

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Diseño de prototipo de filtración electroquímica de flujo
continuo abastecida con energía hidráulica para
tratamiento de aguas residuales municipales de
la PTAR Pampa Concepción - Cusco**

Javier Cardenas Teran

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Cusco, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

DISEÑO DE PROTOTIPO DE FILTRACIÓN ELECTROQUÍMICA DE FLUJO CONTINUO ABASTECIDA CON ENERGÍA HIDRÁULICA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE LA PTAR PAMPA CONCEPCIÓN – CUSCO

INFORME DE ORIGINALIDAD

31 %

INDICE DE SIMILITUD

30%

FUENTES DE INTERNET

15%

PUBLICACIONES

14%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 hdl.handle.net Fuente de Internet 2%

2 Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante 2%

3 www3.vivienda.gob.pe Fuente de Internet 1%

4 repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet 1%

5 repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet 1%

6 ciencia.lasalle.edu.co Fuente de Internet 1%

7 documentop.com Fuente de Internet 1%

8 www.slideshare.net Fuente de Internet 1%

| | | |
|----|--|------|
| 9 | repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet | 1 % |
| 10 | docplayer.es Fuente de Internet | 1 % |
| 11 | Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante | 1 % |
| 12 | Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante | <1 % |
| 13 | www.scielo.cl Fuente de Internet | <1 % |
| 14 | cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 15 | repositorio.uwiener.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 16 | repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 17 | camaradecomercioempresarial.org Fuente de Internet | <1 % |
| 18 | repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet | <1 % |
| 19 | repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |

| | | |
|----|--|------|
| 20 | 1library.co Fuente de Internet | <1 % |
| 21 | ri.uaemex.mx Fuente de Internet | <1 % |
| 22 | repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 23 | repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 24 | repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 25 | es.slideshare.net Fuente de Internet | <1 % |
| 26 | doi.org Fuente de Internet | <1 % |
| 27 | renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 28 | Submitted to CONACYT Trabajo del estudiante | <1 % |
| 29 | www.researchgate.net Fuente de Internet | <1 % |
| 30 | www.coursehero.com Fuente de Internet | <1 % |
| 31 | worldwidescience.org Fuente de Internet | <1 % |

32

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

<1 %

33

Submitted to University of Wolverhampton

Trabajo del estudiante

<1 %

34

vsip.info

Fuente de Internet

<1 %

35

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

36

idoc.pub

Fuente de Internet

<1 %

37

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

38

Submitted to University of Zululand

Trabajo del estudiante

<1 %

39

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

40

repositorio.uis.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

41

repositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

42

repositorio.unsa.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

43

www.digikey.com.mx

Fuente de Internet

<1 %

44

ECOPLANEACION CIVIL S.A
ING.CONSULT.CON.S. "ITS N° 5 del Proyecto
Central Hidroeléctrica San Gabán III-
IGA0002112", R.D. N° 0189-2019-SENACE-
PE/DEAR, 2020

Publicación

<1 %

45

www.grafiati.com

Fuente de Internet

<1 %

46

www.scielo.org.co

Fuente de Internet

<1 %

47

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

48

ENVIRO SOLUTIONS S.A.C.. "PMA de la Planta
de Tratamiento de Agua Residuales
Domésticos de la Planta de Procesamiento de
Gas Aguaytia-IGA0001196", R.D. N° 341-2012-
MEM/AE, 2020

Publicación

<1 %

49

Submitted to Universidad Manuela Beltrán
Virtual

Trabajo del estudiante

<1 %

50

osc.dnp.gov.co

Fuente de Internet

<1 %

51

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

52

Submitted to Universidad Católica San Pablo

Trabajo del estudiante

<1 %

53

www.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

54

moam.info

Fuente de Internet

<1 %

55

FC INGENIERIA Y SERVICIOS AMBIENTALES
SOCIEDAD ANONIMA CERRADA. "DAP de la
Planta de Curtido y Adobo de Pieles-
IGA0003319", R.D. N° 229-2015-
PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2020

Publicación

<1 %

56

INVESCAPERU S.A.C.. "DAP para la Planta
Industrial de Curtido de Pieles de Ovino-
IGA0002704", R.D. N° 058-2016-
PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2021

Publicación

<1 %

57

Submitted to Wright State University

Trabajo del estudiante

<1 %

58

es.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

59

rehip.unr.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

| | | |
|----|---|------|
| 60 | Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante | <1 % |
| 61 | repositorio.udl.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 62 | www.toodledo.com Fuente de Internet | <1 % |
| 63 | Fonseca Salazar María Alejandra. "Evaluación de patógenos e indicadores de contaminación fecal en un sitio de reúso de agua residual no planificado en México", TESIUNAM, 2016 Publicación | <1 % |
| 64 | Submitted to Hong Kong University of Science and Technology Trabajo del estudiante | <1 % |
| 65 | pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet | <1 % |
| 66 | repositorio.ufpso.edu.co Fuente de Internet | <1 % |
| 67 | repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 68 | visorsig.oefa.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 69 | www.buenastareas.com Fuente de Internet | <1 % |

| | | |
|----|---|------|
| 70 | Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante | <1 % |
| 71 | Submitted to Ponce Health Sciences University Trabajo del estudiante | <1 % |
| 72 | Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante | <1 % |
| 73 | Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante | <1 % |
| 74 | repositorio.up.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 75 | www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 76 | P. Cortez-Mejía, V. Tzatchkov, J.M. Rodríguez-Varela, O.J. Llaguno-Guilberto. "Calidad del agua y seguridad ante inundaciones en la gestión sostenible del recurso hídrico", Ingeniería del agua, 2021 Publicación | <1 % |
| 77 | cdigital.uv.mx Fuente de Internet | <1 % |
| 78 | dake.es Fuente de Internet | <1 % |

| | | |
|----|--|------|
| 79 | intranet.sernanp.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 80 | repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 81 | tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 82 | dspace.espoch.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 83 | repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 84 | www.wateractionplan.com Fuente de Internet | <1 % |
| 85 | Submitted to Universidad Nacional Mayor de San Marcos Trabajo del estudiante | <1 % |
| 86 | Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante | <1 % |
| 87 | Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana Trabajo del estudiante | <1 % |
| 88 | cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 89 | repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |

| | | |
|----|---|------|
| 90 | sypysa.com Fuente de Internet | <1 % |
| 91 | www.lacamara.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 92 | www.mef.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 93 | redi.unjbg.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 94 | repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 95 | repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 96 | PEÑA BENAVIDES RAFAEL NEMESIO. "ITS para el Proyecto Tratamiento de Aguas Residuales de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa-IGA0001570", R.D. N° 363-2014-MEM-DGAAE, 2020 Publicación | <1 % |
| 97 | WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "ITS Ampliación de Componentes Auxiliares en el Tramo Selva Baja del Proyecto Mejoras en la Seguridad Energética del País y Desarrollo del Gasoducto Sur Peruano-IGA0004359", R.D. N° 373-2015-MEM/DGAAE, 2021 Publicación | <1 % |

| | | |
|-----|---|------|
| 98 | cia.uagraria.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 99 | dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 100 | repositorio.ulatina.ac.cr Fuente de Internet | <1 % |
| 101 | www.ana.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 102 | "Gestión integral hídrica del canal surco para la configuración de un ecosistema urbano sustentable", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022 Publicación | <1 % |
| 103 | brainly.lat Fuente de Internet | <1 % |
| 104 | wn.com Fuente de Internet | <1 % |
| 105 | www.science.gov Fuente de Internet | <1 % |
| 106 | www4.congreso.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 107 | ECOFLUIDOS INGENIEROS S.A.. "Adenda al EIA de Renovación de Equipos, Maquinaria y del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de las Plantas de | <1 % |

Congelado y Harina Residual, Ubicadas en el Distrito de Paita, Piura-IGA0004579", R.D. N° 346-2016-PRODUCE/DGCHD, 2020

Publicación

| | | |
|-----|--|------|
| 108 | minos.vivienda.gob.pe:8081 Fuente de Internet | <1 % |
| 109 | ns.anam.gob.pa Fuente de Internet | <1 % |
| 110 | quechuanetwork.org Fuente de Internet | <1 % |
| 111 | upcommons.upc.edu Fuente de Internet | <1 % |
| 112 | www.authorea.com Fuente de Internet | <1 % |
| 113 | www.fidamerica.org Fuente de Internet | <1 % |
| 114 | www.vivienda.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 115 | Palma Silva José Luis. "Proyecto para el tratamiento de aguas residuales provenientes de sanitarios portátiles", TESIUNAM, 2002 Publicación | <1 % |
| 116 | condorchem.com Fuente de Internet | <1 % |
| 117 | creativecommons.org Fuente de Internet | <1 % |

<1 %

118 dicyt.uajms.edu.bo
Fuente de Internet

<1 %

119 es.genesiswatertech.com
Fuente de Internet

<1 %

120 fr.slideshare.net
Fuente de Internet

<1 %

121 informe.cndh.org.mx
Fuente de Internet

<1 %

122 perfildealcaldes.socya.org.co
Fuente de Internet

<1 %

123 pt.scribd.com
Fuente de Internet

<1 %

124 publications.theseus.fi
Fuente de Internet

<1 %

125 repositorio.unjfsc.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

126 repositorio.unprg.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

127 repositorio.usanpedro.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

128 www.brigadacallejera.org
Fuente de Internet

<1 %

| | | |
|-----|---|------|
| 129 | www.idaan.gob.pa Fuente de Internet | <1 % |
| 130 | "Innovative Wastewater Treatment Technologies — The INNOQUA Project", Now Publishers, 2021 Publicación | <1 % |
| 131 | #N/A. "PAP de la Plataforma DOM-1 - Pozo Fortuna 1XD – ST3, en el Lote 116-IGA0000823", R.D. N° 388-2017-MEM/DGAAE, 2021 Publicación | <1 % |
| 132 | GREEN OIL DEL PERU S.A.. "EIA del Proyecto de Instalación, Uso y Funcionamiento de la Planta de Procesamiento de Gas Licuado de Petróleo PTG-01-Piura-IGA0002412", R.D. N° 334-2010-MEM/AAE, 2021 Publicación | <1 % |
| 133 | INVESCAPERU S.A.C.. "Plan de Cierre de la Planta Variante de Uchumayo-IGA0003290", R.D. N° 319-2015-PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2020 Publicación | <1 % |
| 134 | Manuel A. Burgos, Maria Agustina Sevilla García, Enrique Sanmiguel Rojas, Carlos Del Pino et al. "Virtual Surgery for Patients With Nasal Obstruction: Use of Computational Fluid Dynamics (MeComLand ® , Digbody ® & | <1 % |

Noseland ®) to Document Objective Flow Parameters and Optimise Surgical Results", Acta Otorrinolaringologica (English Edition), 2018

Publicación

135

Tapia Ponce José Carlos. "Tratamiento de agua de purga de torres de enfriamiento mediante el proceso de electrocoagulación", TESIUNAM, 2011

Publicación

<1 %

136

WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "MEIA para el Proyecto Mejoras a la Seguridad Energética del País y Desarrollo del Gasoducto Sur Peruano - Variantes de los Tramos KP 218+674 al KP 250+395 y KP 313+246 al KP 332+585 y Componentes Auxiliares-IGA0004353", R.D. N° 227-2016-MEM/DGAAE, 2021

Publicación

<1 %

137

WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "PMA de Perforación de Reentrada de 4 Pozos Existentes sobre 4 Plataformas Existentes en el Yacimiento Corrientes - Lote 8-IGA0002748", R.D. N° 214-2013-MEM/AAE, 2020

Publicación

<1 %

138

alcavida.com
Fuente de Internet

<1 %

| | | |
|-----|--|------|
| 139 | blog.epa.gov Fuente de Internet | <1 % |
| 140 | cd4cdm.org Fuente de Internet | <1 % |
| 141 | docobook.com Fuente de Internet | <1 % |
| 142 | mdpi-res.com Fuente de Internet | <1 % |
| 143 | qdoc.tips Fuente de Internet | <1 % |
| 144 | repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 145 | repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 146 | repositorioslatinoamericanos.uchile.cl Fuente de Internet | <1 % |
| 147 | riunet.upv.es Fuente de Internet | <1 % |
| 148 | sig.regionlambayeque.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 149 | www.acueducto.com.co Fuente de Internet | <1 % |
| 150 | www.minem.gob.pe Fuente de Internet | <1 % |

| | | |
|-----|---|------|
| 151 | www.saber.ula.ve Fuente de Internet | <1 % |
| 152 | CLEAN TECHNOLOGY S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Infraestructura de Tratamiento y Disposición Final de Residuos Sólidos de Gestión No Municipal - Relleno de Seguridad Majes-IGA0003710", R.D. N° 00161-2019-SENACE-PE/DEIN, 2021 Publicación | <1 % |
| 153 | repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 154 | revistas.udem.edu.co Fuente de Internet | <1 % |
| 155 | www.informatica-juridica.com Fuente de Internet | <1 % |
| 156 | Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, 2011. Publicación | <1 % |
| 157 | Olguin Martinez Miguel Angel. "Manejo de sistemas pequeños y descentralizados de aguas residuales", TESIUNAM, 2005 Publicación | <1 % |
| 158 | busquedas.elperuano.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 159 | futur.upc.edu Fuente de Internet | <1 % |

Excluir citas Apagado

Excluir coincidencias Apagado

Excluir bibliografía Apagado

DEDICATORIA

Con todo el amor del mundo para mi padre Raúl Cárdenas Farfán † que está en el cielo, mi madre Ricardina Terán Vda. de Cárdenas, mis hermanos Aybén, Jackeline, Raúl y Ángela, mis hijas Claudia Fernanda, Abby Qoyllor y Mila Valentina; y, a mi esposa Katia Karina Masias Moreano, que son fuente de inspiración y admiración a pesar de las múltiples batallas y retos hasta ahora superados, porque sin su soporte y apoyo incondicional, no lo habría logrado; para ellos con el más sublime sentimiento de amor, cariño y superación.

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, hermanos, hijas y esposa, por su apoyo y contribución en mi forjar.

Al PhD. José Vladimir Cornejo Tueros, asesor del trabajo de investigación, por su colaboración y apoyo brindado.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| ÍNDICE GENERAL | iv |
| RESUMEN..... | vii |
| ABSTRAC..... | ix |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO I..... | 3 |
| PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO | 3 |
| 1.1. Planteamiento y Formulación del Problema..... | 3 |
| 1.1.1. Planteamiento del Problema..... | 3 |
| 1.2. Formulación del problema | 6 |
| 1.2.1. Alternativa actual | 6 |
| 1.2.2. Alternativa propuesta..... | 6 |
| 1.3. Objetivos | 7 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 7 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 7 |
| 1.4. Justificación..... | 8 |
| 1.4.1. Aspecto ambiental | 8 |
| 1.4.2. Aspecto social | 8 |
| 1.4.3. Aspecto tecnológico..... | 9 |
| CAPITULO II..... | 11 |
| MARCO TEÓRICO | 11 |
| 2.1. Antecedentes del Problema..... | 11 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales..... | 11 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales..... | 14 |
| 2.2. Bases Teóricas..... | 16 |
| 2.2.1. Aguas residuales municipales: | 16 |
| 2.2.2. Estándares de Calidad Ambiental para Agua..... | 16 |
| 2.2.3. Límites Máximo Permisibles - LMP | 19 |
| 2.2.4. Reacciones electroquímicas | 20 |
| 2.2.5. Contaminación de los cuerpos de agua naturales | 21 |
| 2.3. Definición de términos básicos | 22 |
| CAPÍTULO III..... | 26 |

| | |
|---|----|
| METODOLOGÍA..... | 26 |
| 3.1. Metodología aplicada para el desarrollo de la solución..... | 26 |
| 3.1.1. Diseño..... | 27 |
| 3.1.2. Prototipo..... | 32 |
| CAPÍTULO IV | 34 |
| ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN..... | 34 |
| 4.1. Identificación de requerimientos | 34 |
| 4.2. Análisis de la solución | 34 |
| CAPITULO V | 37 |
| CONSTRUCCIÓN | 37 |
| 5.1. Construcción..... | 37 |
| 4.2.4.1. Componentes..... | 37 |
| 5.2. Pruebas y resultados | 41 |
| 5.2.1. Caracterización de las aguas residuales a tratar | 41 |
| 5.2.2. Resultados del efluente tras el proceso de filtración electroquímica | 44 |
| CONCLUSIONES | 46 |
| TRABAJOS FUTUROS..... | 47 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 48 |
| ANEXOS..... | 50 |
| Anexo N° 01.- Mapa de Ubicación de la PTAR Pampa Concepción | 50 |
| Anexo N° 02.- Fotos de Operación de Prototipo | 51 |
| Anexo N° 03.- Resultados de Laboratorio (Caracterización Efluente PTAR)..... | 52 |
| Anexo N° 04.- Resultados de Laboratorio (Efluente PTAR tratado) | 55 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Categoría de agua según su uso (16)..... | 18 |
| Tabla 2. Parámetros sujetos a caracterización de una PTAR (17)..... | 20 |
| Tabla 3. Parámetros evaluados y métodos. | 43 |
| Tabla 4. Caracterización del efluente de PTAR Pampa Concepción..... | 43 |
| Tabla 5. Resultados del proceso de filtración electroquímica..... | 44 |
| Tabla 6. Comparación de resultados tras la filtración electroquímica..... | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Etapas en el proceso de activación del carbón | 28 |
|---|----|

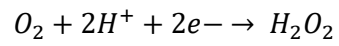
| | |
|---|----|
| Figura 2. Lecho filtrante anódico | 30 |
| Figura 3. Isoterma de adsorción de Langmuir | 32 |
| Figura 4. Esquema del funcionamiento del Prototipo | 37 |
| Figura 5. Instalación de tanque de carga | 38 |
| Figura 6. Tanque de del reactor | 38 |
| Figura 7. Curva de eficiencia para mantenimiento de los electrodos de Titanio | 39 |
| Figura 8. Electrodo de Titanio | 39 |
| Figura 9. Carbón Activado Granular (Ø3mm.) de Bambú | 40 |
| Figura 10. Anillos aislantes de caucho | 41 |
| Figura 11. Microgenerador de corriente eléctrica (turbina hidráulica)..... | 41 |
| Figura 12. Toma de muestra del efluente de la PTAR Pampa Concepción..... | 44 |

RESUMEN

Las aguas residuales desde siempre han sido ignoradas y esta concepción ha ido cambiando por el incremento de la escasez del agua y se ha tomado mayor atención en la recolección, el tratamiento y reúso; esta gestión de las aguas residuales no solo está basada en la reducción de la contaminación de las fuentes hídricas, si no, más bien en la eliminación de contaminantes, por ello, el tratamiento terciario de aguas residuales como etapa final, tiene como propósito remover las partículas finas y nutrientes (nitrógeno y fósforo); y, la desinfección la eliminación de microorganismo o agentes patógenos, aumentando la calidad del efluente exigidos por la normatividad vigente, antes de que éstas sean evacuadas o vertidas a cuerpos de aguas naturales, como es el caso de la PTAR Pampa Concepción (Echarate - La Convención – Cusco), que no ha incorporado en su infraestructura dicho tratamiento; y, como alternativas de tratamiento se tienen entre otros los sistemas de filtración.

El prototipo se desarrolló mediante la metodología sistemática para diseños en ingeniería y se encuentra dentro de las innovaciones tecnológicas, consisten en un prototipo de filtración electroquímica de flujo continuo y descendente, por gravedad, abastecida con energía eléctrica (hidráulica) autogenerada, con electrodos de Titanio, con lecho filtrante (anódico) con base a carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) activado con NaOH; tiene la capacidad de adsorber y oxidar compuestos químicos en el ánodo de manera eficiente a través de un proceso de oxidación directa e indirecta en el lecho anódico y oxidación adicional con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generado *in situ* en el cátodo. El prototipo desarrollado es un novedoso sistema electroquímico para el tratamiento de aguas residuales que combina la adsorción y la oxidación, con una tasa eficiente de electrofiltración de contaminantes biológicos, físicos y químicos; que garantiza el vertimiento de las aguas tratadas a cuerpos de agua naturales y/o para su reutilización, dentro de los límites máximo permisible y estándares de calidad ambiental para agua, estructura que puede ser utilizada en el punto de uso.

En el reactor se producen mecanismos de oxidación directa e indirecta, en la directa la materia orgánica adsorbida en el lecho filtrante anódico para luego oxidarse por medio del intercambio directo de electrones; mientras que en la indirecta los radicales hidroxilos adsorbidos en la superficie del lecho filtrante anódico son los encargados de degradar los contaminantes orgánicos presentes en la disolución del efluente de la PTAR Pampa Concepción; asimismo, se da la formación de oxígeno molecular (O_2), así como, la presencia de otras reacciones como la generación de peróxido de hidrógeno.



El Peróxido de Hidrógeno, además como potente oxidante puede oxidar varios contaminantes orgánicos a través de reacciones y producir oxígeno y agua como subproductos luego del proceso de oxidación.

Palabras Claves: Prototipo, filtración electroquímica, aguas residuales, carbón activado.

ABSTRAC

Wastewater has always been ignored and this conception has been changing due to the increase in water scarcity and more attention has been paid to collection, treatment and reuse; this wastewater management is not only based on reducing the contamination of water sources, but rather on the elimination of contaminants, therefore, the tertiary treatment of wastewater as the final stage, has the purpose of removing the fine particles and nutrients (nitrogen and phosphorous); and, disinfection, the elimination of microorganisms or pathogenic agents, increasing the quality of the effluent required by current regulations, before they are evacuated or discharged into natural bodies of water, as is the case of the Pampa Concepción PTAR (Echarate - La Convención – Cusco), which has not incorporated said treatment into its infrastructure; and, as treatment alternatives, filtration systems are among others.

The prototype was developed using the systematic methodology for engineering designs and is among the technological innovations, consisting of a prototype of continuous and descending flow electrochemical filtration, by gravity, supplied with self-generated electrical (hydraulic) energy, with Titanium electrodes, with a filter bed (anodic) based on Bamboo charcoal (*Guadua angustifolia*) activated with NaOH; It has the ability to efficiently adsorb and oxidize chemical compounds on the anode through a process of direct and indirect oxidation in the anode bed and additional oxidation with hydrogen peroxide (H_2O_2) generated in situ at the cathode. The developed prototype is a novel electrochemical system for wastewater treatment that combines adsorption and oxidation, with an efficient rate of electrofiltration of biological, physical, and chemical contaminants; that guarantees the dumping of treated water into natural bodies of water and/or for its reuse, within the maximum permissible limits and environmental quality standards for water, a structure that can be used at the point of use.

In the reactor direct and indirect oxidation mechanisms are produced, in the direct one the organic matter adsorbed in the anodic filtering bed to later be oxidized through the direct exchange of electrons; while indirectly, the hydroxyl radicals adsorbed on the surface of the anodic filter bed are responsible for degrading the organic contaminants present in the solution of the effluent from the Pampa Concepción PTAR; Likewise, the formation of molecular oxygen (O_2) occurs, as well as the presence of other reactions such as the generation of Hydrogen Peroxide.

Hydrogen Peroxide, also as a powerful oxidant, can oxidize various organic contamination through reactions and produce oxygen and water as by-products after the oxidation process.

Keywords: Prototype, electrochemical filtration, wastewater, activated carbon.

INTRODUCCIÓN

En el Perú se, según las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS) en número son 50 al año 2020 con cobertura en 260 localidades a nivel nacional y 171 plantas de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento, brindan servicio a 17.5 millones de habitantes (53.63% de cobertura), reciben en sus instalaciones aproximadamente 3.28 millones de m³/día de aguas residuales descargadas en la red de alcantarillado sanitario; de éstas aguas el 20.47% reciben algún tipo de tratamiento terciario o desinfección y el resto no.

Las aguas residuales domésticas y/o municipales afectan a la salud de las personas y el medio donde viven, las fuentes de agua superficial receptoras de estos vertimientos se ven afectadas en sus parámetros físicos, químicos y biológicos, siendo aún más perjudiciales aquellos vertimientos sin tratamiento alguno.

La responsabilidad es compartida, entre los usuarios y el gobierno local a cuyo cargo se encuentra según el marco legal, la prestación de estos servicios, que comprende entre otros, la prestación de servicios de agua potable, alcantarillado sanitario, tratamiento de aguas residuales para disposición final o reutilización, así como, la disposición sanitaria de excretas, ya sea en los ámbitos urbano y rural, a través de una Unidad de Gestión Municipal (UGM) o de manera indirecta mediante organizaciones comunales que prestan servicios de saneamiento en el ámbito rural, denominadas Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS).

Dentro de las opciones tecnológicas ofertadas por los prestadores de los servicios de saneamiento, tenemos los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales que, en muchos casos, no incluye el tratamiento terciario donde se busca reducir los niveles de patógenos para desinfectar el efluente y complementar la remoción de contaminantes del agua a través del uso de membranas (microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis, etc.), intercambio iónico, adsorción, redox, precipitación, ozono, luz ultravioleta, entre otros.

En el tratamiento terciario, como alternativas eficientes tenemos la electroquímica, que tiene numerosas aplicaciones en la ciencia y la tecnología, basada en procesos unitarios (electrocoagulación, la electrodiálisis, la electroflotación, la electrodeposición, la electro oxidación, la electrofiltración, entre otras); y es una alternativa eficiente en el tratamiento de aguas residuales que ofrece ventajas frente al uso de otras tecnologías, con una

eficiente separación de iones metálicos, partículas coloidales y contaminantes de diferente naturaleza; y sobre todo tiene ventajas económicas, sostenible y amigable con el ambiente.

La investigación radica en el diseño y construcción a menor escala de un prototipo de filtración electroquímica de flujo continuo descendente, por gravedad y abastecida con energía hidráulica para el tratamiento de aguas residuales municipales, como una opción tecnológica eficiente, de bajo costo, de fácil instalación y sostenible ambientalmente, demostrándose en laboratorio la calidad del efluente en sus parámetros físicos, químicos y biológicos.

Basados en los fundamentos científicos de electro oxidación y electrofiltración se dispuso el diseño y construcción de un reactor conformado por un tanque de polietileno de alta densidad con capacidad de 20 litros, donde un 50% de su capacidad está dispuesto con el lecho filtrante a base de carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) en su forma granular ($\varnothing 3\text{mm.}$), activado con Hidróxido de Sodio (NaOH), con un área de filtrado de aproximadamente $1 \times 10^6 \text{ m}^2$, que hará las veces de lecho filtrante anódico, donde reposará el ánodo de titanio perforado y separado con un anillo de caucho con el cátodo también de titanio perforado; ambos electrodos conectados a la fuente de energía eléctrica continua autogenerada mediante una turbina hidráulica que genera 12 voltios de tensión eléctrica, conectada a la línea de conducción del efluente que proviene de un tanque de polietileno de alta densidad de 120 litros en una tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ ", a una presión constante (0.5 bar aproximadamente), para el funcionamiento óptimo la turbina; reactor que tratará las aguas del efluente de la PTAR Pampa Concepción a una tasa de filtración de 0.05 L/s de forma continua; el prototipo está dispuesto de válvulas de regulación de entrada, salida y un tubo de rebose que conecta a la red principal del efluente de la PTAR Pampa Concepción.

En sus versiones preliminares se dispuso de pruebas que han permitido la identificación de los materiales, insumos y equipos óptimos de operación y funcionamiento como el material de electrodos (Titanio), turbina hidráulica, lecho filtrante anódico (carbón activado de Bambú), separación de los electrodos y tipo e intensidad de corriente eléctrica.

En su operación, se obtuvieron porcentajes de remoción de contaminantes como: DQO (92.5%), DBO5 (93.24%), sólidos totales suspendidos (100%), aceites y grasas (100%); y, Coliformes fecales (100%).

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y Formulación del Problema

1.1.1. Planteamiento del Problema

El agua dulce un bien común global, su uso consuntivo, la contaminación, el cambio climático y otros factores lo hacen un recurso cada vez más escaso, siendo éste, de vital importancia para toda forma de vida sobre la tierra.

En la Región de las Américas, millones de personas no cuentan con la provisión segura de agua para consumo humano, así como, instalaciones para la disposición sanitaria de sus excretas, es decir, que para el año 2017, entre otros, 83 millones de personas no tenían acceso a servicios de saneamiento y 15.6 millones aún realizan la defecación al aire libre (1).

Carmen Yee-Batista (2), especialista (agua y saneamiento) del Banco Mundial, afirma que: el 70% de las aguas residuales de la región de las Américas no son tratadas, es decir, se devuelven al medio ambiente contaminadas.

En América Latina y el Caribe tan solo el 13,7% de las aguas residuales reciben algún tipo de tratamiento, estas aguas proceden de 241 millones de habitantes, lo que hace ver que aproximadamente las aguas residuales de 208 millones de habitantes son vertidas a los cuerpos de agua naturales, sin tratamiento alguno (3).

A pesar del avance tecnológico, la situación se torna grave por los problemas que acarrea en la salud de las personas y el medio donde viven, deteriorando la imagen de las empresas que prestan servicios de saneamiento, siendo ellos los llamados a la protección del recurso agua, toda vez que, se constituye en su materia prima.

En la región de la América, sólo el 20% de las aguas residuales municipales son tratadas y la otra parte se descarga en cuerpos de agua naturales sin tratamiento o en algunos casos lo destinan al riego, una práctica común en países como el Perú, en desmedro de la salud pública.

En el Perú, la calidad ambiental se ve afectada por el desarrollo de actividades de consumo, extractivas, productivas y de servicio, sin un adecuado manejo ambiental, sumado a ello está la limitada ciudadanía ambiental, entre otras, que contribuyen al deterioro de la calidad ambiental del agua, aire y suelo. El deterioro de la calidad del recurso hídrico es uno de los principales y más álgidos problemas en nuestro país, siendo las causas más comunes de contaminación, el vertimiento industrial y doméstico sobre cuerpos de agua natural sin tratamiento alguno, por lo que el 70% de los vertimientos domésticos son vertidos sin tratamiento alguno y sólo en Lima se vierten al menos 400 millones de m³ anuales de aguas residuales al mar (4 pág. 5).

El vertimiento de aguas residuales sin tratamiento genera impactos negativos sobre el ambiente acuático, siendo preponderante la concentración de los contaminantes físicos, químicos y/o biológicos que contengan dichos efluentes.

Entonces los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en nuestro país, donde se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos, diseñados para depurar aguas residuales hasta que sus contenidos de contaminantes puedan estar dentro de los Límites Máximo Permisibles – LMP y Estándares de Calidad Ambiental – ECA para agua que exige la normatividad vigente, y permita su disposición final o su reutilización sin riesgos para el ambiente y para la salud pública. No siendo así, es decir, toda vez que, muchos de estos sistemas o plantas de tratamiento de aguas residuales – PTAR, no llegan a los niveles de tratamiento terciario o desinfección de sus efluentes.

A nivel global, las aguas residuales son dispuestas al medio ambiente sin el tratamiento adecuado, generando la contaminación del recurso aire, agua y suelo (5).

La utilización o reúso de las aguas residuales domésticas y municipales tratadas (parcialmente) o no tratadas, que se vierten al medio ambiente y son utilizadas en actividades productivas agrícolas, representan riesgos a la salud pública, por la presencia de agente patógenos de origen fecal como son los Coliformes (6).

La contaminación de cuerpos de agua natural a consecuencia de los vertimientos de aguas residuales domésticas y municipales, requiere un abordaje desde tres puntos de vista: a) la carga contaminante biológica como los Coliformes, por el riesgo que representan a la salud de las personas; b) la calidad fisicoquímica del agua, por la presencia de materia orgánica; y, c) la calidad del agua en función de sus usos para la actividad productiva agrícola (7).

La gran mayoría de los sistemas de tratamiento terciario de aguas residuales domésticas en nuestro país se da mediante la desinfección con Cloro (Hipoclorito de Calcio al 70%), a una concentración de 1.5 ppm, demandando costos elevados, así como, la consecuente afectación al medio biológico de los cuerpos de agua naturales, sin embargo, el Cloro en contacto con el material orgánico puede producir compuestos órgano clorados que son muy peligrosos.

En el distrito de Echarati, se han identificado veinticinco puntos de vertimiento de aguas residuales domésticas y municipales a cuerpos de agua naturales, de los cuales catorce tienen algún tipo de tratamiento (primario y/o secundario) y once ninguno.

En el año 2019, la Municipalidad Distrital de Echarati, ha construido en el Centro Poblado Pampa Concepción, una moderna Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, compuesta por una caja de llegada, una cámara de rejillas, un desarenador controlado por un vertedero proporcional, 02 tanque Imhoff, 02 filtros biológicos y 02 lechos de secado, que trata aguas residuales domésticas de 241 conexiones domiciliarias de la red de alcantarillado sanitario; más no cuenta con un sistema de tratamiento terciario para un efluente máximo actual de 1.75 L/s.

Por lo tanto, estos vertimientos son fuentes de contaminación y riesgo para la salud de los asentamientos humanos aguas abajo, por lo que se hace necesario la implementación de sistemas de tratamiento complementario o terciario eficientes y amigables con el ambiente para la eliminación de agentes patógenos y otros contaminantes según la caracterización de estas aguas residuales.

La Electroquímica tiene numerosas aplicaciones en la ciencia y la tecnología, basada en procesos unitarios (electrocoagulación, la electrodiálisis, la electroflotación, la electrodeposición, la electro oxidación, la electro filtración, entre otras), y es una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales que ofrece ventajas frente al uso de otras tecnologías, con una eficiente separación de iones metálicos, partículas coloidales y contaminantes de diferente naturaleza.

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Asamblea General de las Naciones Unidas, se encuentra el de garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (ODS 6) y a través del presente trabajo de investigación tecnológica, contribuir al logro de la meta 6.3 (para 2030), entre otros, para la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Alternativa actual

El efluente de la PTAR Pampa Concepción, es vertida al cuerpo de agua natural (río Urubamba), sin el tratamiento terciario y/o desinfección correspondiente, por cuanto, no cuenta con un sistema de tratamiento terciario, es decir, fuera de los límites máximos permisibles y estándares de calidad ambiental para agua, según caracterización.

1.2.2. Alternativa propuesta

Vertimiento de aguas residuales dentro de los límites máximos permisibles y estándares de calidad ambiental para agua vigentes, mediante el diseño de un prototipo de filtración electroquímica para la remoción de contaminantes biológicos, físicos y químicos de aguas residuales municipales (efluente de la PTAR Pampa Concepción), de flujo continuo, por gravedad, abastecida con energía hidráulica autogenerada, con lecho filtrante a base a carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) activado con NaOH, con capacidad de adsorber y oxidar compuestos químicos en el ánodo a través de un proceso de oxidación directa e indirecta en el lecho anódico (de carbón activado) y oxidación adicional con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generado *in situ* en el cátodo; estructura que puede ser utilizada en el punto de uso.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de filtración electroquímica para el tratamiento terciario de aguas residuales municipales (efluente de la PTAR Pampa Concepción), para su vertimiento dentro de los límites máximos permisibles y estándares de calidad ambiental para agua.

1.3.2. Objetivos Específicos

OE1. Realizar la caracterización del efluente de la PTAR Pampa Concepción.

OE2. Diseñar, implementar y poner en funcionamiento el prototipo de filtración electroquímica para el tratamiento terciario del efluente de la PTAR Pampa Concepción.

OE3. Determinar la eficiencia del prototipo de filtración electroquímica en los parámetros biológicos (Coliformes fecales), físicos (temperatura, sólidos totales suspendidos - SST y aceites y grasas) y químicos: (potencial de hidrogeniones - pH, demanda biológica de oxígeno - DBO5, demanda química de oxígeno - DQO); del efluente de la PTAR Pampa Concepción, tras la implementación y operación del prototipo.

OE4. Vertimiento de aguas residuales de la PTAR Pampa Concepción, dentro de los límites máximo permisibles y estándares de calidad ambiental para agua.

1.4. Justificación

1.4.1. Aspecto ambiental

Como se ha podido advertir, en nuestro país, la problemática ambiental generada por la contaminación de fuentes hídricas, tiene como causas primordiales los vertimientos industriales, domésticos y municipales sin tratamiento, es así que el 70% de las aguas residuales domésticas son vertidas a los cuerpos de agua natural sin tratamiento alguno; debido entre otros, a la insuficiente infraestructura pública (alcantarillado sanitario, plantas de tratamiento de aguas residuales, uso de tecnologías obsoletas e incompletas, entre otros), insuficientes recursos que destinan los gobiernos de turno para agua y saneamiento; e, insuficiente educación ambiental formal y no formal.

Esta problemática, ha permitido el desarrollo de esta investigación amigable con el ambiente, como una alternativa eficiente en el tratamiento terciario de efluentes de aguas residuales municipales de la PTAR Pampa Concepción del distrito de Echarati, provincia de La Convención y departamento del Cusco, mediante la implementación de un prototipo de filtración electroquímica de flujo continuo abastecida con energía hidráulica a base de carbón activado de Bambú (*Guadua angustifolia*); y que, contribuirá a reducir la contaminación (biológica, física y química) de las aguas del río Urubamba, en beneficio del ambiente acuático y las poblaciones que hacen uso de este recurso aguas abajo.

1.4.2. Aspecto social

La población asentada aguas abajo del río Urubamba, utilizan sus aguas con fines agrarios (riego), pecuarios, así como, pescan para su consumo;

afectado directamente la contaminación de las aguas en la salud de las personas y su calidad ambiental.

El prototipo de filtración electroquímica a base de carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) activado con NaOH, abastecida con energía hidráulica, de flujo continuo (descendente), por gravedad, puede ser implementado de manera fácil, su operación y mantenimiento son de bajo costo y requiere de un personal capacitado para estos menesteres.

Es totalmente asequible y acorde con la zona rural, fácil de transportar (portátil) y aceptada como solución rápida y oportuna a los problemas de contaminación de agua, que no involucra agentes químicos, no requiere mayor mantenimiento, el operador gasfitero de la organización comunal (JASS) realiza el mantenimiento en tiempo record (cambio de lecho filtrante periódico).

1.4.3. Aspecto tecnológico

El desarrollo tecnológico en un enfoque amigable con el ambiente están en boga y dentro de estas tecnologías están las electroquímicas, muchas de ellas requieren adicionar compuestos o elementos químicos; en este caso, solo requiere de corriente eléctrica y ésta es abastecida con energía renovable, es decir, energía hidráulica; mientras que el lecho filtrante con carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) activado, especie forestal de rápido crecimiento, con propiedades de adsorción por su alta microporosidad menores a 2 nm y mesoporos (2 – 50 nm), con un área de filtrado entre 400 a 1000 m² por gramo de carbón activado aproximadamente; asimismo, cuando el carbón de Bambú es objeto de tratamientos oxidativos a su superficie, ésta mantiene una conducción de tipo iónico, debido a la presencia de grupos superficiales en el carbón, sabiendo además que, el agua dulce es un mal conductor de la electricidad.

La producción de carbón a partir del Bambú (*Guadua angustifolia*), posee un gran potencial a pesar de ser una gramínea, produce leño al igual que las especies forestales maderables y su cultivo es de rápido crecimiento y con bajos costos de mantenimiento, convirtiéndola en un potencial para

producir un excelente carbón vegetal y carbón activado, éste último, presenta grandes áreas de superficie, gran conductividad eléctrica, producción a bajo coste y alta estabilidad química (8).

La producción de carbón de Bambú dependerá entre otros, de la disponibilidad de la especie forestal, la calidad de sus culmos o tallos, costos tanto de la materia prima como de la producción misma del carbón; así como, de sus propiedades físicas y químicas del carbón como producto; teniendo aplicaciones como en la medicina, en el tratamiento de aguas, la eliminación de olores y sabores, en la decoloración en la industria del azúcar, adsorción de gases tóxicos y muchas otras (9).

En el proceso de adsorción, el material removido es adherido física o químicamente a la superficie e intersticios del carbón, sin penetrar en su estructura física y si ayudamos a que esto se mejore con el uso de corriente alterna o continua, ésta será más eficiente aún, por la característica del carbón (activado) de mejor conductor eléctrico, debido a la movilidad de los electrones en sus capas de valencia externa.

El prototipo es versátil, fácil de transportar y para su instalación se requiere de dos días como máximo y su peso bruto es de aproximadamente 40 kg., con posibilidades de mayor dimensionamiento.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

En el estudio de post grado denominado “Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación” (10), cuyo objetivo de estudio fue: desarrollar un diseño a manera de piloto y prueba del prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en procesos unitarios como la electrocoagulación. El Desarrollo Metodológico permitió evaluar el prototipo, mediante el desarrollo de pruebas con agua residual de la ciudad de Bogotá, para cuyo efecto, se tomaron dos puntos de muestreo. Los recursos de la investigación empleados fue el personal investigador y asesores, así como, materiales, equipos y laboratorio para el desarrollo de las prácticas. La metodología empleada fue mediante la caracterización en laboratorio de las muestras de aguas residuales (físico, químico, eléctrico) y prueba de jarras. Los Resultados: Dentro de los parámetros evaluados (físicos, químicos y biológicos) de las aguas residuales tratadas, se tienen: DQO, DBO5, grasas, sólidos, temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, color, densidad relativa y Coliformes; validando y ponderándose el porcentaje de remoción de estos contaminantes en todas las corrientes aplicadas (tres), así como, el tiempo de exposición, obteniéndose los siguientes resultados: la concentración de DQO, tras la aplicación de las diferentes intensidades de corriente, el comportamiento fue decreciente, con mayor eficiencia de remoción en la de 18A (75% al minuto 60), luego la de 15A (66% al minuto 60) y la de 7.5 A (70%, pero al minuto 120); respecto de las unidades de color, el porcentaje removido con la corriente de 18A (95%, minuto 60) y 15A (41% al minuto 70) fueron positivas, mientras que, con la corriente de 7.5A presentó un incremento en las unidades de color del orden del 54% al minuto 120; la remoción de turbidez (NTU), en el caso de las corrientes de 18A y 15A fueron con mayores porcentajes de remoción

(97% al minuto 60 y 54% al minuto 70 respectivamente), mientras que con la aplicación corriente a razón de 7.5A presentó un incremento en la turbidez de 38%, al minuto 120; respecto de los sólidos totales disueltos SST, se ha obtenido un porcentaje óptimo de remoción con la aplicación de la corriente de 18A (51% al minuto 60), así como, bajos niveles de remoción con las corrientes de 7.5A y 15A a razón de 36% (al minuto 120) y 28% (al minuto 90) respectivamente; respecto de la conductividad, el porcentaje de remoción fue medido en mS, logrando una eficiente remoción con la corriente de 18A (51% al minuto 60), mientras que con las corrientes de 7.5A y 15A se lograron remover tan solo el 36% (al minuto 120) y 27% (al minuto 90) respectivamente; en el proceso unitario de electrocoagulación aplicada a las aguas residuales, las temperaturas del agua se elevaron, por las reacciones químicas que se generan por la aplicación de corriente eléctrica mediante electrodos metálicos: la temperatura más alta fue de 60°C (18A a los 60 minutos), y de 15A y 7.5A (57°C a los 90 minutos y de 31°C a los 120 minutos respectivamente); mientras que en el caso de la DBO5 (mgO₂/L) obtuvo el mayor valor en porcentaje (89%) de remoción al aplicar corriente de 7.5A al minuto 120; y, con corrientes de 18A y 15A porcentajes de remoción del 80% al minuto 60 y 71% al minuto 60 respectivamente; respecto del oxígeno disuelto obtuvo un porcentaje mayor con la aplicación de la corriente de 15A (578% al minuto 90) y 7.5A (513% al minuto 90); en relación al pH no hubo variaciones significativas en las tres corrientes, obteniéndose valores entre 8 a 10; y, respecto del comportamiento de los Coliformes, en las tres corrientes se evidenció una remoción del 100%.

En la tesis titulada “Modelación de un reactor electroquímico de flujo continuo por CFD para el tratamiento de agua residual” (11), tuvo por objetivo el de emplear la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para la evaluación hidrodinámica de un reactor electroquímico de forma cilíndrica, que considera entre otros la geometría, componentes internos, la relación ubicación y geometría de la entrada y salida; y, el empleo de un mezclador estático; permitiendo determinar la situación más óptima de manera tal que garantice valores altos de energía cinética al interior del reactor. Su desarrollo metodológico consta de seis etapas, entre otros que permitió las simulaciones de diversos modelos con geometría modificada en el software ANSYS FLUENT versión 19.1, que permitió

comparar los diferentes reactores simulados. Los resultados y conclusiones son que el empleo de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es una aplicación versátil y útil para la definición de propiedades hidrodinámicas en reactores electroquímicos y proponer la construcción física del reactor, de tal manera que garantice resultados óptimos. Las modificaciones tanto en geometría y ubicación de sus elementos no son eficaces al pretender una turbulencia para el proceso de coagulación.

El mezclador estático interno dentro del RESP, tampoco influye en la velocidad, pero influye en el aumento de la turbulencia; con mayores valores, que permiten una coagulación eficiente de partículas, por lo que se consideraría como la mejor propuesta.

En la tesis "Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria" (12) , cuyo, estuvo orientado a diseñar un prototipo basada en una celda electrolítica en forma cilíndrica y el tipo de investigación experimental objeto de estudio fue evaluar el prototipo de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria con alta carga orgánica. Su marco metodológico

En el estudio se ha considerado como variable dependiente el porcentaje de remoción de unidades de color, el cual se determinó estadísticamente que no existe diferencia significativa al manipular las variables de caudal, el material del electrodo, la distancias entre los electrodos y el voltaje aplicado; logrando una remoción promedio en general del 87.74%.

Respecto de la variable dependiente demanda bioquímica de oxígeno, se determinó una diferencia no significativa entre los tratamientos de tres de las cuatro variables independientes; es así que, el tipo de electrodo tuvo diferencia significativa con relación a los demás tratamientos, alcanzando una remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (promedio) de 64.07%, demostrando una mayor eficiencia con el electrodo de aluminio.

En la demanda química de oxígeno, no hubo diferencias significativas entre las variables de caudal, tipo de electrodos, distancia de electrodos

y voltaje; alcanzando una eficiencia del prototipo con la remoción del orden de 83.21%.

Las variables evaluadas con mayor eficiencia del prototipo son: caudal (50 ml/min.); electrodo (Aluminio); voltaje (30V); y, la distancia entre electrodos (1 cm.).

Según la consulta bibliográfica, los tratamientos biológicos alcanzan una eficiencia de remoción de DBO del 70% y DQO del 75 al 85%.

Por los datos demostrados, el funcionamiento del prototipo de electrocoagulación tiene validez, por lo tanto, su hipótesis nula se confirma.

Para el efecto, se ha tomado como muestras de agua residual aquellas procedentes de la industria que contienen una serie de contaminantes como los orgánicos, colorantes sintéticos o naturales, obteniéndose un resultado esperado, que lo demuestran los ensayos de laboratorio, tal como: la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno del 78.26%, la demanda química de oxígeno de 90.54% y las unidades de color a razón de 81.46%.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la tesis de pregrado titulada “Análisis de la eficiencia del proceso electroquímico para el tratamiento de las aguas residuales de la PTAR Jaén, Cajamarca, 2017” (13), con el objetivo principal de determinar la eficiencia del tratamiento electroquímico en la eliminación de contaminantes como Coliformes totales y termotolerantes de las aguas residuales de la PTAR de Jaén, tiene entre sus Conclusiones que al agregar corriente de 2 amperios, voltaje de 5 voltios y tiempos de exposición de 10, 20 y 40 minutos, no ha logrado reducir los contaminantes biológicos; por lo que agregaron más intensidad de corriente incrementándose la temperatura que varían entre 0.2 °C y 1 °C, lo propio con el pH que se incrementó entre 0.02 hasta 0.20, alcanzando los parámetros biológico menores a 1.8 NMP. Respecto de la remoción de Coliformes termotolerantes, utilizaron una placa de cobre y otra de

plata como electrodos con un voltaje de 12 voltios, una intensidad de corriente de 5 amperios y un tiempo de 40 minutos; se logró disminuir <1.8 NMP las bacterias Coliformes. La tasa de remoción de bacterias Coliformes totales en el proceso electroquímico de la PTAR – Jaén alcanzó un 99% empleando placas de cobre y plata como electrodos, con un voltaje de 12V y una intensidad de corriente en amperios de 5A, con tiempos de 10, 20 y 40 minutos; observándose en el proceso de reposo (10 minutos) la precipitación de flóculos, resultando un agua cristalina y sin olor.

En la tesis de pregrado titulada “Tratamiento electroquímico de aguas residuales procedentes del Camal Municipal de Anta - Cusco - 2021” (14); cuyo objetivo fue determinar la posibilidad de tratar el agua residual del Camal municipal de Anta mediante electrólisis. El método de investigación fue el hipotético deductivo, toda vez que, con los resultados del tratamiento del agua residual mediante el proceso unitario de electrólisis, hace inferir que contribuyó enormemente en la remoción de los diferentes contaminantes en sus parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales y su variación de estos en la serie de tiempo propuesta, así como, los resultados en el antes y después del tratamiento que no hacen otra cosa más que confirmar la hipótesis planteada. Los resultados tras el proceso de electrólisis tuvieron una variación significativa como el caso de la conductividad eléctrica (CE) que disminuyó en 6,98%; la turbidez en (NTU) que disminuyó en 99,90%; el pH que se incrementó en 10,12%; los sólidos suspendidos totales (SST) descendieron en 98,06%; la demanda biológica de oxígeno (DBO5) disminuyó en 91,60%; y, la demanda bioquímica de oxígeno (DQO) disminuyó en 80,15%.

Barboza, estudió la “Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá – Ayacucho, empleando la Técnica de Electrocoagulación” (15) con el objetivo de reducir la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento, mediante el método de electrocoagulación, donde se emplearon electrodos de aluminio para la remoción de contaminantes, con un consumo de energía de 0,1 a 1,0 kWh/m³, pudiendo variar según el tipo de agua a tratar; para obtener datos se procedió a aplicar los

procesos de coagulación convencional y electrocoagulación, que a la comparación de resultados según pruebas de laboratorio, se logró la remoción de turbidez a razón de 3,44 NTU reduciéndose en un 81,43%; en una segunda prueba se obtuvo 2,43 NTU reduciéndose en un 86,88%; una tercera prueba se alcanzó 0,99 NTU reduciéndose 94,65%; una cuarta prueba con 1,5 NTU reduciéndose en un 91,9%; y, una quinta y última prueba con 2,27 NTU y una remoción del 87,74% respecto al valor inicial.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Aguas residuales municipales:

Son aquellas aguas residuales que proceden o son de origen doméstico, generalmente mezcladas con las aguas del drenaje pluvial, así como, de las aguas residuales industriales (tratadas), para ser vertidas al sistema de alcantarillado sanitario, que conduce una empresa que provee servicios de saneamiento en centros poblados urbanos y/o rurales o quien haga sus veces.

La composición de contaminantes de estas aguas, aparentemente están libre de contaminantes peligrosos, pero es de advertir hoy en día, la presencia de contaminantes emergentes, así como, medicamentos, con grave amenaza al ambiente y a la salud pública.

2.2.2. Estándares de Calidad Ambiental para Agua

Aprobado con Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, que modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros.

Los ECA para agua, según el marco normativo vigente para el Perú, determina el nivel o grado de concentración de contaminantes como elementos, sustancias o parámetros biológicos, físicos y químicos presentes en el agua, en su calidad de cuerpo receptor, no debiendo representar algún tipo de riesgo a la salud pública ni para el ambiente.

Dicha norma es importante porque exige la adopción de medidas preventivas y el control de la calidad, así como, la aplicación de medidas punitivas ante el incumplimiento de estos ECA para agua.

Es de aplicación a los cuerpos de agua superficial y subterránea en su estado natural en todo el territorio nacional y es obligatorio tanto en el diseño del marco normativo y políticas públicas, tomado como referente de obligación y aplicación de todo instrumento de gestión ambiental.

Si el resultado de la caracterización de las aguas, superan los ECA, la autoridad competente, en este caso la Autoridad Nacional del Agua (ANA), ejercerá su potestad sancionadora por la comisión de infracción a la Ley y el Reglamento, ya sea por parte de personas naturales o jurídicas, públicas o privadas; y, tengan o no la condición de usuarios de agua.

Asimismo, la Autoridad Nacional de Agua (ANA) cuando existe la transgresión a los ECA para agua en un cuerpo de agua natural en calidad de receptor o se incumpla alguna de las condiciones establecidas en la norma y que cause perjuicio al ambiente y/o a la salud pública, no autorizará el vertimiento y/o reutilización de las aguas residuales, o en todo caso revocará la autorización correspondiente.

Asimismo, la clasificación de los ECA para agua es según la categoría asignada a cada cuerpo receptor, donde indica la calidad del agua que se requiere mantener o a la que se requiere alcanzar, según los tipos de usos y conservación del recurso agua.

En el caso de que los cuerpos de agua receptores que no cuenten o no se les hayan asignado categoría alguna en torno a su calidad, éstos serán considerados transitoriamente con la categoría de la fuente a la que tributan, tal como se muestra en la Tabla N° 01.

| CATEGORÍA 1: Poblacional y recreacional | | | | |
|--|--|--|---|------------------------|
| Subcategoría A. Aguas superficiales designadas a la producción de agua potable | | | Subcategoría B. Aguas Superficiales destina-das para recreación | |
| A1 | A2 | A3 | B1 | B2 |
| Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección | Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional | Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado | Contacto primario | Contacto secundario |

| CATEGORÍA 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales | | | |
|---|---|--|--|
| C1 | C2 | C3 | C4 |
| Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras | Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino- costeras | Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino-costeras | Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas |

| CATEGORÍA 3: Riego de vegetales y bebida de animales | | |
|--|-----------------|--------------------------|
| D1 Riego de vegetales | | D2 Bebida de animales |
| Agua para riego no restringido (c) | Agua para riego | Bebida de animales |

| CATEGORÍA 4: Conservación del ambiente acuático | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| D1 Riego de vegetales | | D2 Bebida de animales |
| Agua para riego no restringido (c) | Agua para riego | Bebida de animales |

Tabla 1. Categoría de agua según su uso (16)

2.2.3. Límites Máximo Permisibles - LMP

Los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), fueron aprobados mediante Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Los parámetros de calidad, sujetos a la caracterización y monitoreo de los efluentes de las PTAR está establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, para ello se determina los Límites Máximos Permisibles, tal como se detalla en la Tabla N° 02:

- Aceites y Grasas
- Coliformes Termotolerantes
- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Demanda Química de Oxígeno
- pH
- Sólidos Totales Suspendidos
- Temperatura

| Determinación / Parámetro | Recipiente | Volumen mínimo de muestra (1) | Preservación y concentración | Tiempo máximo de duración |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------|
| Físico-Químico | | | | |
| Temperatura | P, V | 1000 ml | No es posible | 15 min. |
| pH (2) | -- | 50 ml | No es posible | 15 min. |
| DBO5 (3) | P, V | 1000 ml | Refrigerar a 4°C | 48 horas |
| DQO (3) | P, V | 100 ml | Analizar lo más pronto posible o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar a 4°C | 28 días |
| Aceites y grasas | V, ámbar boca ancha calibrado | 1000 ml | Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar a 4°C | 28 días |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | P, V | 100 ml | Refrigerar a 4°C | 7 días |
| Microbiológico | | | | |

| | | | | |
|----------------------------|-----------------|--------|--|---------|
| Coliformes termotolerantes | V, esterilizado | 250 ml | Refrigerar a 4°C Agregar tiosulfato en plantas de cloración | 6 horas |
|----------------------------|-----------------|--------|--|---------|

Tabla 2. Parámetros sujetos a caracterización de una PTAR (17)

- (1) Sin restricción para el volumen máximo de la muestra.
- (2) La medición del efluente en las lagunas de estabilización se debe realizar entre las 10:00 y 11:00 horas, evitando así, interferencias del desequilibrio del sistema carbonatado por alta actividad fotosintética (horas de mayor radiación solar).
- (3) Filtrar las muestras de los efluentes (filtro no mayor a 1 micra de porosidad, lo cual debe ser reportado con los resultados del ensayo) para eliminar la interferencia de algas, determinando de este modo la DBO y DQO, soluble o filtrada. No se debe filtrar las muestras si los efluentes son vertidos en cuerpos de agua lénticos (lagunas, lagos, bahías, etc.).

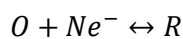
Leyenda.- P = frasco de plástico o equivalente; y, V = frasco de vidrio.

2.2.4. Reacciones electroquímicas

Estas reacciones pueden ser de reducción u oxidación (redox) y se basan en la transferencia de electrones, en las que se presentará una especie química oxidante y otra reductora, que a su vez alcanzarán su forma reducida y su forma oxidada respectivamente.

Este tipo de reacciones se da cuando una especie química pierde electrones y otra gane. La especie química que cede electrones de su estructura química y queda con carga mayor a la inicial se llama especie reductora, mientras que la especie química que capta esos electrones, queda con carga menor, llamado también oxidante.

Ecuación general de la electroquímica:



En donde:

O = Especie oxidada.

R = Especie reducida.

Ne⁻ = N° de electrones transferidos por mol.

Si los compuestos inorgánicos se disuelven en agua o en otros líquidos, estos se ionizan, es decir, sus moléculas pasan por un proceso de disociación, ya sea con carga positiva o negativa, teniendo la propiedad de conducir la corriente eléctrica.

Si en una solución electrolítica se instalan electrodos aplicando corriente directa, los iones positivos se moverán hacia el electrodo negativo y los iones negativos al electrodo positivo, transformándose en moléculas o átomos neutro; estas reacciones pueden ser homogéneas (en la solución) o heterogéneas (en la superficie del electrodo).

Para que se den las reacciones electroquímicas, se dará la polarización de electrodos, conocida también como desviación del potencial aplicado respecto al potencial de equilibrio debido al paso de corriente, mientras que el cambio de potencial (sobre potencial), es controlado con el incremento de: 1) la conductividad de la solución; 2) área de electrodos; y, 3) distancia entre electrodos.

Los procesos principales en las reacciones electroquímicas son:

- Transporte de masa: se da cuando la masa de la solución va al electrodo, debido a las diferencias en el potencial eléctrico, químico, así como, por el movimiento del agua.
- Transferencia de electrones: es una reacción química muy elemental que se da en la naturaleza a diario y en un laboratorio (18).

2.2.5. Contaminación de los cuerpos de agua naturales

El vertimiento de aguas residuales sin tratamiento o tratadas de forma inadecuada (parcialmente) contaminan las aguas superficiales de los cuerpos naturales y por infiltración en el suelo y subsuelo a las aguas subterráneas, siendo fuentes de contaminación para el ambiente y para la salud pública.

Una parte de las aguas que son conducidas a la red de desagüe (alcantarillado sanitario), son tratadas parcialmente (tratamientos primarios y secundarios) en sus parámetros físicos, químicos y/o biológicos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, sean estas de tecnologías como lagunas aireadas, lagunas facultativas, lodos activados o filtros percoladores, entre otros; cuyos efluentes son utilizados en el riego de cultivos, de áreas verdes o dispuestas en cuerpos de agua naturales.

La otra parte de estas aguas que no llegan a la planta de tratamiento de aguas residuales, sean por la capacidad operativa de la infraestructura u otra, son dispuestas sin tratamiento alguno sobre cuerpos de agua naturales o reutilizado en riego de cultivos o áreas verdes, con la contaminación evidente al ambiente y a la salud pública (18).

2.3. Definición de términos básicos

Aguas residuales: Aguas que han recibido uno o más usos, donde sus características primigenias fueron modificadas por actividades antrópicas y debido a su calidad demandan tratamiento, antes de ser vertidos a cuerpos de agua natural o antes de su reuso para cultivos u otros (18).

Adsorción: Adherencia o retención física de átomos, iones, moléculas o sustancias ya sean de sólidos, líquidos o gaseosos en la superficie, poros, meso poros o micro poros del carbón activado.

Adsorbato: Sustancias que son absorbidas por carbón activo u otro material con capacidad de adsorción.

Aguas residuales domésticas: Aguas servidas de origen residencial y comercial que contienen desechos sobre todo del tipo fisiológicos y otros, procedentes de las actividades cotidianas del hombre y deben ser vertidas de forma adecuada (18).

Aguas residuales municipales: Aguas de origen doméstico, generalmente mezcladas con las aguas del drenaje pluvial, así como, con aguas residuales industriales tratadas previamente, para su ingreso en los sistemas de

alcantarillado sanitario, conducido por una empresa que provee servicios de saneamiento en centros poblados urbanos y/o rurales (18).

Ánodo: Es un electrodo donde se da una reacción de oxidación, donde el material pierde electrones y aumenta su estado de oxidación, gracias a la energía eléctrica.

Cátodo: Es un electrodo donde se da una reacción de reducción, donde el material reduce su estado de oxidación al recibir electrones, gracias a la energía eléctrica.

Carbón activado: Sustancia de origen vegetal sometido a procesos que permite incrementar su grado de porosidad y superficie interna, con la finalidad de atrapar compuestos orgánicos y otras sustancias químicas en su superficie.

Coliformes: Grupo de bacterias gram negativas relacionadas al agua y el tracto intestinal de animales de sangre caliente, identificadas como indicadores sobre el estado de insalubridad en la producción de alimentos y bebidas.

Corriente eléctrica: Fenómeno físico que consiste en el movimiento de cargas (ion o electrón) eléctricas entre dos puntos a diferente potencial, uno con exceso de electrones con respecto al otro.

Corriente directa o continua: Está dado por el paso de electrones o corriente eléctrica por un conductor, de forma constante, con una misma intensidad y en una misma dirección.

Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO5): Es la cantidad de oxígeno estimada que requiere un grupo microbiano heterogéneo para la oxidación de la materia orgánica en el agua, por un período de tiempo (5 días), condiciones y temperatura (20 °C) específicos.

Densidad de corriente: Es una magnitud vectorial expresada en la cantidad de unidades de corriente eléctrica por unidad de área o superficie.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Determina la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica del agua, en condiciones específicas de temperatura y oxidantes.

Eficiencia de tratamiento: Es la relación que existe entre la masa de contaminantes removida y la masa de contaminantes presente en el afluente, expresada en porcentaje.

Electrólisis: Proceso unitario de descomposición de una sustancia en una solución acuosa, mediante el uso de la electricidad aplicado mediante electrodos, donde interviene una diferencia de potencial, donde los iones de carga positiva van hacia el polo negativo y viceversa; asimismo, en este proceso se presentan reacciones químicas cerca de los electrodos, donde desprenden gases, se adhieren sustancias, se incrementa la temperatura, así como, se presenta cambios de color en la solución.

Filtración: Método de remoción de partículas suspendidas y coloides de una suspensión acuosa al atravesar un medio poroso, también llamado operación final de clarificación en una planta de tratamiento de agua.

Hidrólisis: Reacción química que se da en el agua y se emplea para sustituir, eliminar o fragmentar un compuesto, materia orgánica o enlaces químicos.

Junta Administradora de Servicios de Saneamiento (JASS): Son organizaciones comunales prestadoras de servicios de saneamiento, constituidas y elegidas con la finalidad de administrar, operar y mantener los servicios de saneamiento de uno o más centros poblados del ámbito rural (18).

Muestra puntual: Muestra tomada al azar en un momento determinado para su análisis en laboratorio y otros parámetros se obtienen *in situ*.

Oxígeno Disuelto: Concentración dada en mg/L de la cantidad de oxígeno que tiene el agua a una temperatura determinada.

Potencial de Hidrógeno (pH): Concentración de Hidrogeniones de una solución que sirve para determinar su grado de alcalinidad o acidez.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y/o Municipales:

Infraestructura que integra operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos empleados en la depuración de aguas residuales de tal manera que permita alcanzar niveles óptimos de calidad ya sea para su disposición final o su reutilización (18).

Prototipo: Primer ejemplar o molde que se diseña y se fabrica de un invento u otro, que sirve como modelo para su producción.

Reacciones electrolíticas: Procesos que utilizan la corriente eléctrica para separar elementos de un compuesto químico.

Tensión eléctrica: Es la tensión o presión que ejerce una fuente de energía en un circuito eléctrico, su unidad de medida son los voltios (V).

Tratamiento primario: Procesos físicos donde se realiza la remoción de una parte de los sólidos suspendidos, así como, de la materia orgánica del agua residual, este efluente contiene todavía alto contenido de materia orgánica y DBO.

Tratamiento secundario: Procesos físicos donde se remueve la materia orgánica y sólidos suspendidos.

Tratamiento terciario: Última fase donde se dan procesos físicos y químicos que permite reducir o eliminar la carga de contaminantes específicos luego del tratamiento secundario como son el fósforo, nitrógeno, compuestos orgánicos, entre otros; así como, la reducción o eliminación de sólidos suspendidos y natas formadas por materia flotante, aceites y grasas; ya sean por procesos de filtración granular, superficial y/o de membranas. La desinfección también es considerada como proceso en el tratamiento terciario.

Turbina hidráulica o turbina hidroeléctrica: Aparato que permite la transformación de la energía mecánica (hidráulica) en energía eléctrica.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Metodología aplicada para el desarrollo de la solución

El proyecto de inversión de “Instalación del sistema de agua potable y alcantarillado en el centro poblado de Pampa Concepción – distrito de Echarati”, con código único de inversión 2082838, a cargo de la Municipalidad Distrital de Echarati (administración directa), contempló la construcción del componente “sistema de tratamiento de aguas residuales”: una caja de llegada, una cámara de rejillas, un desarenador controlado por un vertedero proporcional, 02 tanques imhoff, 02 filtros biológicos; y, 02 lechos de secado, más no así, el sistema de tratamiento terciario o de desinfección, por cuanto, la Municipalidad debería implementarlo a través de una inversión de optimización, de ampliación marginal, de rehabilitación y de reposición (IOARR), por cuanto, no existe el modo de comparación con la tecnología propuesta.

El método de prototipado o modelo propuesto, es una representación tangible de ideas y soluciones a problemas específicos en diseño de ingeniería, está basado en etapas para el diseño e implementación de un prototipo, es decir, define los requerimientos y variables involucradas, las herramientas y materiales para su diseño, el prototipo en sí, las pruebas a desarrollar y el análisis de los ensayos o resultados; y, las posibilidades de ser modificado, ampliado y/o escalable.

Esta propuesta que requiere una inversión mínima, utiliza recursos naturales renovables, de fácil operación y mantenimiento, amigable con el ambiente, que utiliza energía limpia, auto sostenible y con altas tasas de electrofiltración de forma continua; que lo hace un prototipo aceptable y adaptable por investigadores e involucrados en el sector saneamiento (agua para consumo humano y aguas residuales), la industria, la minería, entre otros.

Los procesos y componentes del prototipo, así como, su funcionalidad, siguen un procedimiento establecido tal cual ha sido concebido, que se detalla en el capítulo correspondiente.

No se han encontrado trabajos similares específicos (filtración electroquímica), pero si, otros relacionados a la electroquímica, con numerosas aplicaciones, basada también en procesos unitarios (electrocoagulación, la electrodiálisis, la electroflotación, la electrodeposición, la electro oxidación, entre otras).

3.1.1. Diseño

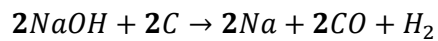
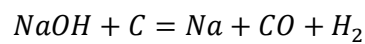
3.1.1.1. Elaboración de carbón activado:

Se hizo la selección del precursor del carbón, en este caso cañas de Bambú (*Guadua angustifolia*) secados naturalmente, elegido por los antecedentes de su uso eficiente en el tratamiento de aguas, en la industria y en el tratamiento de agua y aguas residuales y que según análisis lignocelulósico de esta especie de Bambú, tiene 28.22% de Lignina, 18.21% de Hemicelulosa y 47.13 de Celulosa.

En una carbonera artesanal, se colocó 20 kg. de trozos de culmos o cañas de Bambú secos, en cuyo proceso se alcanzó temperaturas 320 °C durante una hora, luego de enfriado, se procedió con la trituración manual, para luego pasar por un tamiz de 3 mm de diámetro, obteniendo 6 kg, de carbón vegetal (de los cuales se utilizará 2 kg.), para proceder con la impregnación térmica de Hidróxido de Sodio (NaOH) o soda cáustica como agente de activación a razón de 4:1 a una temperatura de 200 °C durante 4 horas y 700 °C durante 1 hora (activación térmica o endotérmica). Una vez culminado el proceso de activación y frío, se procedió a lavar con agua destilada en cinco oportunidades hasta obtener un pH de 7.1 para luego ser tendido y secado a temperatura ambiente, debidamente protegido de la presencia de polvo y otras impurezas o contaminantes.

En el proceso de carbonización del Bambú, los elementos que no forman carbón como el Oxígeno (41.33%) e Hidrógeno (5.18%) son eliminados producto de la pirolisis, para luego los átomos de carbono (51.84%) organizados en pequeñas

estructuras micro cristalinas (cristalitas gráficas elementales) en cuyos espacios libres, intersticios o poros están cubiertos generalmente por residuos del proceso de carbonización (alquitranes, celulosa, sílices, sustancias volátiles, entre otros) que hacen, que el carbón tenga una reducida capacidad de adsorción, que se incrementa gracias al proceso de activación, donde se incrementa la porosidad (microporosidad). Al utilizar Hidróxido de Sodio (NaOH) como agente de activación química incrementado su capacidad de conductividad eléctrica, obteniéndose así la siguiente ecuación química balanceada:



Para la obtención del carbón activado, se siguieron las siguientes etapas:



Figura 1. Etapas en el proceso de activación del carbón

Fuente. Elaboración propia

3.1.1.2. Cálculo del lecho filtrante y caudal

Área transversal del lecho filtrante:

Determinada por el diámetro de reactor de 27.00 cm. o 0.27 m.

$$\varnothing = 27.00 \text{ cm.}$$

$$A = \frac{\pi(26.50 \text{ cm.})^2}{4} = 55.15 \text{ cm}^2$$

3.1.1.3. Altura de la columna de lecho filtrante

La altura de la columna o lecho filtrante es de 15 cm. o 0.15 m.

3.1.1.4. Volumen del lecho filtrante

Este ha sido determinado según la siguiente fórmula:

$$V = \pi \cdot r \cdot h$$

$$V = 3.1416 \cdot 0.1325 \cdot 0.15 = 0.0083 \text{ m}^3 \text{ (827.31 cm}^3\text{)}$$

3.1.1.5. Caudal de entrada

El caudal (Q) de entrada (afluente) es constante y es a razón de 0.18 m³/h o 0.05 L/s, que es admitida al reactor del prototipo para el proceso de filtración electroquímica, de flujo continuo, descendente y por gravedad.

3.1.1.6. Porcentaje de remoción

Para determinar el porcentaje de filtración del lecho filtrante en el prototipo de los parámetros seleccionados como sólidos totales suspendidos, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno; y, aceites y grasas, se pudo determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100$$

Donde:

- P_i = Parámetro inicial (caracterización afluente)
- P_f = Parámetro final (resultados de laboratorio)

3.1.1.7. Cantidad de remoción

Para determinar la cantidad de sólidos a ser removidos por unidad de volumen del lecho filtrante, tenemos:

$$-\Delta C = (C_2 - C_1)$$

Donde:

- ΔC = Variación de la concentración de partículas (volumen de partículas suspendidas por volumen de la solución)
- C_1 = Concentración de partículas suspendidas en el afluente (L^3/L^3)
- C_2 = Concentración de partículas suspendidas en el efluente (L^3/L^3)

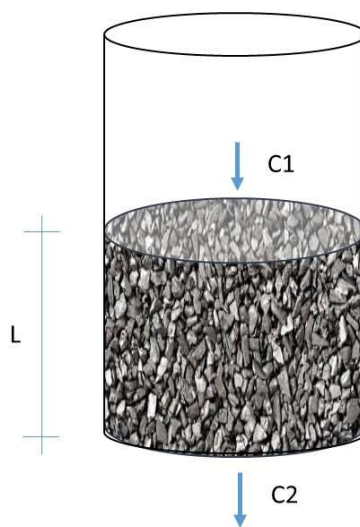


Figura 2. Lecho filtrante anódico

Fuente. Elaboración propia

3.1.1.8. Punto de saturación del lecho filtrante

Basada en la teoría de retención y arrastre, es decir, el decrecimiento de la eficiencia de filtrado obedece a la saturación propia de sus microporos por la adsorción de partículas, propiciando el incremento de la velocidad intersticial que arrastran las partículas hacia la parte inferior del lecho filtrante que, a los ensayos previos, se determinó a los 33.33 días.

Según la curva del punto de saturación, este se ha manifestado a las 800 horas de trabajo continuo.

3.1.1.9. Isotherma de adsorción de Langmuir

La isoterma de Langmuir está representada por la siguiente ecuación:

$$X/m = ab C_e / 1 + b C_e$$

Donde:

- X/m = Cantidad adsorbida por unidad de peso de carbón activado.
- a, b = Constantes.
- C_e = Concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción.

El punto de equilibrio o de quiebre se alcanza cuando el lecho filtrante ha alcanzado el límite de su capacidad de adsorción, que en el caso particular es de 33.33 días, al cabo del cual requiere reemplazo el lecho filtrante.

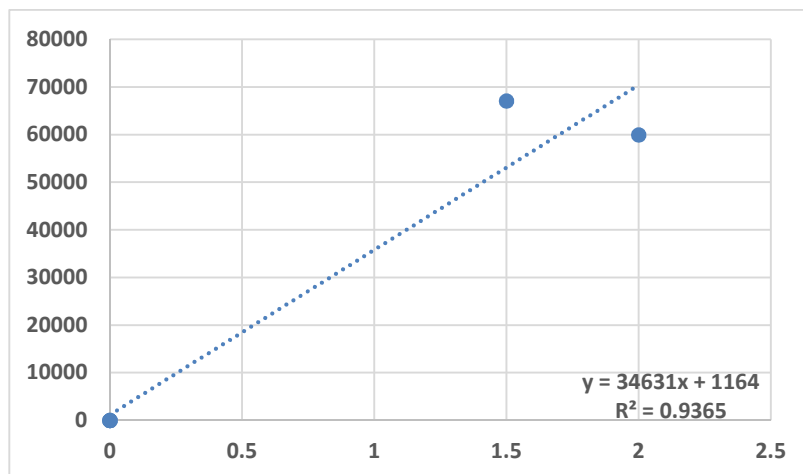


Figura 3. Isoterma de adsorción de Langmuir

Fuente.- Elaboración propia

La ecuación de la recta en su forma lineal está representada por:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{b}C + \frac{1}{kb}$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$y = m x + b$$

$$y = 83720x + 2814$$

La medida estadística de R^2 o coeficiente de relación nos da un valor de 0.9365, haciéndonos ver que tan cerca está a la unidad, típico de una relación directamente proporcional entre dos variables y sugiere que se trata de una adsorción homogénea garantizando su eficiencia en los resultados obtenidos en las pruebas de isothermas, respecto de la adsorción de contaminantes del efluente de la PTAR Pampa Concepción y la filtración electroquímica con base a carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) activado con NaOH.

3.1.2. Prototipo

El reactor, consta de un tanque de polietileno (alta densidad) de 20 litros de capacidad, donde un 50% está dispuesto con el lecho filtrante a base de carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) en su forma granular

(Ø3mm.), activado con NaOH y un peso aproximado de 2 kg. (1×10^6 m² de área de filtrado aproximadamente), que hará las veces de lecho filtrante anódico, donde reposará el ánodo de titanio perforado y separado con un anillo de caucho con el cátodo de titanio perforado; ambos electrodos conectados a la fuente de energía eléctrica continua autogenerada mediante una turbina que proporciona 12 voltios de tensión eléctrica, que tratará las aguas del efluente de la PTAR Pampa Concepción a una tasa de electrofiltración de 0.05 L/s, en forma continua, por gravedad y forma descendente.

El prototipo está dispuesto de válvulas de regulación de entrada, salida y un tubo de rebose de 1" de diámetro que conecta a la red principal del efluente de la PTAR Pampa Concepción, por donde se evacúan las espumas generadas en el proceso de electro oxidación y las aguas residuales en general cuando el lecho filtrante se encuentre saturado, es decir, al final del tiempo de vida útil (al cabo de un mes aproximadamente).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4.1. Identificación de requerimientos

Para el diseño del prototipo de filtración electroquímica se han requerido materiales, insumos y equipos fáciles de obtener, que resuelven los problemas de contaminación del cuerpo de agua receptor del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Pampa Concepción, es decir, el Río Urubamba.

4.2. Análisis de la solución

La solución para reducir los contaminantes de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales en sus parámetros físicos, químicos y biológicos es mediante la implementación de un sistema de tratamiento terciario donde el efluente aumenta la calidad de sus aguas antes de su vertimiento a cuerpos de agua naturales, al ambiente o para su reutilización, existiendo una variedad de sistemas como la desinfección (Hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, luz ultravioleta, etc.), la filtración (filtros de carbón activado, filtros multicapa, filtros de membrana, ósmosis inversa), entre otros.

En la provincia de La Convención, en la región Cusco, en nuestro país, en las Américas y gran parte del mundo, las aguas residuales son vertidas al ambiente en su mayoría sin tratamiento alguno, con algún tipo de tratamiento y solo algunas con tratamiento terciario o desinfección.

4.2.1. Propuesta de solución

La solución propuesta comprende una tecnología novedosa y eficiente traducida en un prototipo de filtración electroquímica, cuyo diseño y construcción es de bajo costo respecto de otros sistemas de tratamiento terciario, su construcción requiere de un día y su implementación en campo definitivo otro día, es autosostenible y genera su propia energía para las operaciones unitarias (físicas) como la filtración; los procesos

unitarios (químicos) como la electrólisis, oxidación y adsorción; con un flujo descendente, continuo y por gravedad.

4.2.2. Viabilidad de la propuesta

Desde un enfoque tecnológico, de operación y mantenimiento, de resultados, de costos de implementación, la propuesta del prototipo de filtración electroquímica es viable, además de que sus componentes pueden ser fácilmente escalables.

Desde el punto de vista social, es aceptado por las organizaciones comunales que prestan los servicios de saneamiento y cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales como es el caso del centro poblado de Pampa Concepción en el distrito de Echarate, provincia de La Convención; por las ventajas ambientales que éstas representan y los costos de operación bajos.

Como ventaja ambiental tenemos que su fuente de alimentación de energía eléctrica es a través de energía limpia y renovable, procede de un generador (turbina) incorporado en sus estructuras y utiliza la gravedad para convertir la energía mecánica (hidráulica) en energía eléctrica y no representa riesgos para el ambiente.

4.2.3. Análisis técnico y económico

El prototipo está diseñado para un funcionamiento óptimo con caudales iguales a 0.05 L/s (0.18 m³/h o 4.32 m³/día) que puede ser escalado a tamaños requeridos de las PTAR, permitiendo cubrir estas brechas de calidad ambiental donde la inversión pública no apunta.

Desde el aspecto económico, los costos de fabricación (insumos, materiales y equipos), operación y mantenimiento, son realmente bajos y accesibles frente a otros sistemas de tratamiento terciario.

4.2.4. Restricciones de costos y tiempo

No existen restricciones respecto a costos y tiempo, toda vez que como se ha mencionado en párrafos precedentes, su construcción e implementación requiere una mínima inversión y el tiempo que demanda la construcción e instalación hasta su puesta en operatividad es tan solo de dos días.

CAPITULO V

CONSTRUCCIÓN

5.1. Construcción

Con base a la experiencia científica en materia de tratamiento de aguas residuales en el país y el orbe, específicamente en el tratamiento terciario, se ha identificado como una brecha en el sector saneamiento, toda vez que la mayoría de plantas de tratamiento no complementan el círculo del tratamiento en sí, cual es la etapa previa al vertimiento, por lo que en el trabajo investigativo, se ha diseñado y propuesto este prototipo novedoso y sobre todo amigable con el ambiente; cuyas etapas en el diseño según sus partes y componentes son:

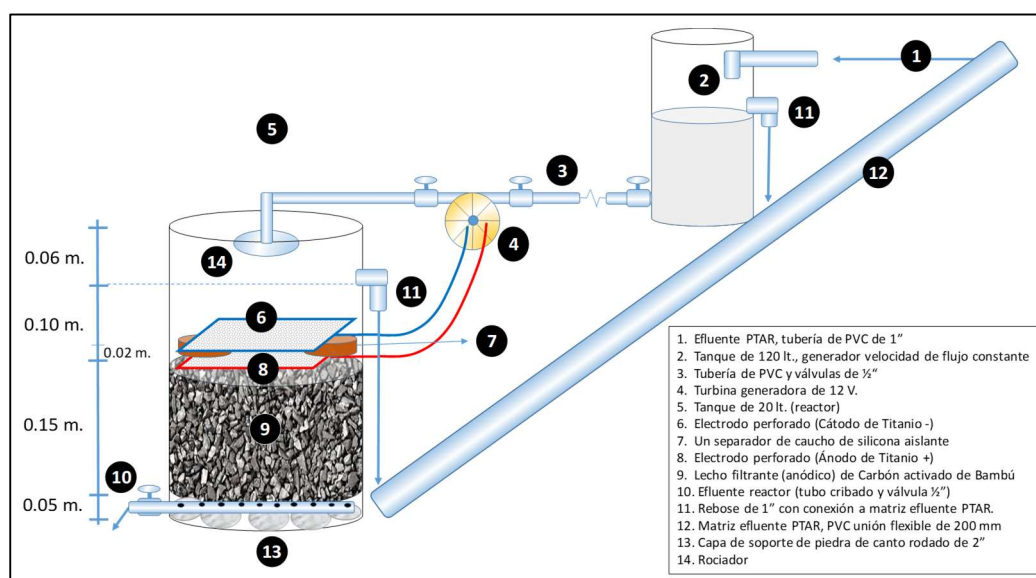


Figura 4. Esquema del funcionamiento del Prototipo

Fuente. Elaboración propia

4.2.4.1. Componentes

Cámara de carga: Tanque de polietileno de alta densidad de 120 litros que admite el efluente de la PTAR mediante una tubería de 1" y es conducida al reactor por gravedad a través de una tubería de PVC de ½", a una presión constante (0.5 bar aproximadamente), para el funcionamiento óptimo la turbina y un tubo de reboso conectada a la red principal de la PTAR.



Figura 5. Instalación de tanque de carga

Fuente. Elaboración propia

Reactor: Es el componente principal del prototipo, consta un tanque de polietileno (alta densidad) de 20 litros de capacidad, donde se dan los procesos unitarios de electro oxidación y electrofiltración, donde está dispuesta el lecho filtrante anódico (ánodo de Titanio)



Figura 6. Tanque de del reactor

Fuente. Elaboración propia

Electrodos: Los electrodos (ánodo y cátodo) son de Titanio perforado, con dimensiones de 17 x 5 cm. cada uno, conectados a la corriente continua por medio de cables aislados, alimentados mediante energía eléctrica generada en la turbina hidráulica conectada a las estructuras del prototipo, con una tensión eléctrica de 12 voltios. Por las propiedades del Titanio, este requiere mantenimiento al cabo de un mes de trabajo continuo, sin alteraciones en su estructura, solo

acumulación de óxido, espumas y partículas en su estructura, al cabo del cual acumula hasta 2.6 nano micras de óxido generalmente que fácilmente es removido en el mantenimiento sin alterar su estructura y composición, tal como se aprecia en la siguiente gráfica de eficiencia, con un coeficiente de correlación lineal de 0.89.

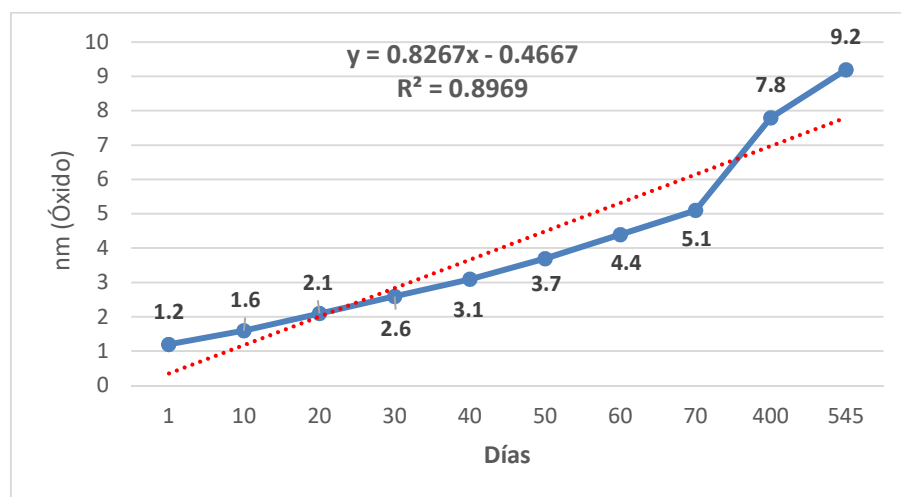


Figura 7. Curva de eficiencia para mantenimiento de los electrodos de Titanio

Fuente. Elaboración propia

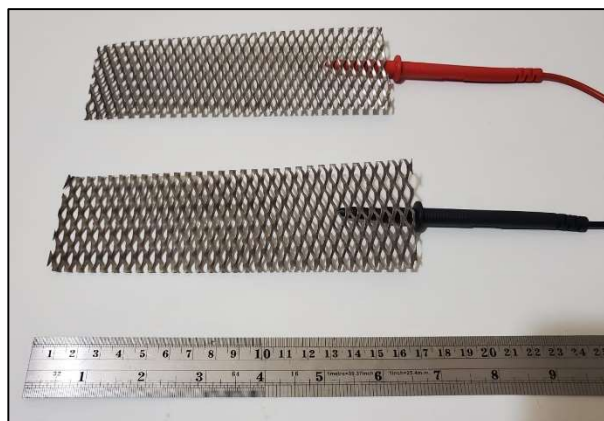


Figura 8. Electrodos de Titanio

Fuente. Elaboración propia

Éstas técnicas y otras electroquímicas de oxidación avanzada, según la literatura, son novedosas y amigables con el ambiente, son eficientes, su relación costo – beneficio es aceptada, son versátiles, selectivos, de fácil automatización y en muchos casos como este no necesitan adicionar sustancias o compuestos químicos para alcanzar su objetivo, toda vez, que sus degradantes se producen en el proceso

(generación de especies oxidantes *in situ*), siendo la inversión más importante en los electrodos (a razón de Cien soles cada electrodo) y el consumo de energía; este último integrado en el prototipo.

Lecho Filtrante: Carbón de Bambú (*Guadua angustifolia*) en su forma granular (\varnothing 3 mm.) activado con NaOH, con un peso de 2 kg. (1×10^6 m² de área de filtrado aproximadamente) sujeto a una malla de nylon de 1 mm., para evitar la flotación y erosión, considerado como lecho filtrante anódico donde reposa el ánodo de Titanio, todo ello en una capa de soporte de piedra de canto rodado de 2" de diámetro, donde está dispuesto la tubería cribada para el rebose del agua electrofiltrada.

Según los ensayos previos, el recambio del lecho filtrante es aproximadamente después de un mes, donde alcanza el punto de saturación, a la par se realiza el mantenimiento de los electrodos de Titanio.



Figura 9. Carbón Activado Granular (\varnothing 3mm.) de Bambú

Fuente. Elaboración propia

Separación de electrodos: Dispuestas de manera paralela a una distancia de 2.5 cm., aisladas mediante anillos de caucho.

Foto N° 05.- Anillos aislantes de caucho



Figura 10. Anillos aislantes de caucho

Fuente. Elaboración propia

Fuente de poder: Turbina hidráulica que autogenera 12 voltios de tensión eléctrica, conectada a la línea de conducción del efluente que proviene de un tanque de polietileno de alta densidad de 120 litros de capacidad (cámara de carga) en una tubería de PVC de ½”, a una presión constante (0.5 bar aproximadamente), para el funcionamiento óptimo de la turbina.

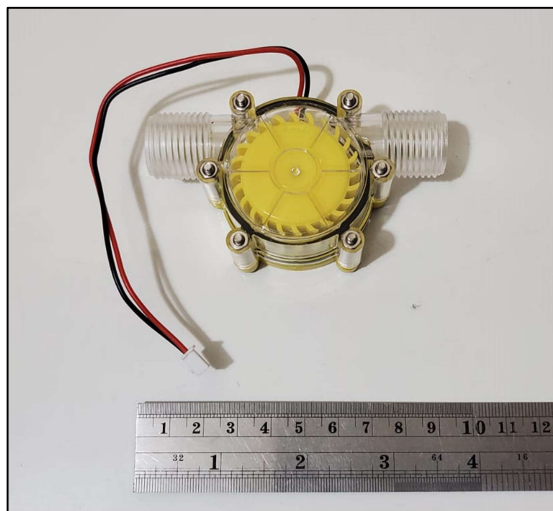


Figura 11. Microgenerador de corriente eléctrica (turbina hidráulica)

Fuente. Elaboración propia

5.2. Pruebas y resultados

5.2.1. Caracterización de las aguas residuales a tratar

Se ha caracterizado el efluente de la PTAR Pampa Concepción, por un laboratorio acreditado por el INACAL (el laboratorio de ensayo utilizado fue AGQ PERU S.A.C., con número de acreditación 0625-2016-INACAL/DA y registro LE-072), según los parámetros establecidos por la normatividad en materia de saneamiento, el método de muestreo de análisis se encuentran estandarizados, normalizados y validados, tal es el caso que, para STD aplica el método de análisis SMEWW2540 (para muestras de aguas residuales domésticas e industriales, aguas superficiales, lluvias y subterráneas); el método de análisis SM 9221 E1 (Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, Ed. 22nd On line) que aplica para la determinación de Coliformes fecales; el método de análisis SMEWW5210 B de electrodo de membrana (electrometría), este método es aplicable para la determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas; el método de análisis SMEWW5220 D para la demanda química de Oxígeno (DQO) mediante espectrofotometría de absorción molecular; y, el método de análisis PP-226 para la determinación de la concentración de grasas y aceites como contaminante en aguas residuales industriales; tal como se muestra en la Tabla N° 4.

| Parámetro | Equipo | Método de Análisis | Muestreo |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|
| pH | Multiparámetro WTW | - | Puntual |
| Temperatura | Multiparámetro WTW | - | Puntual |
| Sólidos Totales Suspendidos | Multiparámetro WTW | SMEWW2540 | Puntual |
| Coliformes fecales | Multiparámetro WTW | SM 9221 E1 | Puntual |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | Multiparámetro WTW | SMEWW5210 B | Puntual |
| Demanda Química de Oxígeno | Multiparámetro WTW | SMEWW5220 D | Puntual |

| | | | |
|------------------|--------------------|--------|---------|
| Aceites y grasas | Multiparámetro WTW | PP-226 | Puntual |
|------------------|--------------------|--------|---------|

Tabla 3. Parámetros evaluados y métodos.

Fuente. Laboratorio AGQ PERU S.A.C. / OLIGO Consultores

Según la caracterización, se han obtenido los siguientes resultados: para el pH (potencial de Hidrogeniones) se obtuvo 8.10 unidades de pH, el mismo que se encuentra dentro de los parámetros establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que aprueba límites máximo permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, seguido de la Temperatura con 22.0 °C y Sólidos Totales Suspendidos con 11.0 mg/L, también dentro de los LMP; mientras que los Coliformes fecales sí sobrepasan los LMP con 1.7×10^6 NMP/100ml; y, la demanda bioquímica de Oxígeno con 20.0 mg/L; la demanda química de Oxígeno con 29.6 mg/L; y aceites y grasas <0.25 mg/L, no sobrepasan los LMP, tal como se aprecia en la Tabla N° 05:

| Parámetro | Unidad | Valor | DS N° 003-2010-MINAM |
|-------------------------------|-------------|-------------------|----------------------|
| pH | Unid. de pH | 8.10 | 6,5-8,5 |
| Temperatura | °C | 22.0 | <35 |
| Sólidos Totales suspendidos | mg/L | 11.0 | 150 |
| Coliformes fecales | NMP/100ml | 1.7×10^6 | 10000 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 20.0 | 100 |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 29.6 | 200 |
| Aceites y grasas | mg/L | <0.25 | 20 |

Tabla 4. Caracterización del efluente de PTAR Pampa Concepción

Fuente. Resultados de Laboratorio AGQ PERU S.A.C. / OLIGO Consultores



Figura 12. Toma de muestra del efluente de la PTAR Pampa Concepción

Fuente. Laboratorio AGQ PERU S.A.C. / OLIGO Consultores

5.2.2. Resultados del efluente tras el proceso de filtración electroquímica

Luego del proceso de electrofiltración, se ha realizado el muestreo del efluente del reactor, para ser analizado en laboratorio, obteniéndose los siguientes resultados:

| Parámetro | Unidad | Valor | D.S. N° 003-2010-MINAM |
|-------------------------------|---------------|--------------|-------------------------------|
| pH | Unid. de pH | 8.26 | 6,5-8,5 |
| Temperatura | °C | 23.0 | <35 |
| Solidos Totales suspendidos | mg/L | 0 | 150 |
| Coliformes fecales | NMP/100mL | 0 | 10000 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 1.5 | 100 |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 2.0 | 200 |
| Aceites y grasas | mg/L | 0 | 20 |

Tabla 5. Resultados del proceso de filtración electroquímica

Fuente.- Resultados de Laboratorio AGQ PERU S.A.C. / OLIGO Consultores

| Parámetro | Unid. Med. | Valor inicial | Valor final | Variación / Remoción |
|-------------------------------|------------|---------------|-------------|----------------------|
| pH | Unid. pH | 8.1 | 8.26 | 1.93% |
| Temperatura | °C | 22 | 23 | ↑ 1°C |
| Sólidos Totales suspendidos | mg/L | 11 | 0 | 100% |
| Coliformes fecales | NMP/100 mL | 1.7 | 0 | 100% |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 20 | 1.5 | 92.5% |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 29.6 | 2 | 93.24% |
| Aceites y grasas | mg/L | 0.25 | 0 | 100% |

Tabla 6. Comparación de resultados tras la filtración electroquímica

Fuente. Elaboración propia

Como es de advertir en las Tablas N° 6 y 7 precedentes, la eficiencia en el porcentaje de adsorción de los contaminantes del efluente de la PTAR Pampa Concepción tras el tratamiento de filtración electroquímica, es como sigue: la DQO (92.5%), DBO5 (93.24%), sólidos totales suspendidos (100%), Coliformes fecales (100%) y aceites y grasas (100%). Respecto del comportamiento del pH, este ha tenido una variación de 8.10 a 8.26 (1.93%) y la temperatura del agua electrofiltrada también se ha incrementado en 1 °C.

CONCLUSIONES

- Se ha realizado la caracterización del efluente de la PTAR Pampa Concepción, a través de ensayos por un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de la Calidad - INACAL
- Se ha diseñado, implementado y puesto en funcionamiento el prototipo de filtración electroquímica para el tratamiento terciario del efluente de la PTAR Pampa Concepción.
- Se ha determinado la eficiencia del prototipo de filtración electroquímica en los parámetros biológicos: Coliformes fecales en un 100%; parámetros físicos: la temperatura se incrementó en 1° C, los sólidos totales suspendidos - SST y aceites y grasas se removieron en un 100%; y, en los parámetros químicos: el potencial de hidrogeniones – pH, tuvo una variación de 8.10 a 8.26 (1.93%); mientras que la demanda biológica de oxígeno - DBO5 se ha logrado una remoción a razón del 93.24% y la demanda química de oxígeno - DQO en un 92.5%.
- Se ha logrado que el vertimiento de aguas residuales de la PTAR Pampa Concepción al río Urubamba, tras el proceso de filtración electroquímica, se encuentre dentro de los límites máximo permisibles y estándares de calidad ambiental para agua vigentes.
- El resultado de operación del prototipo propuesto por medio de la filtración electroquímica mediante la adsorción y oxidación en el ánodo y oxidación adicional con Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) generado *in situ* en el cátodo, ha demostrado altos porcentajes de remoción de los contaminantes en relación a otros estudios, tanto en sus parámetros físicos, químicos y biológicos, alcanzando de esta manera el objetivo general y objetivos específicos del presente trabajo de investigación tecnológica, así como, al problema identificado de contaminación de los cuerpos de agua natural que reciben efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- El diseño del prototipo es plausible de ser modificado, ampliado y/o escalable, por su diseño, versatilidad, amigable con el ambiente, autosostenible, con material precursor del carbón de la zona, de fácil implementación, que requiere una mínima capacitación para la operación y mantenimiento y los costos de construcción y operación son bajos en comparación con otros sistemas de tratamiento terciario.

- La energía requerida para el proceso de filtración electroquímica es una energía eléctrica renovable (energía hidráulica), generada en una turbina instalada en el mismo sistema que transforma la energía mecánica (hidráulica) del agua en energía eléctrica y es ambientalmente sostenible.
- El prototipo se puede utilizar en la eliminación de contaminantes emergentes, para tratar aguas para consumo humano, en la eliminación de olores, tintes y sabores de soluciones, en la industria, minería, entre otros.
- Según la literatura y trabajos de investigación similares, hacen ver que otros métodos de filtración con el empleo del carbón activado (solo) o en filtros multicapas, tienen una menor tasa de remoción de contaminantes respecto de los obtenidos con el prototipo propuesto.
- Los resultados en general del estudio ejemplificaron cuantitativamente las ventajas de utilizar electrodos de Titanio, cuyo ánodo forma parte del lecho filtrante (anódico) con base a carbón de Bambú activado con NaOH, en un prototipo de filtración electroquímica, de flujo continuo, por gravedad, con energía hidráulica autogenerada para su funcionamiento en el proceso de tratamiento de efluentes de aguas residuales de la PTAR Pampa Concepción.
- Con la implementación del prototipo, se estaría contribuyendo a disminuir la contaminación de cuerpos de agua natural que reciben efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales altamente contaminantes (físicos, químicos y biológicos), en el distrito de Echarate, en la región, el país y el mundo entero; por ende, contribuimos al logro de la meta 6.3 (para 2030), de los objetivos del desarrollo sostenible.

TRABAJOS FUTUROS

- Con la investigación, se identificó la viabilidad técnica y económica para la implementación del diseño o prototipo a escala mayor para el tratamiento de efluentes de plantas de tratamiento en la región y a nivel nacional, generando además un punto de partida para otras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Who UNICEF**. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>. [En línea] <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>.
2. **BANCO MUNDIAL**. Banco Mundial BIRF - AIF. [En línea] 2022. [Citado el: 13 de 07 de 2022.] <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>.
3. **FERNANDEZ CIRELLI, Alicia y DU MORTIER, Cecile**. Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. Buenos Aires : Solar Safe Water.
4. **MINAM**. *Política Nacional del Ambiente - Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM*. Lima, Ministerio del Ambiente. s.l. : Editorial Supergráfica E.I.R.L., 2009. pág. 44.
5. *Potential effects of groundwater and surface water contamination in an urban area*. **ABDALLA, F. y KHALIL, R.** Qus City, Upper Egypt : s.n., 2018, Journal of African Earth Sciences, Vol. 141, págs. 164-178.
6. *Performance of three pilot-scale hybrid constructed wetlands for total coliforms and Escherichia from primary effluent—a 2-year study in a subtropical climate*. **ZURITA, Florentina y CARREÓN ÁLLVAREZ, Alejandra**. 2, 2015, Journal of Water & Health, Vol. 13, págs. 446-458.
7. *Reúso de aguas residuales tratadas biológicamente, para el regadío del Jardín Botánico*. **UGAZ, F.** 1, Trujillo : s.n., 2018, SCIÉND0, Vol. 21, págs. 7-14.
8. *Simple capacitors to supercapacitors - An overview*. **Jayalakshmi, M. y Balasubramanian, K.** International Journal Electrochemical Science, págs. 1196-1217.
9. *Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del Precursor Guadua angustifolia Kunth*. **Prías Barragán, J. J., y otros**. Colombia : s.n., 2011, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exáctas de la Tierra, págs. 157-166.
10. **Robles Mendoza, L. K. y López Bueno, A. F.** *Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación*. Bogotá, Universidad De La Salle. Bogotá : Ciencia Unisalle, 2017.
11. **Astudillo Luja, Fabian Cervando**. *Modelación de un Reactor Electroquímico de flujo continuo por CFD para el tratamiento de agua residual*. Toluca : Universidad Autónoma del Estado de México, 2020.
12. **Medina Cevallos, Juan Felipe y Peralta Calderon, Marco Orlando**. *Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria*. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
13. **Ayala Espárraga, Sarita Rebeca y Barboza Elera, Edwin Alexander**. *Análisis de la eficiencia del proceso electroquímico para el tratamiento de las aguas residuales de*

la PTAR Jaén, Cajamarca, 2017. Cajamarca. Jaén : Universidad de Lambayeque, 2017. pág. 69, Tesis.

14. **Ticona Flores, Juan Carlos.** *Tratamiento electroquímico de aguas residuales procedentes del Camal Municipal de Anta, Cusco - 2021.* Cusco. Cusco : Universidad Continental, 2021. pág. 126, Tesis.

15. **BARBOZA PALOMINO, Gloria Inés.** *Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá – Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación.* Ayacucho : Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería, 2011.

16. **ANA.** *Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA.* Lima : s.n., 2010.

17. **MINAM.** *Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.* Lima : s.n., 2010.

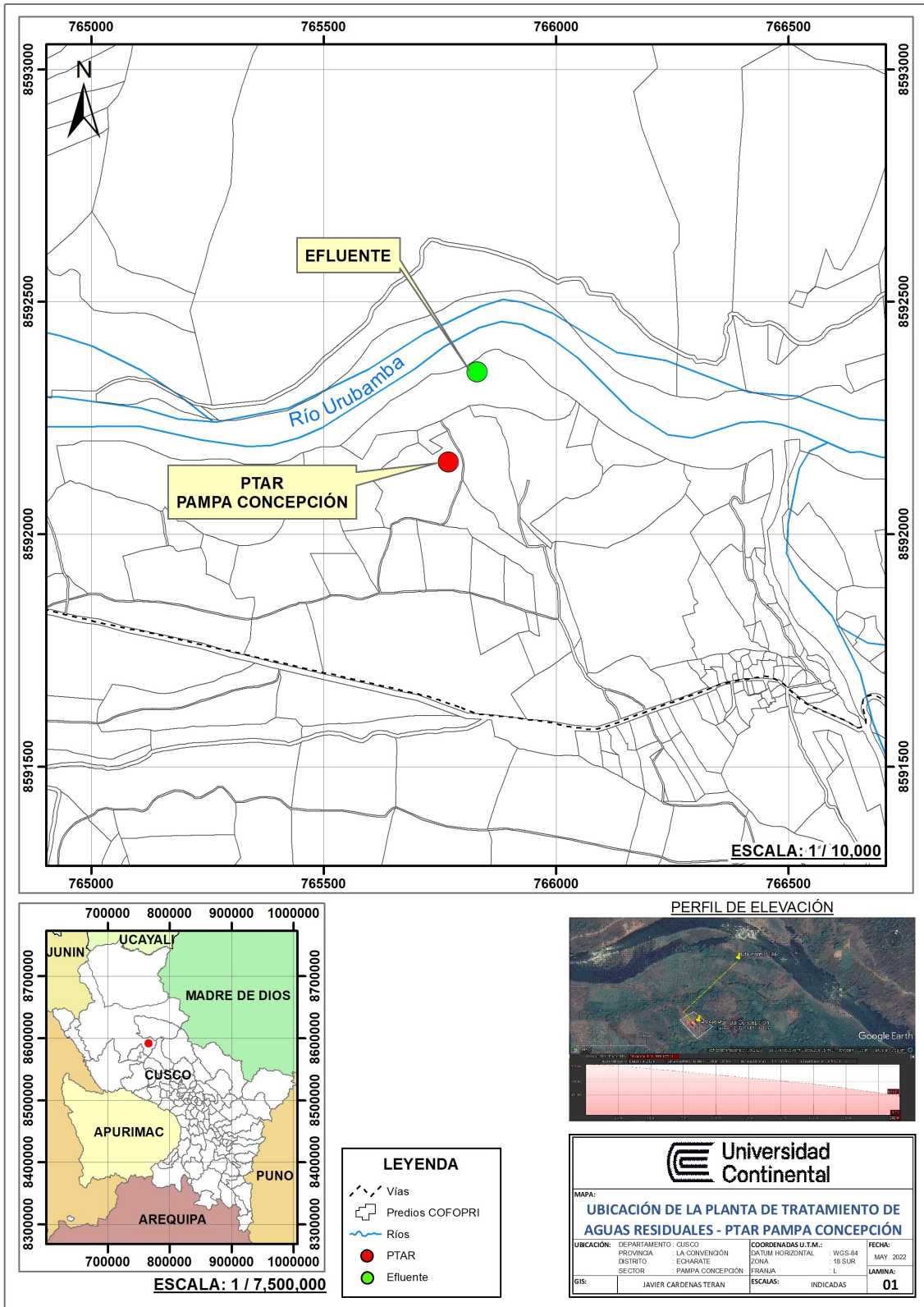
18. **Hurley, Celine N. y Masterton, William L.** *Chemistry Principles and Reaction.* s.l. : Saunders Golden Sunburts, 1997. 3ra..

19. *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales.* **OEFA.** Lima : s.n.

20. *Uso del carbón activado granular (CAG) en un biofiltro para el tratamiento de efluentes acuícolas.* **MONTER, R. A.** 2013, Simposio Iberoamericano.

ANEXOS

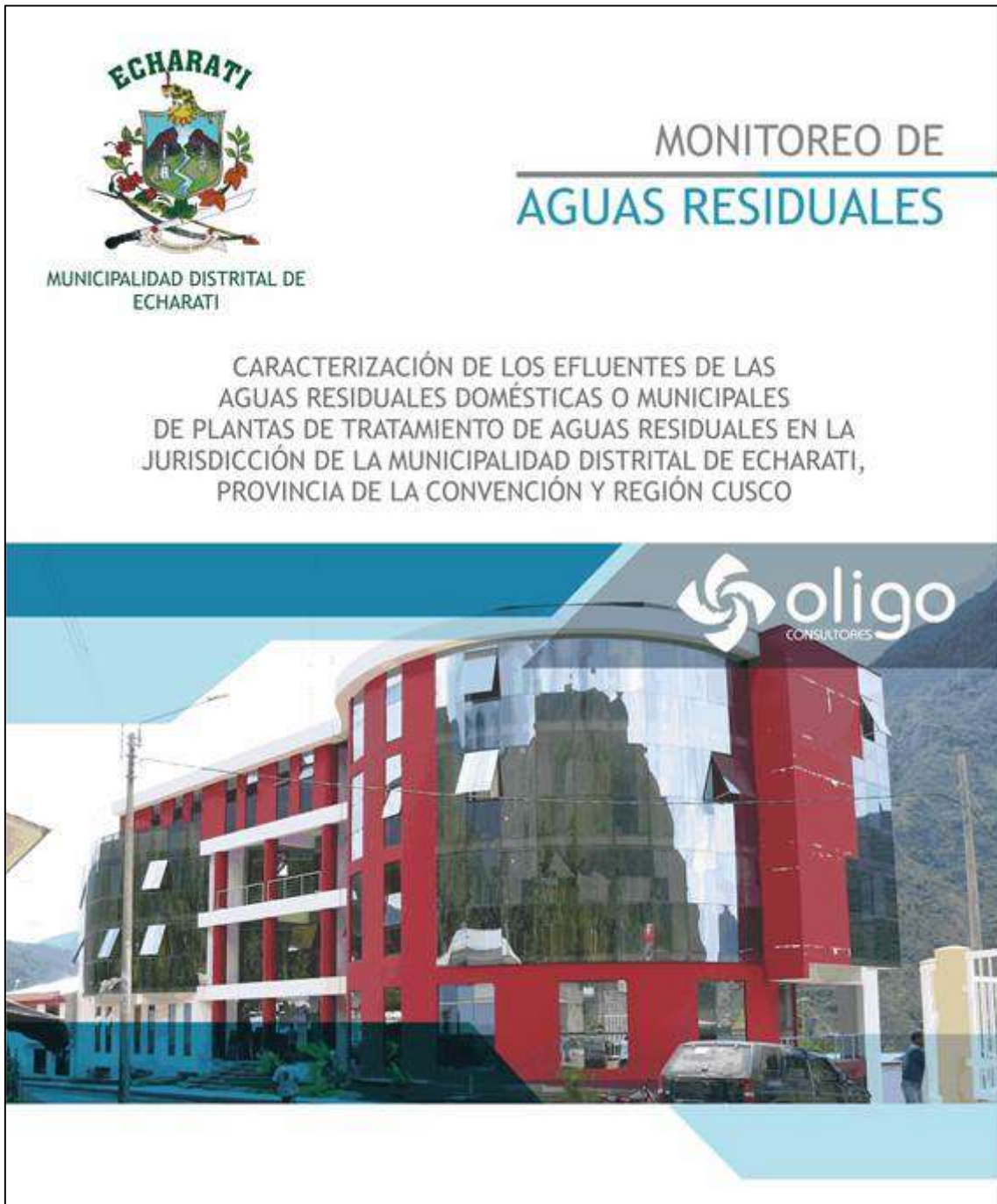
Anexo N° 01.- Mapa de Ubicación de la PTAR Pampa Concepción



Anexo N° 02.- Fotos de Operación de Prototipo



Anexo N° 03.- Resultados de Laboratorio (Caracterización Efluente PTAR)



4. DATOS GENERALES

4.1. Ubicación de las estaciones de monitoreo

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo

| Sistema de coordenadas UTM | | | | | |
|-----------------------------|--------|------|------------|--------------|--------------|
| Puntos de monitoreo | Datum | Zona | Hemisferio | Coordenada X | Coordenada Y |
| VR - 01 keshashiato | WGS 84 | 18 L | Sur | 695018 | 8602444 |
| VR - 02 Kiteni | WGS 84 | 18 L | Sur | 711657 | 8601378 |
| VR - 03 Palma real | WGS 84 | 18 L | Sur | 750711 | 8603378 |
| VR - 04 Pampa concepción | WGS 84 | 18 L | Sur | 765767 | 8592156 |
| VR - 05 Pampa concepción | WGS 84 | 18 L | Sur | 765829 | 8592350 |
| VR - 06 Echarati | WGS 84 | 18 L | Sur | 762955 | 8588599 |
| VR - 07 Echarat | WGS 84 | 18 L | Sur | 762975 | 8588622 |
| VR - 08 Echarati | WGS 84 | 18 L | Sur | 762924 | 8588606 |
| VR - 09 Echarati | WGS 84 | 18 L | Sur | 762942 | 8588641 |

6. Datos comparativos

Tabla 3. Tabla de comparación con la norma vigente

| PARAMETRO | Unidad | Vr - 01 | Vr - 02 | Vr - 03 | Vr - 04 | Vr - 05 | D.S.003-2010-MINAM |
|-------------------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| pH | Und. de pH | 6,71 | 7,75 | 7,63 | 7,81 | 8,10 | 6,5-8,5 |
| Temperatura | °C | 21,0 | 18,0 | 19,3 | 21,2 | 22,0 | <35 |
| Solidos Totales suspendidos | mg/L | 145 | 73,0 | 36,0 | 6,00 | 11,0 | 150 |
| Coliformes fecales | NMP/100mL | 9,2x10 ³ | 9,2x10 ⁶ | 9,2x10 ⁶ | 9,2x10 ⁴ | 1,7x10 ⁶ | 10000 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 84 | 68 | 51 | 6,7 | 2,0 | 100 |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 265 | 190 | 151 | 57,2 | 29,6 | 200 |
| Aceites y grasas | mg/L | 10,8 | 8,44 | 8,64 | <0,25 | <0,25 | 20 |

Anexo N° 04.- Resultados de Laboratorio (Efluente PTAR tratado)



“CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE RESIDUALES DOMESTICAS O MUNICIPALES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA JURISDICCIÓN DE LA MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE ECHARATI, PROVINCIA LA CONVENCION, REGION CUSCO” – Oligo S.A.C

21

Tabla 6. Tabla de comparación con la norma vigente, aguas tratadas sistema de filtración en PTAR Pampa Concepción – Echarate – La Convención - Cusco

| Parámetro | Unidad | Valor | D.S. N° 003-MINAM-2010 |
|-------------------------------|-------------|-------|------------------------|
| pH | Unid. de pH | 8.26 | 6,5-8,5 |
| Temperatura | °C | 23.0 | <35 |
| Solidos Totales suspendidos | mg/L | 0 | 150 |
| Coliformes fecales | NMP/100mL | 0 | 10000 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | mg/L | 1.5 | 100 |
| Demanda química de oxígeno | mg/L | 2.0 | 200 |
| Aceites y grasas | mg/L | 0 | 20 |

9.3. Certificados de acreditación

