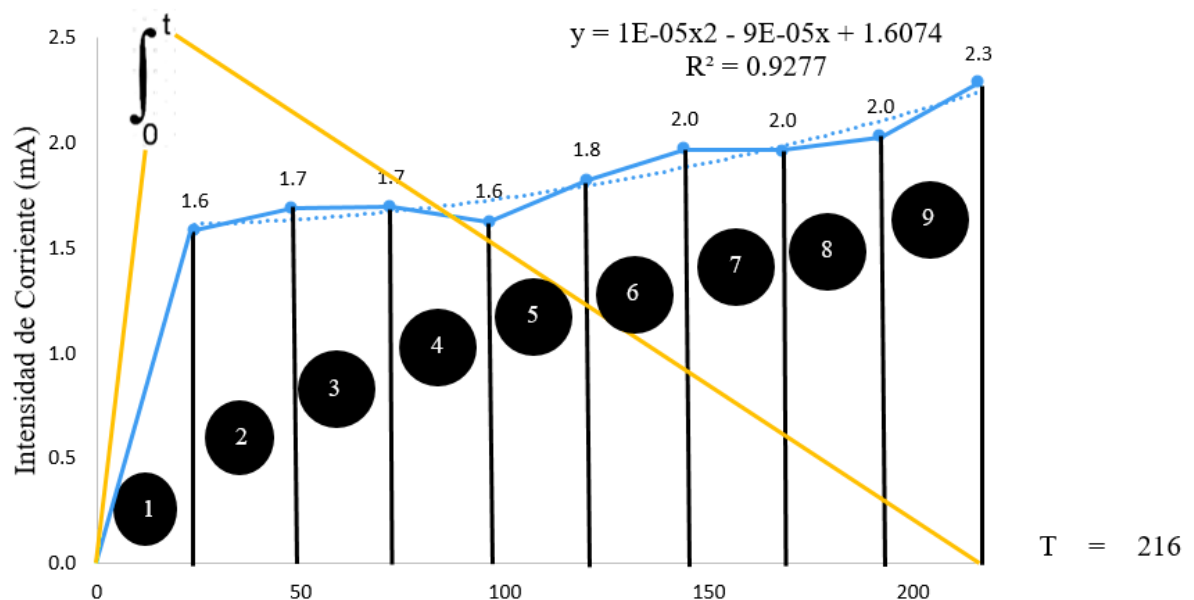


Figura 105. Método del Trapecio para la determinación de la Eficiencia Coulombica de las CCM1. Línea de Tendencia Polinómica de la Intensidad de Corriente (mA) en función del Tiempo (Horas)

Tabla 52

Variables de Cálculo Matemático para el método del trapecio

Variables	Unidad de medida	
Numero de Trapecios	9	n
Altura del Trapecio	24	ΔX
Resistencia	150	Ω
Intensidad de Corriente	2.3	mA
Intervalo	(0;216)	I
a = 0.00	0	t(horas)
b = 216.00	216	t(horas)
1C	0.2777778	mA* h

- Cálculo de Delta (ΔX)

$$\Delta X = \frac{b - a}{n}$$

$$\Delta X = \frac{216.00 - 0.00}{9}$$

$$\Delta X = 24$$

- Cálculo en función de la ecuación obtenida de la línea de Tendencia, con un $R^2 = 0.93$, para la predicción del comportamiento de la intensidad de corriente en el tiempo transcurrido durante la operación de las CCM.

$$F(X) = I(t) = Y$$

$$F(X) = (0.00001 * x^2 - 0.00009 * x + 1.6074) = Y$$

$$F(X9) = (0.00001 * 216^2 - 0.00009 * 216 + 1.6074) = Y9$$

$$F(X9) = 2.1 \text{ mA} * h$$

Tabla 53

Calculo para $n = 9$ trapecios, integral de área bajo la curva

Calculo en función de la Intensidad de Corriente (mA) y el tiempo (horas)				
	Horas (X)	mA*hora (y)		
X0	0	1.6	F(X0)	Y0
X1	24	1.6	F(X1)	Y1
X2	48	1.6	F(X2)	Y2
X3	72	1.7	F(X3)	Y3
X4	96	1.7	F(X4)	Y4
X5	120	1.7	F(X5)	Y5
X6	144	1.8	F(X6)	Y6
X7	168	1.9	F(X7)	Y7
X8	192	2.0	F(X8)	Y8
X9	216	2.1	F(X9)	Y9

- Calculo de la Integral, área bajo la curva del Trapecio.

$$I = \left(\frac{b - a}{2 * n} \right) * (Y_0 + 2 * (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8) + Y_9)$$

$$I = \left(\frac{216 - 0}{2 * 9} \right) * (1.6 + 2 * (1.6 + 1.6 + 1.7 + 1.7 + 1.7 + 1.8 + 1.9 + 2.0) + 2.1)$$

$$I = 378.90 \text{ mA} * \text{hora}$$

- Calculo y Conversión a Coulombio

$$I = (378.90 \text{ mA} * \text{hora}) * \left(\frac{1C}{0.2777778 \text{ mA} * \text{hora}} \right)$$

$$\int_0^{216} I(t) dt = 1364.03 \text{ Coulombio}$$

Ecuación N° 7

$$EC = \frac{\text{Coulombios recuperados}}{\text{Coulombios totales en el sustrato}}$$

Ecuación N° 9

$$EC = \frac{Mo2 \int_0^t I(t) dt}{Fbo2van\Delta DQO}$$

$$EC = \frac{\left(32 \frac{g}{mol}\right) * (1364.03 C)}{\left(96485 \frac{C}{mol}\right) * (4mol) * (1.6L) * (1.609 \frac{g}{L})}$$

$$EC = 4.4\%$$

Tabla 54. *Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM1)*

Celdas de Combustible	Días	Resistencia (Ω)	Longitud del Electrodo de Grafito	A _{ST} -Prome	Voltaje	Intensidad de potencia	Potencia	Densidad de Potencia	Eficiencia Coulombic
CCM1	1	150	18	0.0151	70	0.47	0.033	2.16	4.4
	2	150	18	0.0151	141	0.94	0.132	8.76	
	3	150	18	0.0151	202	1.35	0.271	17.95	
	4	150	18	0.0151	220	1.47	0.323	21.35	
	5	150	18	0.0151	232	1.54	0.358	23.65	
	6	150	18	0.0151	246	1.64	0.404	26.74	
	7	150	18	0.0151	260	1.73	0.450	29.79	
	8	150	18	0.0151	267	1.78	0.475	31.40	
	9	150	18	0.0151	267	1.78	0.475	31.43	
	10	150	18	0.0151	41	0.27	0.011	0.74	7.3
	11	150	18	0.0151	131	0.87	0.114	7.55	
	12	150	18	0.0151	235	1.56	0.367	24.27	
	13	150	18	0.0151	252	1.68	0.422	27.90	
	14	150	18	0.0151	255	1.70	0.434	28.68	
	15	150	18	0.0151	279	1.86	0.519	34.34	
	16	150	18	0.0151	299	1.99	0.594	39.32	
	17	150	18	0.0151	307	2.05	0.628	41.55	
	18	150	18	0.0151	309	2.06	0.636	42.05	
	19	150	18	0.0151	191	1.27	0.242	16.02	9.7
	20	150	18	0.0151	272	1.81	0.493	32.58	
	21	150	18	0.0151	287	1.91	0.548	36.28	
	22	150	18	0.0151	305	2.03	0.621	41.08	
	23	150	18	0.0151	325	2.17	0.704	46.57	
	24	150	18	0.0151	337	2.25	0.757	50.06	
	25	150	18	0.0151	319	2.13	0.680	44.98	
	26	150	18	0.0151	329	2.19	0.720	47.62	
	27	150	18	0.0151	329	2.19	0.721	47.70	

Tabla 55. *Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM2)*

Celdas de	Día	Resistencia	Longitud del	AST-Grafito	Voltaje Promedio	Intensidad de Corriente	Potencia	Densidad de Potencia	Eficiencia Coulombica (%)
Combustible	s	(Ω)	Grafito	(cm)	(mV)	(mA)	(mW)	(a)	
Microbiano	1	50	18	0.01	183	3.67	0.67	44.46	19.25
	2	50	18	0.01	282	5.63	1.59	104.98	
	3	50	18	0.01	331	6.63	2.20	145.32	
	4	50	18	0.01	331	6.62	2.19	144.97	
	5	50	18	0.01	337	6.74	2.27	150.20	
	6	50	18	0.01	356	7.12	2.54	167.78	
	7	50	18	0.01	367	7.33	2.69	177.80	
	8	50	18	0.01	366	7.31	2.67	176.78	
	9	50	18	0.01	392	7.84	3.07	203.13	
CCM2	10	50	18	0.01	176	3.53	0.62	41.10	26.66
	11	50	18	0.01	265	5.29	1.40	92.55	
	12	50	18	0.01	332	6.63	2.20	145.55	
	13	50	18	0.01	359	7.19	2.58	170.85	
	14	50	18	0.01	380	7.61	2.89	191.32	
	15	50	18	0.01	374	7.49	2.80	185.32	
	16	50	18	0.01	375	7.49	2.81	185.66	
	17	50	18	0.01	384	7.68	2.95	194.91	
	18	50	18	0.01	380	7.59	2.88	190.73	
	19	50	18	0.01	219	4.37	0.96	63.25	35.73
	20	50	18	0.01	247	4.95	1.22	81.00	
	21	50	18	0.01	271	5.43	1.47	97.42	
	22	50	18	0.01	317	6.34	2.01	133.03	
	23	50	18	0.01	359	7.19	2.58	170.88	
	24	50	18	0.01	390	7.80	3.05	201.44	
	25	50	18	0.01	387	7.75	3.00	198.41	
	26	50	18	0.01	383	7.66	2.93	193.84	
	27	50	18	0.01	392	7.83	3.07	202.76	

Tabla 56. *Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM3)*

Celdas de Combustible Microbiano	Días	Resistencia (Ω)	Longitud del Grafito (cm)	AST-Grafito (m^2)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m^2)	Eficiencia Coulombica (%)
CCM3	1	50	8	0.007	61	1.21	0.07	10.14	12.87
	2	50	8	0.007	173	3.45	0.60	81.98	
	3	50	8	0.007	211	4.23	0.89	123.09	
	4	50	8	0.007	221	4.42	0.98	134.32	
	5	50	8	0.007	233	4.66	1.08	149.26	
	6	50	8	0.007	259	5.18	1.34	184.45	
	7	50	8	0.007	286	5.72	1.64	225.53	
	8	50	8	0.007	294	5.88	1.73	238.17	
	9	50	8	0.007	301	6.03	1.82	250.16	
	10	50	8	0.007	108	2.15	0.23	31.92	24.54
	11	50	8	0.007	278	5.56	1.55	213.13	
	12	50	8	0.007	302	6.04	1.83	251.21	
	13	50	8	0.007	324	6.49	2.11	289.80	
	14	50	8	0.007	306	6.12	1.88	258.19	
	15	50	8	0.007	325	6.50	2.11	291.02	
	16	50	8	0.007	336	6.73	2.26	311.72	
	17	50	8	0.007	345	6.89	2.38	327.18	
	18	50	8	0.007	356	7.13	2.54	349.48	
	19	50	8	0.007	182	3.64	0.66	91.25	31.51
	20	50	8	0.007	340	6.80	2.31	318.53	
	21	50	8	0.007	360	7.21	2.60	357.30	
	22	50	8	0.007	369	7.39	2.73	375.40	
	23	50	8	0.007	376	7.53	2.83	389.79	
	24	50	8	0.007	377	7.53	2.84	390.69	
	25	50	8	0.007	359	7.17	2.57	353.94	
	26	50	8	0.007	368	7.37	2.71	373.52	
	27	50	8	0.007	384	7.67	2.94	405.14	

Tabla 57. *Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM4)*

Celdas de Combustible Microbiano	Días	Resistencia (Ω)	Longitud del Grafito (cm)	AST-Grafito (m ²)	Voltaje (mV)	Promedio	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m ²)	Eficiencia Coulombica (%)
CCM4	1	150	8	0.007	121		0.80	0.10	13.33	3.7
	2	150	8	0.007	164		1.09	0.18	24.71	
	3	150	8	0.007	197		1.32	0.26	35.79	
	4	150	8	0.007	227		1.51	0.34	47.18	
	5	150	8	0.007	223		1.49	0.33	45.65	
	6	150	8	0.007	242		1.61	0.39	53.63	
	7	150	8	0.007	272		1.81	0.49	67.77	
	8	150	8	0.007	290		1.93	0.56	77.27	
	9	150	8	0.007	294		1.96	0.58	79.45	
	10	150	8	0.007	146		0.97	0.14	19.52	8.26
	11	150	8	0.007	278		1.85	0.51	70.75	
	12	150	8	0.007	304		2.03	0.62	84.93	
	13	150	8	0.007	324		2.16	0.70	96.13	
	14	150	8	0.007	335		2.23	0.75	102.94	
	15	150	8	0.007	340		2.27	0.77	106.29	
	16	150	8	0.007	358		2.39	0.86	117.92	
	17	150	8	0.007	374		2.49	0.93	128.29	
	18	150	8	0.007	368		2.45	0.90	124.23	
	19	150	8	0.007	186		1.24	0.23	31.71	11.02
	20	150	8	0.007	275		1.83	0.51	69.52	
	21	150	8	0.007	328		2.19	0.72	98.80	
	22	150	8	0.007	358		2.39	0.86	117.90	
	23	150	8	0.007	374		2.50	0.93	128.56	
	24	150	8	0.007	384		2.56	0.98	135.34	
	25	150	8	0.007	385		2.56	0.99	135.84	
	26	150	8	0.007	383		2.55	0.98	134.45	
	27	150	8	0.007	386		2.57	0.99	136.59	

Tabla 58. *Parámetros medidos de la Celda de Combustible Microbiano (CCM5)*

Celdas de Combustible Microbiano	Días	Resistencia (Ω)	Longitud del Grafito (cm)	AST-Grafito (m^2)	Voltaje Promedio (mV)	Intensidad de Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/m^2)	Eficiencia Coulombica (%)
CCM5	1	100	13	0.011	180	1.80	0.33	29.05	10.02
	2	100	13	0.011	226	2.26	0.51	45.73	
	3	100	13	0.011	251	2.51	0.63	56.45	
	4	100	13	0.011	296	2.96	0.88	78.36	
	5	100	13	0.011	367	3.67	1.35	120.51	
	6	100	13	0.011	366	3.66	1.34	119.79	
	7	100	13	0.011	337	3.37	1.14	101.50	
	8	100	13	0.011	373	3.73	1.39	124.16	
	9	100	13	0.011	380	3.80	1.45	129.29	
	10	100	13	0.011	151	1.51	0.23	20.25	15.34
	11	100	13	0.011	209	2.09	0.44	39.03	
	12	100	13	0.011	265	2.65	0.70	62.60	
	13	100	13	0.011	363	3.63	1.32	118.05	
	14	100	13	0.011	372	3.72	1.38	123.44	
	15	100	13	0.011	369	3.69	1.36	121.76	
	16	100	13	0.011	372	3.72	1.39	123.94	
	17	100	13	0.011	380	3.80	1.44	128.76	
	18	100	13	0.011	366	3.66	1.34	119.56	
	19	100	13	0.011	190	1.90	0.36	32.38	13.86
	20	100	13	0.011	269	2.69	0.72	64.65	
	21	100	13	0.011	292	2.92	0.85	75.97	
	22	100	13	0.011	303	3.03	0.92	82.12	
	23	100	13	0.011	317	3.17	1.00	89.71	
	24	100	13	0.011	326	3.26	1.06	94.95	
	25	100	13	0.011	323	3.23	1.04	93.19	
	26	100	13	0.011	336	3.36	1.13	100.78	
	27	100	13	0.011	334	3.34	1.11	99.59	

8.3. Anexo III- Resultados

Tabla 59

Características del agua residual durante la operación de las CCM

Parámetro	Unidades	Valores			Desviación Estándar	Clasificación
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3		
DBO ₅	mgO ₂ /L	808	1059	817	142	Fuerte
DQO	mgO ₂ /L	1748	1853	1341	270	Fuerte
pH	UNpH	6.8	6.9	7	0	--
Temperatura de agua	°C	24.3	24.1	24.2	0	--
Conductividad	Us/cm	640	620	580	31	--
Total de Sólidos	mg/L	1300	1270	1180	62	--

Tabla 60

Biodegradabilidad del agua residual en las 3 réplicas de operación de las CCM.

Tratamientos	Parámetro	Unidades	Valor	Biodegradabilidad (DBO ₅ /DQO) >0.5
Replica 1	DBO ₅	mgO ₂ /L	808	0.5
	DQO	mgO ₂ /L	1748	
Replica 2	DBO ₅	mgO ₂ /L	1059	0.6
	DQO	mgO ₂ /L	1853	
Replica 3	DBO ₅	mgO ₂ /L	817	0.6
	DQO	mgO ₂ /L	1341	

Tabla 61

Parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento mediante el sistema de las CCM durante la operación.

Prueba	Celdas	DQO (mgO ₂ /L)		DBO ₅ (mgO ₂ /L)		PH		T°C agua	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Aclimatación	CCM1		183		104		6.6		21
	CCM2		244		139		6.6		21.2
	CCM3	1748	232	808	132	7.2	6.6	22.9	21.1
	CCM4		191		109		6.6		20.8
	CCM5		394		224		6.5		21.1
Replica 1	CCM1		244		140		6.5		23.1
	CCM2		240		138		6.5		23.1
	CCM3	1853	264	1059	152	6.8	6.6	24.3	22.9
	CCM4		175		99		6.5		23.1
	CCM5		337		193		6.6		23.4
Replica 2	CCM1		325		185		6.6		24.3
	CCM2		179		101		6.6		24.1
	CCM3	1341	268	817	154	6.9	6.6	24.1	24.3
	CCM4		289		165		6.6		24.6
	CCM5		350		199		6.6		24.1
Replica 3	CCM1		354		201		6.5		24.5
	CCM2		374		214		6.4		24.2
	CCM3	1276	317	726	181	7	6.6	24.2	24.8
	CCM4		366		209		6.5		24.1
	CCM5		406		230		6.6		24.1

Tabla 62

Densidad de Potencia por día de las Celdas de Combustible Microbiano

Replicas	Celdas de Combustible Microbiano (CCM)	Resistencia (Ω)	Longitud del Grafito (cm)	A _{ST} -Grafito (m ²)	Densidad de Potencia (mW/m ²)
1	CCM1	150	18	0.0151	31
	CCM2	50	18	0.0151	186
	CCM3	50	8	0.0073	238
	CCM4	150	8	0.0073	75
	CCM5	100	13	0.0112	118
2	CCM1	150	18	0.0151	41
	CCM2	50	18	0.0151	190
	CCM3	50	8	0.0073	329
	CCM4	150	8	0.0073	123
	CCM5	100	13	0.0112	124
3	CCM1	150	18	0.0151	47
	CCM2	50	18	0.0151	198
	CCM3	50	8	0.0073	377
	CCM4	150	8	0.0073	136
	CCM5	100	13	0.0112	98

8.4. Anexo IV- Resultados de los monitoreos

8.4.1. Potencial de Hidrogeno (pH)

Tabla 63

Monitoreo del parámetro "pH"

Replica	Monitoreo de "pH" del Agua Residual Domestica				
	CCM 1	CCM 2	CCM 3	CCM 4	CCM
	Durant	Durant	Durant	Durant	Durante
Aclimatación	6.4	6.6	6.5	6.9	6.5
	6.6	6.6	6.6	6.6	6.5
	6.5	6.4	6.4	6.5	6.5
Replica 1	6.5	6.4	6.4	6.6	6.4
	6.5	6.5	6.5	6.5	6.4
	6.5	6.5	6.6	6.5	6.4
Replica 2	6.4	6.4	6.5	6.5	6.5
	6.2	6.3	6.3	6.5	6.5
	6.5	6.4	6.6	6.6	6.5
Replica 3	6.5	6.5	6.6	6.6	6.4
	6.5	6.4	6.5	6.5	6.5
	6.3	6.4	6.5	6.5	6.5

Tabla 64

Valores de entrada y salida del pH

Celdas	Resistencia (Ohm)	Área del electrodo Grafito(cm ²)	Replicas	pH	
				Entrada	Salida
CCM 1	150	18	Replica 1	6.8	6.5
			Replica 2	6.8	6.6
			Replica 3	7.1	6.5
CCM 2	50	18	Replica 1	6.8	6.5
			Replica 2	6.8	6.6
			Replica 3	7.1	6.4
CCM 3	50	8	Replica 1	6.8	6.5
			Replica 2	6.8	6.6
			Replica 3	7.1	6.6
CCM 4	150	8	Replica 1	6.8	6.6
			Replica 2	6.8	6.6
			Replica 3	7.1	6.5
CCM 5	100	13	Replica 1	6.8	6.5
			Replica 2	6.8	6.6
			Replica 3	7.1	6.5

8.4.2. Temperatura del Agua

Tabla 65

Monitoreo del parámetro de temperatura del Agua

Replica	Monitoreo T°C del Agua Residual Domestica				
	CCM	CCM	CCM	CCM	CCM
	Dura	Dura	Dura	Dura	Dura
Aclimtación	22.8	22.9	22.9	22.7	22.9
	22.6	22.4	22.4	22.2	23.2
	22.4	22.7	23	23.2	23.5
2	21.6	21.5	21.5	21.4	22.7
	21.4	22	21.5	21.6	23.1
	22	22	21.9	21.7	23.6
3	22.4	22.6	23	23.1	22.8
	23.3	23.5	23.2	22.9	23.2
	24.8	25.3	24.7	25.1	23.5
4	25.4	25	24.9	24.9	23
	24.6	24.7	24.7	25	23.3
	22.9	23	23.2	22.9	23

Tabla 66

Valores de entrada y salida de la T°C- Agua

Celdas	Resistencia (Ohm)	Área del electrodo Grafito(cm)	Numero de Replicas	T° C Agua	
				Entrada	Salida
CCM 1	150	18	Replica 1	24.3	23.1
			Replica 2	24.1	23.7
			Replica 3	24.2	24.5
CCM 2	50	18	Replica 1	24.3	24.3
			Replica 2	24.1	24
			Replica 3	24.2	23.6
CCM 3	50	8	Replica 1	24.3	22.9
			Replica 2	24.1	23.5
			Replica 3	24.2	23.3
CCM 4	150	8	Replica 1	24.3	23.1
			Replica 2	24.1	24.6
			Replica 3	24.2	24.1
CCM 5 PC	100	13	Replica 1	24.3	23.1
			Replica 2	24.1	21.6
			Replica 3	24.2	22.5

8.4.3. Voltaje

Tabla 67

Monitoreo de voltaje de la CCM1

CCM 1				
N° Horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	16.8	16.6	10.3
2	mV/h	31.8	42.5	111.7
3	mV/h	45.8	63.7	172.2
4	mV/h	53.0	73.0	189.1
5	mV/h	58.1	73.9	250.6
6	mV/h	70.0	80.3	263.5
7	mV/h	78.0	82.4	263.7
8	mV/h	82.5	83.9	263.9
9	mV/h	84.8	84.3	265.1
10	mV/h	93.2	84.8	265.9
11	mV/h	97.0	108.3	266.2
12	mV/h	98.0	108.5	266.3
13	mV/h	100.5	110.1	266.6
14	mV/h	103.4	116.2	267.6
15	mV/h	107.9	138.4	268.2
16	mV/h	114.7	133.2	268.9
17	mV/h	129.2	133.3	270.1
18	mV/h	132.6	151.8	270.3
19	mV/h	136.3	159.6	270.3
20	mV/h	147.5	158.6	271.7
21	mV/h	151.9	167.3	272.2
22	mV/h	152.2	177.9	273.4
23	mV/h	156.8	178.0	273.6
24	mV/h	157.1	178.8	273.6
25	mV/h	157.9	184.1	273.9
26	mV/h	184.9	185.5	274.8
27	mV/h	191.5	188.8	275.8
28	mV/h	193.6	189.8	276.8
29	mV/h	193.9	195.6	277.0
30	mV/h	193.9	211.6	278.2
31	mV/h	194.3	238.6	277.7
32	mV/h	195.2	250.2	279.5
33	mV/h	196.5	255.7	283.0
34	mV/h	197.9	257.2	279.8
35	mV/h	198.7	255.9	279.9
36	mV/h	201.1	251.6	285.5

37	mV/h	201.0	246.9	288.5
38	mV/h	208.1	242.9	283.8
39	mV/h	208.2	238.6	283.8
40	mV/h	216.2	234.1	282.2
41	mV/h	219.8	230.3	280.6
42	mV/h	218.4	226.3	282.4
43	mV/h	218.2	222.3	282.5
44	mV/h	216.0	216.6	283.0
45	mV/h	213.0	204.6	284.2
46	mV/h	210.5	196.6	284.9
47	mV/h	209.5	223.9	286.9
48	mV/h	206.2	247.2	287.5
49	mV/h	203.5	263.2	289.4
50	mV/h	200.6	267.1	290.8
51	mV/h	201.6	263.5	291.7
52	mV/h	203.0	260.8	292.7
53	mV/h	205.1	257.1	292.0
54	mV/h	209.3	251.7	295.5
55	mV/h	211.1	244.7	296.5
56	mV/h	217.8	237.6	297.1
57	mV/h	222.1	230.8	300.2
58	mV/h	223.2	224.1	312.7
59	mV/h	224.7	218.1	324.9
60	mV/h	226.0	212.1	328.0
61	mV/h	232.5	204.5	327.9
62	mV/h	241.1	204.0	320.1
63	mV/h	241.2	220.3	313.0
64	mV/h	247.1	227.5	308.8
65	mV/h	248.2	232.4	304.6
66	mV/h	249.5	239.8	301.0
67	mV/h	247.9	260.9	297.4
68	mV/h	244.1	286.8	294.0
69	mV/h	242.4	300.5	290.5
70	mV/h	242.6	298.5	286.9
71	mV/h	241.4	292.5	283.4
72	mV/h	238.5	289.2	285.4
73	mV/h	235.0	285.5	288.3
74	mV/h	231.6	281.4	290.6
75	mV/h	228.4	276.4	294.3
76	mV/h	225.5	270.2	295.8
77	mV/h	222.9	263.9	299.6
78	mV/h	220.3	257.6	310.6
79	mV/h	217.5	251.6	331.6
80	mV/h	214.3	244.9	336.0

81	mV/h	211.4	238.5	336.7
82	mV/h	210.3	232.9	340.4
83	mV/h	212.1	228.1	340.7
84	mV/h	222.1	237.7	344.5
85	mV/h	233.4	250.0	349.7
86	mV/h	234.9	250.6	341.8
87	mV/h	241.9	277.6	331.4
88	mV/h	251.8	276.6	327.3
89	mV/h	255.1	272.3	325.4
90	mV/h	233.2	272.9	323.4
91	mV/h	227.8	268.6	320.6
92	mV/h	226.7	264.0	317.5
93	mV/h	224.0	259.2	314.1
94	mV/h	220.5	254.4	310.9
95	mV/h	217.3	254.2	307.1
96	mV/h	214.1	249.3	303.2
97	mV/h	225.5	245.0	295.5
98	mV/h	239.6	245.2	298.4
99	mV/h	244.8	252.5	299.6
100	mV/h	246.9	256.5	312.6
101	mV/h	248.0	258.3	333.5
102	mV/h	252.5	260.0	340.8
103	mV/h	253.2	260.6	340.4
104	mV/h	261.2	264.3	344.3
105	mV/h	270.0	285.4	349.9
106	mV/h	272.6	300.8	349.8
107	mV/h	279.5	301.7	347.7
108	mV/h	268.0	301.9	338.3
109	mV/h	261.6	306.6	333.2
110	mV/h	257.7	314.7	329.3
111	mV/h	254.7	324.1	326.0
112	mV/h	251.5	329.5	322.6
113	mV/h	248.1	324.9	319.3
114	mV/h	244.6	316.0	315.7
115	mV/h	240.8	310.1	311.8
116	mV/h	236.8	305.6	307.7
117	mV/h	232.8	302.1	303.1
118	mV/h	228.6	297.9	325.3
119	mV/h	224.1	293.2	347.0
120	mV/h	219.7	288.3	349.5
121	mV/h	215.9	282.9	350.9
122	mV/h	222.6	278.0	354.1
123	mV/h	243.9	274.0	354.2
124	mV/h	262.4	269.5	356.2

125	mV/h	271.8	264.6	360.6
126	mV/h	274.8	260.5	357.9
127	mV/h	276.6	268.4	343.7
128	mV/h	281.0	269.4	332.5
129	mV/h	287.4	272.2	323.8
130	mV/h	292.3	293.0	312.0
131	mV/h	294.6	312.7	306.8
132	mV/h	290.2	322.5	303.7
133	mV/h	283.3	324.3	300.0
134	mV/h	277.2	325.0	304.4
135	mV/h	274.4	326.3	305.6
136	mV/h	272.1	333.8	308.4
137	mV/h	269.2	343.1	312.5
138	mV/h	265.5	349.4	312.6
139	mV/h	261.6	345.4	316.4
140	mV/h	258.0	335.6	318.1
141	mV/h	254.4	328.8	318.7
142	mV/h	250.7	325.6	322.6
143	mV/h	246.9	323.8	330.7
144	mV/h	242.9	318.8	341.2
145	mV/h	239.1	312.6	345.3
146	mV/h	236.3	306.9	342.3
147	mV/h	240.1	301.3	332.5
148	mV/h	285.5	295.7	327.5
149	mV/h	287.6	290.0	325.3
150	mV/h	288.7	284.3	321.2
151	mV/h	286.7	278.9	317.5
152	mV/h	284.0	274.3	315.8
153	mV/h	283.5	275.4	314.1
154	mV/h	282.0	276.6	311.3
155	mV/h	281.4	279.1	309.4
156	mV/h	281.8	283.7	307.9
157	mV/h	278.7	305.1	306.7
158	mV/h	274.9	321.2	305.6
159	mV/h	271.0	323.5	304.8
160	mV/h	266.9	329.3	305.3
161	mV/h	263.0	325.8	308.6
162	mV/h	259.2	325.3	325.4
163	mV/h	255.2	325.1	351.7
164	mV/h	250.8	318.2	378.6
165	mV/h	250.3	316.3	372.4
166	mV/h	246.3	308.9	366.6
167	mV/h	243.4	300.2	360.8
168	mV/h	231.7	296.4	338.3

169	mV/h	230.0	294.4	334.8
170	mV/h	256.7	291.2	330.5
171	mV/h	282.5	285.2	321.2
172	mV/h	294.5	305.0	320.3
173	mV/h	293.5	313.1	316.2
174	mV/h	290.8	314.2	313.5
175	mV/h	287.9	317.9	314.3
176	mV/h	284.6	321.4	322.1
177	mV/h	283.6	324.3	344.1
178	mV/h	282.9	312.8	348.4
179	mV/h	261.2	313.9	351.4
180	mV/h	279.4	315.7	352.2
181	mV/h	277.2	316.9	349.4
182	mV/h	274.4	318.6	337.8
183	mV/h	272.1	320.9	328.4
184	mV/h	269.2	324.7	335.9
185	mV/h	265.5	331.4	347.0
186	mV/h	261.6	337.3	349.5
187	mV/h	258.0	342.8	351.2
188	mV/h	254.4	343.7	358.3
189	mV/h	250.7	350.0	359.6
190	mV/h	246.9	350.9	365.7
191	mV/h	242.9	348.8	378.4
192	mV/h	239.1	345.3	380.6
193	mV/h	236.3	341.0	385.4
194	mV/h	240.1	337.1	383.3
195	mV/h	285.5	334.6	378.6
196	mV/h	287.6	339.8	374.9
197	mV/h	288.7	341.0	367.3
198	mV/h	286.7	347.5	364.4
199	mV/h	284.0	348.4	359.6
200	mV/h	283.5	349.2	360.2
201	mV/h	282.0	355.5	373.3
202	mV/h	281.4	355.5	391.4
203	mV/h	281.8	358.2	394.4
204	mV/h	278.7	359.5	397.7
205	mV/h	274.9	367.5	399.6
206	mV/h	271.0	375.4	398.4
207	mV/h	266.9	377.7	396.5
208	mV/h	263.0	377.8	393.6
209	mV/h	259.2	377.0	390.5
210	mV/h	255.2	375.1	387.2
211	mV/h	250.8	373.0	383.2
212	mV/h	250.3	369.9	379.6

213	mV/h	246.3	366.4	376.9
214	mV/h	243.4	362.9	376.8
215	mV/h	231.7	359.2	384.1
216	mV/h	230.0	357.4	388.0
		49638.6	58199.1	68472.4
TOTAL	mV	2	7	5
Voltaje				
Total	V	49.64	58.20	68.47

Tabla 68

Monitoreo de voltaje de la CCM2

CCM 2				
N° Horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	82.8	74.7	114.9
2	mV/h	83.4	226.1	228.4
3	mV/h	101.1	228.0	230.0
4	mV/h	107.1	229.6	237.3
5	mV/h	158.9	230.5	232.7
6	mV/h	191.8	232.6	233.3
7	mV/h	206.2	237.9	236.1
8	mV/h	207.0	237.9	236.7
9	mV/h	231.3	241.3	239.4
10	mV/h	244.2	242.0	240.0
11	mV/h	249.5	242.4	240.6
12	mV/h	254.6	243.0	241.0
13	mV/h	265.5	253.9	241.2
14	mV/h	272.2	262.6	242.7
15	mV/h	273.0	263.9	243.7
16	mV/h	277.1	264.9	245.8
17	mV/h	282.3	265.6	245.9
18	mV/h	286.8	271.3	246.0
19	mV/h	288.5	281.0	246.3
20	mV/h	292.0	281.6	246.7
21	mV/h	293.8	289.8	247.9
22	mV/h	295.8	289.9	247.2
23	mV/h	299.4	291.9	249.1
24	mV/h	311.2	296.8	250.9
25	mV/h	319.1	298.8	251.9
26	mV/h	319.4	299.0	251.7
27	mV/h	324.4	299.9	251.9
28	mV/h	324.5	302.4	251.2

29	mV/h	325.5	307.9	252.3
30	mV/h	329.4	312.8	254.0
31	mV/h	332.6	313.9	254.9
32	mV/h	334.5	315.7	256.5
33	mV/h	335.7	316.9	257.7
34	mV/h	338.3	318.6	257.4
35	mV/h	341.5	320.9	257.5
36	mV/h	342.3	324.7	258.3
37	mV/h	343.9	331.4	259.8
38	mV/h	347.5	337.3	260.5
39	mV/h	347.5	342.8	263.3
40	mV/h	349.3	343.7	264.5
41	mV/h	351.6	350.0	268.8
42	mV/h	352.3	350.9	270.1
43	mV/h	343.8	348.8	278.8
44	mV/h	339.3	345.3	281.9
45	mV/h	338.2	341.0	284.5
46	mV/h	337.5	337.1	291.8
47	mV/h	332.5	334.6	289.9
48	mV/h	329.6	339.8	283.4
49	mV/h	326.4	341.0	279.7
50	mV/h	323.6	347.5	278.6
51	mV/h	320.2	348.4	273.2
52	mV/h	317.7	349.2	270.3
53	mV/h	315.6	355.5	269.4
54	mV/h	313.6	355.5	268.0
55	mV/h	311.7	358.2	264.8
56	mV/h	309.7	359.5	280.9
57	mV/h	303.7	367.5	291.5
58	mV/h	300.4	375.4	291.6
59	mV/h	307.5	377.7	292.6
60	mV/h	308.7	377.8	292.8
61	mV/h	308.3	377.0	293.3
62	mV/h	309.7	375.1	304.5
63	mV/h	317.7	373.0	305.5
64	mV/h	328.8	369.9	305.9
65	mV/h	334.5	366.4	306.1
66	mV/h	337.0	362.9	311.1
67	mV/h	342.2	359.2	312.8
68	mV/h	344.7	357.4	320.6
69	mV/h	347.9	355.0	326.9
70	mV/h	348.6	350.7	327.5
71	mV/h	351.5	346.6	338.3
72	mV/h	359.1	342.7	334.8

73	mV/h	360.8	339.2	330.5
74	mV/h	361.7	337.5	321.2
75	mV/h	360.5	347.3	320.3
76	mV/h	356.8	364.1	316.2
77	mV/h	355.0	371.5	313.5
78	mV/h	353.3	375.3	314.3
79	mV/h	351.9	377.3	322.1
80	mV/h	350.1	378.0	344.1
81	mV/h	348.9	378.2	348.4
82	mV/h	334.1	380.6	351.4
83	mV/h	333.9	386.3	352.2
84	mV/h	324.8	393.0	349.4
85	mV/h	323.6	393.5	337.8
86	mV/h	320.2	389.9	328.4
87	mV/h	318.5	387.4	335.9
88	mV/h	316.5	384.9	347.0
89	mV/h	313.2	381.7	349.5
90	mV/h	315.0	378.2	351.2
91	mV/h	327.9	374.7	358.3
92	mV/h	333.1	370.7	359.6
93	mV/h	335.3	366.3	365.7
94	mV/h	338.5	362.1	378.4
95	mV/h	343.7	357.7	380.6
96	mV/h	351.1	353.1	385.4
97	mV/h	355.5	348.6	383.3
98	mV/h	358.5	344.7	378.6
99	mV/h	361.0	348.1	374.9
100	mV/h	358.7	367.4	367.3
101	mV/h	357.0	382.3	364.4
102	mV/h	355.2	386.8	359.6
103	mV/h	353.1	390.3	360.2
104	mV/h	351.1	393.7	373.3
105	mV/h	350.5	395.2	391.4
106	mV/h	347.4	395.0	394.4
107	mV/h	344.1	392.9	397.7
108	mV/h	340.3	392.5	399.6
109	mV/h	336.2	392.5	398.4
110	mV/h	331.9	389.1	396.5
111	mV/h	326.9	385.2	393.6
112	mV/h	321.4	381.0	390.5
113	mV/h	317.1	376.8	387.2
114	mV/h	321.7	372.5	383.2
115	mV/h	336.9	348.7	379.6
116	mV/h	350.3	360.7	376.9

117	mV/h	351.9	363.4	376.8
118	mV/h	353.7	368.1	384.1
119	mV/h	363.7	370.8	388.0
120	mV/h	365.7	373.9	393.5
121	mV/h	365.3	383.7	393.4
122	mV/h	366.7	390.4	398.2
123	mV/h	370.6	393.7	397.5
124	mV/h	375.5	392.5	395.4
125	mV/h	380.0	389.9	392.5
126	mV/h	380.9	386.4	389.3
127	mV/h	378.7	382.2	385.7
128	mV/h	380.9	377.7	382.2
129	mV/h	374.6	373.2	381.4
130	mV/h	372.0	368.6	379.1
131	mV/h	369.0	364.0	391.4
132	mV/h	365.7	359.5	394.0
133	mV/h	362.1	355.6	395.8
134	mV/h	358.5	357.1	395.1
135	mV/h	354.8	357.9	397.1
136	mV/h	350.9	368.7	397.4
137	mV/h	347.1	379.0	394.4
138	mV/h	343.3	385.7	392.7
139	mV/h	339.3	388.1	391.4
140	mV/h	335.5	389.8	386.5
141	mV/h	335.9	391.6	381.8
142	mV/h	353.0	390.9	378.4
143	mV/h	371.3	388.1	376.2
144	mV/h	375.1	385.0	374.9
145	mV/h	375.6	384.7	372.8
146	mV/h	377.1	381.1	371.5
147	mV/h	380.0	377.3	375.6
148	mV/h	377.1	373.2	383.6
149	mV/h	386.4	370.3	392.3
150	mV/h	389.5	378.8	396.7
151	mV/h	387.2	392.8	398.2
152	mV/h	384.7	394.9	396.3
153	mV/h	382.2	392.4	396.0
154	mV/h	379.3	388.7	395.4
155	mV/h	375.8	384.6	392.2
156	mV/h	371.9	382.1	388.2
157	mV/h	367.5	373.8	386.2
158	mV/h	363.0	366.6	384.1
159	mV/h	359.1	373.9	381.1
160	mV/h	355.3	378.0	378.2

161	mV/h	351.4	385.9	376.0
162	mV/h	347.0	390.0	373.7
163	mV/h	343.8	393.8	373.0
164	mV/h	352.1	395.3	372.3
165	mV/h	353.9	394.0	375.0
166	mV/h	357.0	391.4	381.4
167	mV/h	363.5	388.4	389.1
168	mV/h	369.6	385.3	378.4
169	mV/h	373.2	382.3	380.6
170	mV/h	376.3	379.0	385.4
171	mV/h	377.4	375.5	383.3
172	mV/h	377.6	372.0	378.6
173	mV/h	378.8	371.5	374.9
174	mV/h	379.0	371.1	367.3
175	mV/h	380.6	368.4	364.4
176	mV/h	379.5	365.6	359.6
177	mV/h	373.2	372.1	360.2
178	mV/h	372.0	384.0	373.3
179	mV/h	371.8	385.0	391.4
180	mV/h	370.2	384.7	394.4
181	mV/h	370.7	381.1	397.7
182	mV/h	382.1	377.3	399.6
183	mV/h	383.2	373.2	398.4
184	mV/h	389.0	370.3	396.5
185	mV/h	394.1	378.8	393.6
186	mV/h	398.2	392.8	390.5
187	mV/h	399.0	394.9	387.2
188	mV/h	398.7	392.4	383.2
189	mV/h	397.4	388.7	379.6
190	mV/h	397.4	384.6	376.9
191	mV/h	397.4	382.1	376.8
192	mV/h	397.4	373.8	384.1
193	mV/h	396.4	366.6	388.0
194	mV/h	395.0	373.9	393.5
195	mV/h	388.6	378.0	393.4
196	mV/h	386.0	385.9	398.2
197	mV/h	385.9	390.0	397.5
198	mV/h	384.6	393.8	395.4
199	mV/h	383.2	395.3	392.5
200	mV/h	373.2	394.0	389.3
201	mV/h	376.3	391.4	385.7
202	mV/h	377.4	388.4	382.2
203	mV/h	377.6	385.3	381.4
204	mV/h	378.8	382.3	379.1

205	mV/h	379.0	379.0	391.4
206	mV/h	380.6	375.5	394.0
207	mV/h	379.5	372.0	395.8
208	mV/h	373.2	371.5	395.1
209	mV/h	372.0	371.1	397.1
210	mV/h	371.8	368.4	397.4
211	mV/h	370.2	365.6	394.4
212	mV/h	370.7	372.1	392.7
213	mV/h	382.1	384.0	391.4
214	mV/h	383.2	383.6	386.5
215	mV/h	389.0	382.1	381.8
216	mV/h	394.1	380.2	378.4
		73781.5	76957.3	73710.1
TOTAL	mV	0	7	7
Voltaje				
Total	V	73.78	76.96	73.71

Tabla 69

Monitoreo de voltaje de la CCM3

CCM 3				
N° Horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1.0	mV/h	30.0	50.7	94.1
2.0	mV/h	45.1	96.6	102.7
3.0	mV/h	45.1	175.8	114.5
4.0	mV/h	46.7	230.6	174.5
5.0	mV/h	51.5	244.5	226.4
6.0	mV/h	53.4	247.0	234.5
7.0	mV/h	55.7	253.2	243.5
8.0	mV/h	57.4	256.3	266.2
9.0	mV/h	61.8	260.7	281.5
10.0	mV/h	63.9	261.5	303.2
11.0	mV/h	63.4	263.4	306.2
12.0	mV/h	66.6	263.8	312.0
13.0	mV/h	67.6	264.5	319.9
14.0	mV/h	69.4	266.9	345.0
15.0	mV/h	94.8	274.8	349.0
16.0	mV/h	98.6	279.9	354.7
17.0	mV/h	98.8	282.6	358.4
18.0	mV/h	113.8	285.5	358.1
19.0	mV/h	116.1	288.8	356.9
20.0	mV/h	127.8	289.2	355.1

21.0	mV/h	143.4	290.9	353.1
22.0	mV/h	151.4	293.8	351.1
23.0	mV/h	153.3	293.9	348.5
24.0	mV/h	160.3	316.7	345.8
25.0	mV/h	166.6	316.1	343.0
26.0	mV/h	167.7	315.6	340.7
27.0	mV/h	169.1	311.5	339.0
28.0	mV/h	172.9	304.4	340.5
29.0	mV/h	190.1	297.7	344.9
30.0	mV/h	191.6	297.2	348.5
31.0	mV/h	191.7	294.6	351.8
32.0	mV/h	192.7	290.0	357.0
33.0	mV/h	196.2	285.8	362.2
34.0	mV/h	200.7	278.3	367.4
35.0	mV/h	201.8	268.5	370.9
36.0	mV/h	202.9	289.6	372.6
37.0	mV/h	203.0	296.5	370.5
38.0	mV/h	203.6	299.4	369.3
39.0	mV/h	212.8	304.0	368.6
40.0	mV/h	213.1	317.4	366.8
41.0	mV/h	214.4	319.7	364.7
42.0	mV/h	214.6	322.3	362.5
43.0	mV/h	216.1	326.0	360.2
44.0	mV/h	216.3	326.3	358.2
45.0	mV/h	217.3	327.3	355.7
46.0	mV/h	218.1	333.6	352.9
47.0	mV/h	218.2	335.8	350.1
48.0	mV/h	218.4	332.1	347.6
49.0	mV/h	219.2	328.5	344.6
50.0	mV/h	219.4	328.0	343.8
51.0	mV/h	220.8	310.1	350.2
52.0	mV/h	221.0	295.5	366.2
53.0	mV/h	222.6	294.3	380.5
54.0	mV/h	221.4	293.0	379.3
55.0	mV/h	223.3	289.1	377.4
56.0	mV/h	223.8	286.3	375.1
57.0	mV/h	226.5	281.6	373.0
58.0	mV/h	227.7	274.1	370.8
59.0	mV/h	229.7	279.7	368.3
60.0	mV/h	222.6	281.3	365.9
61.0	mV/h	223.5	282.9	363.8
62.0	mV/h	220.5	291.7	361.4
63.0	mV/h	214.6	295.1	358.8
64.0	mV/h	218.3	299.6	357.0

65.0	mV/h	220.9	302.0	360.2
66.0	mV/h	223.7	309.5	371.2
67.0	mV/h	224.6	310.7	383.1
68.0	mV/h	226.0	316.7	387.6
69.0	mV/h	226.3	323.1	386.0
70.0	mV/h	227.7	328.8	386.5
71.0	mV/h	228.3	331.4	388.7
72.0	mV/h	231.3	332.1	388.2
73.0	mV/h	230.1	333.4	389.0
74.0	mV/h	229.1	336.2	389.0
75.0	mV/h	229.2	343.9	384.9
76.0	mV/h	229.0	346.5	384.8
77.0	mV/h	231.5	344.4	385.0
78.0	mV/h	230.0	338.8	382.5
79.0	mV/h	227.6	335.9	380.3
80.0	mV/h	230.3	333.5	378.1
81.0	mV/h	231.1	329.6	375.3
82.0	mV/h	234.3	322.0	372.6
83.0	mV/h	237.6	320.3	369.8
84.0	mV/h	237.6	319.6	366.4
85.0	mV/h	241.3	318.5	363.1
86.0	mV/h	242.4	315.2	359.9
87.0	mV/h	242.6	312.7	361.9
88.0	mV/h	246.6	304.1	369.0
89.0	mV/h	252.7	300.5	378.5
90.0	mV/h	253.2	307.7	389.0
91.0	mV/h	254.2	318.3	390.6
92.0	mV/h	255.9	333.8	393.3
93.0	mV/h	256.9	336.5	388.9
94.0	mV/h	260.7	341.1	386.5
95.0	mV/h	264.3	347.5	383.8
96.0	mV/h	265.1	348.8	380.4
97.0	mV/h	265.2	346.8	379.9
98.0	mV/h	265.0	339.7	372.0
99.0	mV/h	264.9	335.8	367.7
100.0	mV/h	264.7	330.9	366.8
101.0	mV/h	264.2	326.0	365.4
102.0	mV/h	263.3	318.8	363.0
103.0	mV/h	261.8	315.6	362.4
104.0	mV/h	260.8	312.3	360.4
105.0	mV/h	258.6	300.3	358.2
106.0	mV/h	255.6	301.3	356.1
107.0	mV/h	252.7	313.2	353.0
108.0	mV/h	250.1	319.3	350.0

109.0	mV/h	249.2	322.7	349.0
110.0	mV/h	252.7	326.0	347.6
111.0	mV/h	258.0	326.4	345.9
112.0	mV/h	262.7	334.1	345.5
113.0	mV/h	265.7	335.2	349.3
114.0	mV/h	267.6	340.7	355.5
115.0	mV/h	267.6	341.7	360.2
116.0	mV/h	269.5	345.8	363.4
117.0	mV/h	271.8	347.6	365.1
118.0	mV/h	272.4	347.8	367.0
119.0	mV/h	273.6	348.0	368.6
120.0	mV/h	275.3	349.5	366.7
121.0	mV/h	275.9	350.2	364.0
122.0	mV/h	282.9	352.7	363.7
123.0	mV/h	290.5	355.0	363.1
124.0	mV/h	292.1	355.3	361.6
125.0	mV/h	292.8	355.4	359.4
126.0	mV/h	293.0	349.9	357.8
127.0	mV/h	294.2	342.3	356.8
128.0	mV/h	292.6	333.6	355.3
129.0	mV/h	290.1	329.3	353.5
130.0	mV/h	288.2	325.0	351.6
131.0	mV/h	286.8	320.8	349.6
132.0	mV/h	284.7	323.7	348.5
133.0	mV/h	282.7	329.2	347.4
134.0	mV/h	280.3	334.8	349.0
135.0	mV/h	278.0	350.3	354.4
136.0	mV/h	278.6	351.1	360.5
137.0	mV/h	277.0	352.7	372.2
138.0	mV/h	277.0	353.6	380.9
139.0	mV/h	279.2	354.9	380.2
140.0	mV/h	281.1	357.2	378.7
141.0	mV/h	284.6	358.0	380.9
142.0	mV/h	288.4	354.5	385.1
143.0	mV/h	291.2	351.7	389.3
144.0	mV/h	292.1	349.5	389.8
145.0	mV/h	295.9	348.4	385.8
146.0	mV/h	297.7	343.8	384.9
147.0	mV/h	296.4	343.3	385.3
148.0	mV/h	295.6	342.7	383.3
149.0	mV/h	294.1	339.9	381.3
150.0	mV/h	291.9	339.5	380.6
151.0	mV/h	288.0	339.4	378.5
152.0	mV/h	287.4	336.5	377.4

153.0	mV/h	286.1	334.4	378.4
154.0	mV/h	284.9	332.5	377.9
155.0	mV/h	282.7	331.2	374.5
156.0	mV/h	281.6	338.5	372.9
157.0	mV/h	279.7	346.4	370.3
158.0	mV/h	279.5	349.7	369.2
159.0	mV/h	274.9	351.1	369.5
160.0	mV/h	271.5	353.6	376.6
161.0	mV/h	270.9	356.0	392.3
162.0	mV/h	284.3	357.5	388.8
163.0	mV/h	284.6	359.5	370.3
164.0	mV/h	288.2	364.2	377.9
165.0	mV/h	293.2	368.7	384.9
166.0	mV/h	299.6	368.3	386.9
167.0	mV/h	307.0	368.7	381.0
168.0	mV/h	311.6	364.0	382.9
169.0	mV/h	311.1	359.8	382.1
170.0	mV/h	310.1	357.2	384.6
171.0	mV/h	308.7	354.0	387.9
172.0	mV/h	307.1	354.5	388.0
173.0	mV/h	307.3	350.8	384.3
174.0	mV/h	304.1	348.8	381.5
175.0	mV/h	302.1	344.2	381.0
176.0	mV/h	298.3	360.7	360.5
177.0	mV/h	294.6	362.3	372.2
178.0	mV/h	291.5	358.0	380.9
179.0	mV/h	288.8	354.5	380.2
180.0	mV/h	286.7	351.7	378.7
181.0	mV/h	283.5	349.5	380.9
182.0	mV/h	283.9	348.4	385.1
183.0	mV/h	287.9	343.8	389.3
184.0	mV/h	289.4	343.3	389.8
185.0	mV/h	292.3	342.7	385.8
186.0	mV/h	293.5	339.9	384.9
187.0	mV/h	296.1	339.5	385.3
188.0	mV/h	298.4	339.4	383.3
189.0	mV/h	301.1	336.5	381.3
190.0	mV/h	304.9	334.4	380.6
191.0	mV/h	305.5	332.5	378.5
192.0	mV/h	308.6	331.2	377.4
193.0	mV/h	309.5	338.5	378.4
194.0	mV/h	310.6	346.4	377.9
195.0	mV/h	312.4	349.7	374.5
196.0	mV/h	313.3	351.1	372.9

197.0	mV/h	311.9	353.6	370.3
198.0	mV/h	305.4	356.0	369.2
199.0	mV/h	294.6	357.5	369.5
200.0	mV/h	291.5	359.5	376.6
201.0	mV/h	288.8	364.2	392.3
202.0	mV/h	286.7	368.7	388.8
203.0	mV/h	283.5	368.3	370.3
204.0	mV/h	283.9	368.7	377.9
205.0	mV/h	287.9	364.0	384.9
206.0	mV/h	289.4	359.8	386.9
207.0	mV/h	292.3	357.2	381.0
208.0	mV/h	293.5	354.0	382.9
209.0	mV/h	296.1	354.5	382.1
210.0	mV/h	298.4	350.8	384.6
211.0	mV/h	301.1	348.8	387.9
212.0	mV/h	304.9	344.2	388.0
213.0	mV/h	305.5	360.7	384.3
214.0	mV/h	308.6	362.3	381.5
215.0	mV/h	309.5	363.9	381.0
216.0	mV/h	310.6	365.5	382.9
TOTAL	mV	52461.9 9	70074.7 2	78205.1 6
Voltaje Total	V	52.46	70.07	78.21

Tabla 70

Monitoreo de voltaje de la CCM4

CCM 4				
N° Horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	38.3	63.6	95.4
2	mV/h	75.7	158.9	119.6
3	mV/h	94.3	215.1	124.4
4	mV/h	106.8	240.0	147.7
5	mV/h	118.1	252.0	202.6
6	mV/h	129.8	253.1	209.0
7	mV/h	137.1	261.1	226.6
8	mV/h	140.0	262.3	226.9
9	mV/h	141.2	263.1	230.2
10	mV/h	144.2	264.1	238.4
11	mV/h	146.9	264.3	238.9
12	mV/h	147.1	265.0	239.4

13	mV/h	147.3	265.5	240.7
14	mV/h	149.0	266.0	241.7
15	mV/h	149.8	269.4	243.8
16	mV/h	149.2	271.1	246.1
17	mV/h	149.3	275.5	248.2
18	mV/h	149.5	284.5	248.7
19	mV/h	148.9	297.1	258.2
20	mV/h	148.0	300.4	260.9
21	mV/h	147.6	301.6	268.4
22	mV/h	147.6	301.3	271.2
23	mV/h	148.2	302.6	293.1
24	mV/h	151.4	302.8	293.3
25	mV/h	151.8	300.7	298.5
26	mV/h	155.9	300.5	301.4
27	mV/h	158.6	300.1	303.5
28	mV/h	163.1	298.5	305.7
29	mV/h	168.5	296.1	306.2
30	mV/h	175.8	293.6	311.2
31	mV/h	184.4	290.7	312.7
32	mV/h	189.2	287.6	315.3
33	mV/h	188.9	284.6	320.4
34	mV/h	189.5	281.8	323.5
35	mV/h	189.7	279.4	323.8
36	mV/h	191.9	280.8	324.8
37	mV/h	192.7	287.1	325.6
38	mV/h	193.2	303.4	332.6
39	mV/h	193.2	311.0	335.3
40	mV/h	193.0	315.5	336.2
41	mV/h	192.4	315.9	343.1
42	mV/h	192.7	316.7	347.6
43	mV/h	191.2	321.1	348.5
44	mV/h	189.8	324.4	349.5
45	mV/h	187.8	326.3	349.7
46	mV/h	186.1	326.6	345.4
47	mV/h	185.2	317.1	341.3
48	mV/h	186.9	315.1	336.3
49	mV/h	186.4	312.5	335.3
50	mV/h	203.6	309.4	338.7
51	mV/h	216.3	306.3	342.9
52	mV/h	229.6	303.3	346.2
53	mV/h	232.3	300.4	350.0
54	mV/h	234.0	295.7	352.6
55	mV/h	235.2	291.8	354.7
56	mV/h	233.8	290.6	355.9

57	mV/h	232.5	296.6	356.0
58	mV/h	230.5	303.9	356.5
59	mV/h	229.0	311.0	356.2
60	mV/h	227.1	315.5	354.0
61	mV/h	225.5	316.7	352.6
62	mV/h	223.6	320.0	350.7
63	mV/h	222.9	326.6	350.8
64	mV/h	221.6	335.5	351.1
65	mV/h	219.0	345.7	352.1
66	mV/h	217.6	347.0	355.2
67	mV/h	216.4	348.3	362.6
68	mV/h	226.7	347.0	376.0
69	mV/h	229.1	344.1	383.2
70	mV/h	230.3	342.5	379.9
71	mV/h	230.0	340.7	376.5
72	mV/h	229.0	340.5	374.5
73	mV/h	227.7	338.0	373.7
74	mV/h	226.3	334.6	367.6
75	mV/h	223.8	331.8	363.4
76	mV/h	222.6	328.6	358.0
77	mV/h	221.4	325.0	355.7
78	mV/h	220.5	321.2	353.6
79	mV/h	220.9	317.3	366.1
80	mV/h	218.3	313.7	382.7
81	mV/h	218.2	314.6	391.8
82	mV/h	217.3	316.6	396.1
83	mV/h	214.6	338.6	394.6
84	mV/h	213.1	342.3	393.5
85	mV/h	214.6	343.8	391.8
86	mV/h	218.4	345.5	388.4
87	mV/h	221.0	345.5	387.0
88	mV/h	223.3	350.7	384.1
89	mV/h	223.7	347.7	380.2
90	mV/h	227.6	346.0	379.0
91	mV/h	227.7	345.9	376.4
92	mV/h	230.1	343.0	369.7
93	mV/h	231.3	340.7	365.7
94	mV/h	231.5	338.2	362.5
95	mV/h	231.1	336.3	357.8
96	mV/h	229.7	335.3	357.9
97	mV/h	228.3	335.0	359.6
98	mV/h	226.5	332.0	360.3
99	mV/h	224.6	328.7	363.0
100	mV/h	222.6	325.3	370.2

101	mV/h	220.8	321.7	381.2
102	mV/h	219.2	318.2	390.2
103	mV/h	219.4	314.2	395.4
104	mV/h	223.5	309.8	396.8
105	mV/h	229.2	307.9	392.0
106	mV/h	234.3	310.8	391.4
107	mV/h	237.6	319.5	390.9
108	mV/h	241.3	327.8	389.7
109	mV/h	246.6	330.6	387.3
110	mV/h	253.2	332.1	384.1
111	mV/h	260.7	337.9	380.7
112	mV/h	264.3	348.6	377.1
113	mV/h	265.1	357.0	374.1
114	mV/h	265.2	360.9	375.8
115	mV/h	265.0	370.7	384.2
116	mV/h	264.9	372.0	389.5
117	mV/h	264.7	368.7	394.9
118	mV/h	264.2	366.4	392.7
119	mV/h	263.3	364.1	390.2
120	mV/h	261.8	361.8	388.3
121	mV/h	260.8	358.8	387.9
122	mV/h	258.6	354.8	385.5
123	mV/h	255.6	352.0	385.6
124	mV/h	252.7	348.8	385.2
125	mV/h	250.1	345.3	385.1
126	mV/h	249.2	340.5	381.6
127	mV/h	252.7	337.0	383.6
128	mV/h	258.0	333.4	383.3
129	mV/h	262.7	329.8	383.0
130	mV/h	265.7	329.6	382.5
131	mV/h	267.6	336.0	379.2
132	mV/h	270.9	345.3	376.8
133	mV/h	275.9	355.7	376.8
134	mV/h	282.9	359.6	355.9
135	mV/h	290.5	361.2	356.0
136	mV/h	294.2	367.1	356.5
137	mV/h	293.0	368.0	356.2
138	mV/h	292.8	372.8	354.0
139	mV/h	292.6	373.5	352.6
140	mV/h	292.1	374.2	350.7
141	mV/h	290.1	378.3	350.8
142	mV/h	288.2	381.0	351.1
143	mV/h	286.8	380.8	352.1
144	mV/h	284.7	381.9	355.2

145	mV/h	282.7	377.8	362.6
146	mV/h	280.3	373.8	376.0
147	mV/h	278.0	370.3	383.2
148	mV/h	275.2	366.5	379.9
149	mV/h	272.4	362.5	376.5
150	mV/h	269.5	358.7	374.5
151	mV/h	267.6	356.0	373.7
152	mV/h	271.8	355.2	367.6
153	mV/h	278.6	355.6	363.4
154	mV/h	284.6	372.8	358.0
155	mV/h	284.3	378.2	355.7
156	mV/h	288.2	387.6	353.6
157	mV/h	293.2	387.5	366.1
158	mV/h	299.6	385.4	382.7
159	mV/h	306.9	382.6	391.8
160	mV/h	311.6	380.0	396.1
161	mV/h	311.1	379.7	394.6
162	mV/h	310.1	377.0	393.5
163	mV/h	308.7	372.4	391.8
164	mV/h	307.1	369.7	388.4
165	mV/h	307.3	368.0	387.0
166	mV/h	304.2	365.8	384.1
167	mV/h	302.1	363.3	380.2
168	mV/h	298.3	360.3	379.0
169	mV/h	294.5	357.0	376.4
170	mV/h	291.5	353.4	369.7
171	mV/h	288.8	349.7	365.7
172	mV/h	286.7	354.2	362.5
173	mV/h	283.5	363.5	357.8
174	mV/h	283.9	371.8	357.9
175	mV/h	289.4	382.3	359.6
176	mV/h	293.5	388.1	360.3
177	mV/h	287.9	390.6	363.0
178	mV/h	292.3	381.0	370.2
179	mV/h	296.1	380.8	381.2
180	mV/h	298.4	381.9	390.2
181	mV/h	301.1	377.8	395.4
182	mV/h	304.9	373.8	396.8
183	mV/h	309.5	370.3	392.0
184	mV/h	294.2	366.5	391.4
185	mV/h	293.0	362.5	390.9
186	mV/h	292.8	358.7	389.7
187	mV/h	292.6	356.0	387.3
188	mV/h	292.1	355.2	384.1

189	mV/h	290.1	355.6	380.7
190	mV/h	288.2	372.8	377.1
191	mV/h	286.8	378.2	374.1
192	mV/h	284.7	387.6	375.8
193	mV/h	282.7	387.5	384.2
194	mV/h	280.3	385.4	389.5
195	mV/h	278.0	382.6	394.9
196	mV/h	275.2	380.0	392.7
197	mV/h	272.4	379.7	390.2
198	mV/h	269.5	377.0	388.3
199	mV/h	267.6	372.4	387.9
200	mV/h	271.8	369.7	385.5
201	mV/h	278.6	368.0	385.6
202	mV/h	284.6	365.8	385.2
203	mV/h	284.3	363.3	385.1
204	mV/h	288.2	360.3	381.6
205	mV/h	293.2	357.0	383.6
206	mV/h	299.6	353.4	383.3
207	mV/h	306.9	349.7	383.0
208	mV/h	311.6	354.2	382.5
209	mV/h	311.1	363.5	379.2
210	mV/h	310.1	371.8	376.8
211	mV/h	308.7	382.3	376.8
212	mV/h	307.1	388.1	381.6
213	mV/h	307.3	390.6	383.6
214	mV/h	304.2	369.1	383.3
215	mV/h	302.1	369.0	383.0
216	mV/h	298.3	368.9	382.5
TOTAL	mV	51771.6	72578.2	76219.2
Voltaje Total	V	51.8	72.6	76.2

Tabla 71

Monitoreo de voltaje de la CCM5

CCM5				
N° Horas	Unidad de Medida	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	mV/h	65.6	63.9	55.2
2	mV/h	102.6	65.6	119.5
3	mV/h	136.8	77.8	159.9
4	mV/h	137.9	155.0	186.3
5	mV/h	205.9	173.9	202.5

6	mV/h	205.9	174.3	213.3
7	mV/h	213.3	185.1	214.5
8	mV/h	219.7	186.4	223.0
9	mV/h	220.4	188.7	230.6
10	mV/h	221.5	191.9	241.4
11	mV/h	221.7	193.5	247.8
12	mV/h	225.2	193.7	248.8
13	mV/h	225.6	203.2	249.4
14	mV/h	226.7	203.2	249.6
15	mV/h	227.9	203.3	249.8
16	mV/h	228.1	204.9	250.6
17	mV/h	228.5	204.9	250.4
18	mV/h	230.9	205.4	250.2
19	mV/h	233.0	208.2	255.6
20	mV/h	234.6	209.3	259.3
21	mV/h	234.6	214.9	267.0
22	mV/h	236.1	216.3	272.7
23	mV/h	237.4	222.8	276.6
24	mV/h	238.9	227.0	277.0
25	mV/h	248.3	231.3	278.3
26	mV/h	248.4	233.1	280.1
27	mV/h	249.6	236.5	282.1
28	mV/h	250.0	238.1	282.2
29	mV/h	250.2	238.5	282.2
30	mV/h	250.5	241.1	283.4
31	mV/h	252.3	242.4	283.2
32	mV/h	253.8	242.4	283.3
33	mV/h	254.1	244.7	283.3
34	mV/h	254.6	247.3	280.5
35	mV/h	256.7	255.7	280.2
36	mV/h	261.5	257.8	278.3
37	mV/h	261.9	262.4	276.6
38	mV/h	263.2	266.5	271.3
39	mV/h	264.0	279.1	270.7
40	mV/h	264.8	285.9	276.6
41	mV/h	264.9	287.5	278.6
42	mV/h	269.1	288.9	279.5
43	mV/h	270.5	290.2	280.5
44	mV/h	273.9	293.1	283.8
45	mV/h	274.5	294.2	289.6
46	mV/h	277.7	297.5	289.6
47	mV/h	272.2	299.5	290.5
48	mV/h	275.8	299.1	294.9
49	mV/h	276.7	300.5	296.7

50	mV/h	278.6	305.4	299.2
51	mV/h	279.3	306.0	303.8
52	mV/h	280.0	306.1	304.9
53	mV/h	286.4	307.0	307.7
54	mV/h	288.6	310.5	307.9
55	mV/h	289.0	350.7	306.3
56	mV/h	296.1	368.0	304.9
57	mV/h	293.8	369.1	303.3
58	mV/h	296.9	373.3	302.5
59	mV/h	297.2	378.0	300.4
60	mV/h	299.4	379.9	297.9
61	mV/h	300.1	380.1	295.9
62	mV/h	302.2	380.2	294.3
63	mV/h	315.1	381.0	291.5
64	mV/h	322.5	379.3	289.1
65	mV/h	331.7	380.8	286.3
66	mV/h	357.7	380.2	283.3
67	mV/h	367.6	378.2	280.5
68	mV/h	371.4	375.5	287.3
69	mV/h	380.7	371.8	294.0
70	mV/h	381.8	367.7	296.5
71	mV/h	385.4	363.7	297.4
72	mV/h	395.8	359.8	297.5
73	mV/h	394.1	355.9	299.8
74	mV/h	391.5	352.7	306.2
75	mV/h	380.8	350.5	310.4
76	mV/h	377.0	354.8	312.1
77	mV/h	373.1	368.8	315.8
78	mV/h	371.4	383.3	319.6
79	mV/h	368.7	394.3	322.0
80	mV/h	364.7	397.9	323.3
81	mV/h	340.9	396.0	324.4
82	mV/h	325.8	382.8	325.3
83	mV/h	311.4	381.8	325.1
84	mV/h	313.7	380.3	323.2
85	mV/h	322.3	381.0	321.0
86	mV/h	345.2	377.0	320.1
87	mV/h	362.4	376.1	318.9
88	mV/h	368.0	373.3	317.0
89	mV/h	385.1	370.3	314.5
90	mV/h	389.8	367.2	311.9
91	mV/h	395.4	365.0	309.2
92	mV/h	391.8	364.0	306.2
93	mV/h	384.2	360.6	302.8

94	mV/h	382.2	358.2	299.9
95	mV/h	379.1	357.7	297.1
96	mV/h	375.7	355.3	297.9
97	mV/h	374.7	353.1	306.0
98	mV/h	371.0	351.8	311.0
99	mV/h	368.3	348.8	314.6
100	mV/h	366.0	355.7	319.5
101	mV/h	364.4	356.7	326.3
102	mV/h	335.5	375.5	332.9
103	mV/h	305.4	394.4	335.9
104	mV/h	325.1	397.5	332.4
105	mV/h	348.6	392.7	330.3
106	mV/h	352.6	391.7	329.0
107	mV/h	367.4	388.8	327.1
108	mV/h	372.0	385.4	312.8
109	mV/h	383.3	382.0	312.5
110	mV/h	385.3	376.2	311.1
111	mV/h	389.0	373.1	309.3
112	mV/h	390.3	373.1	308.6
113	mV/h	394.5	370.4	307.7
114	mV/h	387.7	369.1	305.4
115	mV/h	385.0	365.9	303.1
116	mV/h	378.9	344.1	300.2
117	mV/h	369.9	330.7	306.7
118	mV/h	350.5	349.8	316.2
119	mV/h	347.1	365.3	324.6
120	mV/h	322.0	367.9	330.2
121	mV/h	314.6	375.2	330.1
122	mV/h	300.2	376.9	332.6
123	mV/h	302.5	388.3	338.7
124	mV/h	316.0	393.9	346.9
125	mV/h	321.0	395.1	353.6
126	mV/h	326.5	395.0	354.5
127	mV/h	344.9	384.3	348.2
128	mV/h	350.0	380.4	344.8
129	mV/h	378.3	380.1	343.8
130	mV/h	381.2	378.7	342.2
131	mV/h	386.7	376.2	340.1
132	mV/h	393.3	373.5	337.6
133	mV/h	395.1	371.1	334.6
134	mV/h	390.3	369.0	331.3
135	mV/h	387.2	368.4	327.9
136	mV/h	383.6	365.6	324.3
137	mV/h	377.8	352.6	320.4

138	mV/h	376.2	343.1	316.7
139	mV/h	347.9	328.8	313.0
140	mV/h	339.0	352.7	309.8
141	mV/h	322.7	360.8	313.1
142	mV/h	314.7	363.4	324.0
143	mV/h	370.4	364.8	330.0
144	mV/h	374.1	378.5	334.7
145	mV/h	386.6	387.0	337.1
146	mV/h	388.8	389.2	341.6
147	mV/h	389.3	392.2	348.5
148	mV/h	391.7	391.8	353.6
149	mV/h	392.0	386.4	354.4
150	mV/h	395.9	386.8	352.9
151	mV/h	395.1	384.5	351.0
152	mV/h	396.4	383.6	348.7
153	mV/h	397.0	380.2	346.2
154	mV/h	395.5	377.0	343.8
155	mV/h	395.8	374.2	341.3
156	mV/h	389.5	373.4	338.4
157	mV/h	388.4	358.7	335.3
158	mV/h	387.3	353.3	332.3
159	mV/h	386.6	338.2	332.7
160	mV/h	384.7	335.9	333.1
161	mV/h	384.1	319.3	330.2
162	mV/h	383.0	320.1	326.4
163	mV/h	380.9	335.0	327.6
164	mV/h	380.7	338.5	324.9
165	mV/h	380.8	353.4	322.4
166	mV/h	377.0	356.2	319.5
167	mV/h	373.1	372.0	316.5
168	mV/h	371.4	372.7	313.6
169	mV/h	368.7	383.9	310.8
170	mV/h	364.7	394.6	308.5
171	mV/h	340.9	396.2	312.8
172	mV/h	325.8	392.0	312.5
173	mV/h	311.4	376.5	311.1
174	mV/h	313.7	376.0	309.3
175	mV/h	322.3	375.4	308.6
176	mV/h	345.2	374.6	307.7
177	mV/h	362.4	372.5	305.4
178	mV/h	368.0	370.4	303.1
179	mV/h	385.1	370.0	300.2
180	mV/h	389.8	367.9	306.7
181	mV/h	395.4	375.2	316.2

182	mV/h	391.8	376.9	324.6
183	mV/h	384.2	388.3	330.2
184	mV/h	382.2	393.9	330.1
185	mV/h	379.1	395.1	332.6
186	mV/h	375.7	395.0	338.7
187	mV/h	374.7	384.3	346.9
188	mV/h	371.0	380.4	353.6
189	mV/h	368.3	380.1	354.5
190	mV/h	366.0	378.7	348.2
191	mV/h	364.4	376.2	344.8
192	mV/h	335.5	373.5	343.8
193	mV/h	305.4	371.1	342.2
194	mV/h	325.1	369.0	340.1
195	mV/h	348.6	368.4	337.6
196	mV/h	352.6	365.6	334.6
197	mV/h	367.4	352.6	331.3
198	mV/h	372.0	343.1	327.9
199	mV/h	383.3	328.8	324.3
200	mV/h	385.3	352.7	320.4
201	mV/h	389.0	360.8	316.7
202	mV/h	390.3	363.4	313.0
203	mV/h	394.5	364.8	309.8
204	mV/h	387.7	378.5	313.1
205	mV/h	385.0	387.0	324.0
206	mV/h	378.9	389.2	330.0
207	mV/h	369.9	392.2	334.7
208	mV/h	350.5	391.8	337.1
209	mV/h	347.1	386.4	341.6
210	mV/h	322.0	386.8	348.5
211	mV/h	314.6	384.5	353.6
212	mV/h	300.2	383.6	354.4
213	mV/h	302.5	380.2	352.9
214	mV/h	316.0	377.0	351.0
215	mV/h	321.0	374.2	348.7
216	mV/h	326.5	373.4	346.2
TOTAL		71329.8	72791.2	66335.3
Voltaje Total		V	71.3	72.8
				66.3

Tabla 72

Suma total del Voltaje registrado en las CCM

Voltaje Total (V)			
Celdas	Replica 1	Replica 2	Replica 3
CCM1	1795	2279	2709
CCM2	3074	2896	3066
CCM3	2076	2822	2376
CCM4	1604	2459	2272
CCM PC	2979	3057	2473

8.5. Anexo V- Análisis de laboratorio de los parámetros químicos de la DQO y la DBO₅

8.5.1. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) en la fase de aclimatación



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

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1809005

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho - Lima - Lima.
Producto : Agua Residual.
Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate - Lima - Lima.
Referencia del plan de muestreo : No Aplica
Procedimiento de muestreo : No Aplica
Fecha de recepción de las muestras : 2018/09/05
Fecha de inicio del ensayo : 2018/09/05
Fecha de término del ensayo : 2018/09/10

Código de Laboratorio: 1809005-1		Estación de Muestreo: ARD-01		Fecha de Muestreo: 2018/09/05 Hora: 10:20 Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	808	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	1 748	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.
Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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

Lima, 11 de Setiembre del 2018.

DELTA LAB S.A.C.
WILDERA ROSALE TORRES
JEFE DE LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO

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

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809005

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto “Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica”
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/05

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO				
Estación	Hora	COORDENADAS		
		ESTE	NORTE	ALTITUD
ARD-01	10:20	0294094	8671071	—

Nota:

- Fecha de medición: 2018/06/05
- Datos proporcionados por el cliente.


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

Lima, 11 de Setiembre del 2018.

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

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

8.5.2. Análisis de laboratorio del post-tratamiento en la fase de aclimatación



Registro N° LE - 077

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

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1809042

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU – Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/09/14
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/09/14
 Fecha de término del ensayo : 2018/09/19

Código de Laboratorio: 1809042-1		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°4		Fecha de Muestreo: 2018/09/14	
				Hora: 08:30	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	109	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	191	mg/L

Código de Laboratorio: 1809042-2		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°3		Fecha de Muestreo: 2018/09/14	
				Hora: 08:40	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	132	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	232	mg/L

Código de Laboratorio: 1809042-3		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°2		Fecha de Muestreo: 2018/09/14	
				Hora: 08:50	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	139	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	244	mg/L

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

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

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

Pág. 2/2

INFORME DE ENSAYO N° 1809042

Código de Laboratorio: 1809042-4		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°1		Fecha de Muestreo: 2018/09/14	
				Hora: 09:00	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	104	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	183	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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

Lima, 21 de Setiembre del 2018.


DELTA LAB S.A.C.
 WILFREDO CONTRERAS
 JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO


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

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809042

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU – Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/14

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO				
Estación	Hora	COORDENADAS		
		ESTE	NORTE	ALTITUD
LAB. UPeU CCM N°4	08:30	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°3	08:40	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°2	08:50	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°1	09:00	0299522	8674068	583

Nota:

- Fecha de medición: 2018/09/14
- Datos proporcionados por el cliente.



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

Lima, 21 de Setiembre del 2018.

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

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

8.5.3. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 1



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

Registro N° LE-077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1809045

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual, Santa Clara Ate – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/09/14
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/09/14
 Fecha de término del ensayo : 2018/09/19

Código de Laboratorio: 1809045-1		Estación de Muestreo: M.G.2 –PTAR-ARD-02		Fecha de Muestreo: 2018/09/14	
				Hora: 12:00	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	1 059	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	1 853	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas: 1

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

Lima, 21 de Setiembre del 2018.

WILDER CONDORI PACHECO
 JEFE DE LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICA

RAQUEL ROSALES TORRES
 SUB GERENTE DE CALIDAD
 CIP N° 209612

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809045

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual, Santa Clara Ate – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/14

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO				
Estación	Hora	COORDENADAS		
		ESTE	NORTE	ALTITUD
M.G.2 –PTAR-ARD-02	12:00	0294094	8671071	419

Nota:

- Fecha de medición: 2018/09/14
- Datos proporcionados por el cliente.


DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALES TORRES
 SUB GERENTE DE CALIDAD
 SIP N° 2056.2

Lima, 21 de Setiembre del 2018.

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

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

8.5.4. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 1



Registro N° LE - 077

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

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1809099

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Luriganchos - Lima - Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPEU - Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Luriganchos - Lima - Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/09/25
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/09/25
 Fecha de término del ensayo : 2018/10/01

Código de Laboratorio: 1809099-1		Estación de Muestreo: LAB. UPEU CCM N°1		Fecha de Muestreo: 2018/09/24 Hora: 17:30	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	140	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	244	mg/L

Código de Laboratorio: 1809099-2		Estación de Muestreo: LAB. UPEU CCM N°2		Fecha de Muestreo: 2018/09/24 Hora: 17:20	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	138	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	240	mg/L

Código de Laboratorio: 1809099-3		Estación de Muestreo: LAB. UPEU CCM N°3		Fecha de Muestreo: 2018/09/24 Hora: 17:10	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	152	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	264	mg/L

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

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

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

Pág. 2/2

INFORME DE ENSAYO N° 1809099

Código de Laboratorio: 1809099-4		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°4		Fecha de Muestreo: 2018/09/24	
				Hora: 17:00	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	99	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	175	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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


WILDER CONDOR CASTRO
JEFE DE LABORATORIO DE FÍSICO QUÍMICA


RAQUEL ROSALES TORRES
SUB GERENTE DE CALIDAD
CIP N° 209612

Lima, 02 de Octubre del 2018.

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809099

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU – Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/25

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
LAB. UPeU CCM N°1	2018/09/24	17:30	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°2	2018/09/24	17:20	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°3	2018/09/24	17:10	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°4	2018/09/24	17:00	0299522	8674068	583

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.

DELTA LAB S.A.C.

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

Lima, 02 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.5. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 2



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

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1809098

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho - Lima - Lima.
Producto : Agua Residual.
Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate - Lima - Lima.
Referencia del plan de muestreo : No Aplica
Procedimiento de muestreo : No Aplica
Fecha de recepción de las muestras : 2018/09/25
Fecha de inicio del ensayo : 2018/09/25
Fecha de término del ensayo : 2018/10/01

Código de Laboratorio: 1809098-1	Estación de Muestreo: MUESTRA GENERAL ARD-N°03	Fecha de Muestreo: 2018/09/24 Hora: 16:30 Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica			
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	817	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	1 341	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012, 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017, Open Reflux Method.

Notas:

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

DELTA LAB S.A.C.
WILDER CONDORE CASTRO
JEFE DE LABORATORIO DE ENSAYO QUIMICA

DELTA LAB S.A.C.
RAQUEL ROSALYS TORRES
SUSCRIBENTE DE CALIDAD
CIP N° 209612

Lima, 02 de Octubre del 2018.

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809098

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/25

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
MUESTRA GENERAL ARD-N°03	2018/09/24	16:30	0294094	8671071	---

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.


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

Lima, 02 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.6. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 2



Registro N° LE - 077

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

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810006

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU – Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/10/03
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/10/03
 Fecha de término del ensayo : 2018/10/09

Código de Laboratorio: 1810006-1		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°4		Fecha de Muestreo: 2018/10/02	
				Hora: 13:20	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	165	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	289	mg/L

Código de Laboratorio: 1810006-2		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°3		Fecha de Muestreo: 2018/10/02	
				Hora: 13:30	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	154	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	268	mg/L

Código de Laboratorio: 1810006-3		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°2		Fecha de Muestreo: 2018/10/02	
				Hora: 13:40	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	101	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	179	mg/L

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

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

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

Pág. 2/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810006

Código de Laboratorio: 1810006-4		Estación de Muestreo: LAB. UPEU CCM N°1		Fecha de Muestreo: 2018/10/02	
				Hora: 13:50	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	185	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	325	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.

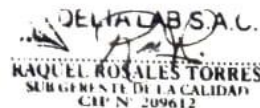
Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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



DELTA LAB S.A.C.
 WILDER CONDORI CASTRO
 JEFE DE LABORATORIO DE ENSAYO QUIMICA



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

Lima, 11 de Octubre del 2018.

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

Av. Carretera Central Km. 9,3 Mz. "A" Lt. 6 As. Ntra. Sra. de La Merced - Ate - Lima 03 - PERÚ
 Telefax: (511) 3560230 Celular: 947148233 Email: servicioalcliente@deltalabsac.com www.deltalabsac.com

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1810006

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho - Lima - Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU - Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho - Lima - Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/10/03

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
LAB. UPeU CCM N°4	2018/10/02	13:20	0294091	8671072	381
LAB. UPeU CCM N°3	2018/10/02	13:30	0294091	8671072	381
LAB. UPeU CCM N°2	2018/10/02	13:40	0294091	8671072	381
LAB. UPeU CCM N°1	2018/10/02	13:50	0294091	8671072	381

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.


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

Lima, 11 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.7. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) para la réplica 3



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

Registro N° LE - 077

Pág. 1/1

INFORME DE ENSAYO N° 1810005

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/10/03
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/10/03
 Fecha de término del ensayo : 2018/10/09

Código de Laboratorio: 1810005-1	Estación de Muestreo: MUESTRA GENERAL N°- 04	Fecha de Muestreo: 2018/10/02 Hora: 10:45 Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica			
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	726	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	1 276	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.
 Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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

WILDER CONDON CASTO
 JEFE DE LABORATORIO DE ENSAYO QUÍMICA

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

Lima, 11 de Octubre del 2018.

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1810005

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho - Lima - Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate - Lima - Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/10/03

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
MUESTRA GENERAL N° -04	2018/10/02	10:45	0294094	8671071	---

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.

DELTA LAB S.A.C.

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

Lima, 11 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.8. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para la réplica 3



Registro N° LE - 077

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

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810023

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a parir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de la Universidad Peruana Unión de Ingeniería Ambiental, Lurigancho – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/10/09
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/10/09
 Fecha de término del ensayo : 2018/10/15

Código de Laboratorio: 1810023-1		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°1		Fecha de Muestreo: 2018/10/09	
				Hora: 15:20	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	201	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	354	mg/L

Código de Laboratorio: 1810023-2		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°2		Fecha de Muestreo: 2018/10/09	
				Hora: 15:00	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	214	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	374	mg/L

Código de Laboratorio: 1810023-3		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°3		Fecha de Muestreo: 2018/10/09	
				Hora: 14:40	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	181	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	317	mg/L

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

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

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

Regulador N° LE - 077

Pág. 2/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810023

Código de Laboratorio: 1810023-4		Estación de Muestreo: LAB. UPeU CCM N°4		Fecha de Muestreo: 2018/10/09	
				Hora: 14:20	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	209	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	366	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.

Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

Notas:

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

Lima, 16 de Octubre del 2018.



DELTA LAB S.A.C.
 LABORATORIO DE ENSAYOS
 ANALISIS QUIMICO



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

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

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

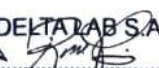
ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1809099

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio UPeU – Celdas de Combustible Microbiano (CCM), Lurigancho – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/09/25

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
LAB. UPeU CCM N°1	2018/09/24	17:30	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°2	2018/09/24	17:20	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°3	2018/09/24	17:10	0299522	8674068	583
LAB. UPeU CCM N°4	2018/09/24	17:00	0299522	8674068	583

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.


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

Lima, 02 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.9. Análisis de laboratorio del pre-tratamiento (muestra general) del Punto Central



Pág. 1/1

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1810062

Cliente	GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	Alameda-Naña Mz. C' Lt. 18, Lurigancho Lima - Lima.
Producto	Agua Residual.
Referencia del cliente	Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica, Santa Clara Ate Lima Lima.
Referencia del plan de muestreo	No Aplica
Procedimiento de muestreo	No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	2018/10/17

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
MUESTRA GENERAL PU-01	2018/10/16	11:00	0294094	8671071	419

Nota:

- * Datos proporcionados por el cliente

DELTA LAB S.A.C.

RAQUEL ROSALES TORRES
 M.B. GERENTE DE LA CALIDAD
 CIP N° 209612

Lima, 15 de Octubre del 2018.

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

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

8.5.10. Análisis de laboratorio del post-tratamiento para el punto central



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

Registro: 17° LE - 077

Pág. 1/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810134

Cliente : GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
 Domicilio legal : Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
 Producto : Agua Residual.
 Referencia del cliente : Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
 Procedencia de las muestras : Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, Lurigancho – Lima – Lima.
 Referencia del plan de muestreo : No Aplica
 Procedimiento de muestreo : No Aplica
 Fecha de recepción de las muestras : 2018/10/27
 Fecha de inicio del ensayo : 2018/10/27
 Fecha de término del ensayo : 2018/11/02

Código de Laboratorio: 1810134-1		Estación de Muestreo: PC-CCM N° 4		Fecha de Muestreo: 2018/10/26	
				Hora: 11:00	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	224	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	394	mg/L

Código de Laboratorio: 1810134-2		Estación de Muestreo: PC-CCM N° 3		Fecha de Muestreo: 2018/10/26	
				Hora: 11:10	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	193	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	337	mg/L

Código de Laboratorio: 1810134-3		Estación de Muestreo: PC-CCM N° 2		Fecha de Muestreo: 2018/10/26	
				Hora: 11:20	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	230	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	406	mg/L

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

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

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

Pág. 2/2

INFORME DE ENSAYO N° 1810134

Código de Laboratorio: 1810134-4		Estación de Muestreo: PC-CCM N° 1		Fecha de Muestreo: 2018/10/26	
				Hora: 11:30	
				Tipo de muestra: Agua Residual Doméstica	
Método de Referencia	Ensayo	Límite de Detección del Método	Límite de Cuantificación del Método	Resultado	Unidad
APHA 5210 B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	2	8	199	mg/L
APHA 5220 B	Demanda Química de Oxígeno	5	20	350	mg/L

Ensayo: Descripción del Método de Referencia:

Demanda Bioquímica de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd Ed. 2012. 5-Day BOD Test.
 Demanda Química de Oxígeno: SMEWW - APHA-AWWA-WEF Part 5220 B, 23rd Ed. 2017. Open Reflux Method.

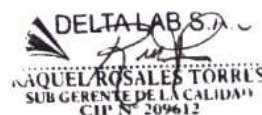
Notas:

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

Lima, 05 de Noviembre del 2018.



DELTA LAB S.A.C.
 WILDER CONZATTI CASTRO
 JEFE DE LABORATORIO DE FÍSICO QUÍMICA



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

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

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

ANEXO DEL INFORME DE ENSAYO N° 1810134

Cliente	: GUSTAVO TORRES ZAMATA Y ARACEL CONDORI PACHECO
Domicilio legal	: Alameda-Naña Mz. C Lt. 18, Lurigancho – Lima – Lima.
Producto	: Agua Residual.
Referencia del cliente	: Proyecto "Biodegradación de Materia Orgánica y Obtención de Bioelectricidad en CCM a partir de Agua Residual Doméstica"
Procedencia de las muestras	: Muestras enviadas por el cliente indicando lugar de muestreo: Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, Lurigancho – Lima – Lima.
Referencia del plan de muestreo	: No Aplica
Procedimiento de muestreo	: No Aplica
Fecha de recepción de las muestras	: 2018/10/27

DATOS DE LA ESTACIÓN DE MUESTREO					
Estación	Fecha	Hora	COORDENADAS		
			ESTE	NORTE	ALTITUD
PC-CCM N° 4	2018/10/26	11:00	0299522	8674068	552
PC-CCM N° 3	2018/10/26	11:10	0299522	8674068	552
PC-CCM N° 2	2018/10/26	11:20	0299522	8674068	552
PC-CCM N° 1	2018/10/26	11:30	0299522	8674068	552

Nota:

- Datos proporcionados por el cliente.



Lima, 05 de Noviembre del 2018.

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

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