



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO-OXÍGENO MEDIANTE UN
PROCESO ELECTROQUÍMICO A PARTIR DE AGUA RESIDUAL
DEL VALLE DE MEZQUITAL, HIDALGO

TESIS

QUÉ PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTA:

LISSET DAYANIRA NERI PÉREZ

DIRECTOR:

DR. MARTIN DANIEL TREJO VALDEZ

CIUDAD DE MÉXICO A 12 DE NOVIEMBRE DE 2021





Folio

T-DEySA-004-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto

Autorización de tema

CDMX, 08 de febrero de 2021

Pasante

Lisset Dayanira Neri Pérez
PRESENTE

Boleta

2016320555

Programa Académico

I.Q.I.

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza al **Dr. Martín Daniel Trejo Valdez**, sea asesor en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

Obtención de hidrógeno-oxígeno mediante un proceso electroquímico a partir de agua residual del Valle de Mezquital, Hidalgo

Justificación

Resumen

Objetivos

- I. Generalidades.
 - II. Desarrollo experimental.
 - III. Análisis de resultados discusión.
- Conclusiones.
Referencias.
Anexos

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.

Dra. Laura Verónica Castro Sotelo
Presidenta de la Academia de
Fisicoquímica

Dr. Martín Daniel Trejo Valdez
Director

Ing. César Rodríguez Guerrero
Jefe del Departamento de Evaluación y Seguimiento
Académico.

M. en C. Isaura García Maldonado
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRG/mlcp



Folio
T-DEySA-004-21

Asunto
Autorización de Impresión

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

CDMX, a 29 de septiembre de 2021

Pasante
Lisset Dayanira Neri Pérez
PRESENTE

Boleta
2016320555

Programa Académico
I.Q.I.

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

"Obtención de hidrógeno-oxígeno mediante un proceso electroquímico a partir de agua residual del Valle de Mezquital, Hidalgo"

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente
JURADO



Dra. Laura Verónica Castro Sotelo
Presidenta



Dra. Carmen Magdalena Reza San German
Secretaría



Dr. Martin Daniel Trejo Valdez
Vocal 1



Dra. María Elena Manríquez Ramírez
Vocal 2



Dra. Miriam Estrada Flores
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRG/mlcp

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col, Zacatenco,
Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,
Conmutador 01 (55) 57296000 ext. 55104 www.esiqie.ipn.mx; www.ipn.mx



Folio
T-DEySA-004-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto
Cesión de derechos

CDMX, a 29 de septiembre de 2021

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

La que suscribe: **Lisset Dayanira Neri Pérez** estudiante del Programa de: **Ingeniería Química Industrial** con número de Boleta: **2016320555**, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor **Dr. Martín Daniel Trejo Valdez** cede los derechos del trabajo **"Obtención de hidrógeno-oxígeno mediante un proceso electroquímico a partir de agua residual del Valle de Mezquital, Hidalgo"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico dayanira_ld27@hotmail.com y mtrejo@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente



Lisset Dayanira Neri Pérez

Nombre y Firma
del estudiante



Martín Daniel Trejo Valdez

Nombre y Firma
del director

Lisset Dayanira Neri Perez

Tesis -Lisset Dayanira Neri Perez Rev1.docx

Resumen de fuentes

7%

SIMILITUD GENERAL

1	dcsh.izt.uam.mx INTERNET	<1%
2	revistas.uis.edu.co INTERNET	<1%
3	vsip.info INTERNET	<1%
4	www.milenio.com INTERNET	<1%
5	es.wikipedia.org INTERNET	<1%
6	1library.co INTERNET	<1%
7	politica.expansion.mx INTERNET	<1%
8	Fuente de preimpresión Alicia Pineda Santos. "Estudio del tratamiento de un agua con alto contenido en silicatos de zirconio mediante Microfiltración y Ultrafil... CONTENIDO DISPONIBLE EN CROSSREF	<1%
9	doku.pub INTERNET	<1%
10	www.elsoldehidalgo.com.mx INTERNET	<1%
11	www.jornada.unam.mx INTERNET	<1%
12	www.reduaeh.mx INTERNET	<1%
13	tesisenxarxa.net INTERNET	<1%
14	biblioteca.upaep.mx INTERNET	<1%
15	www.coursehero.com INTERNET	<1%
16	cia.uagraria.edu.ec INTERNET	<1%

17	www.cronica.com.mx	INTERNET	<1%
18	agradecimientos.org	INTERNET	<1%
19	lasventanaseventos.com.mx	INTERNET	<1%
20	repositorio.utn.ac.cr	INTERNET	<1%
21	promep.sep.gob.mx	INTERNET	<1%
22	documents.mx	INTERNET	<1%
23	edoc.pub	INTERNET	<1%
24	fisicamarthavillota.blogspot.com	INTERNET	<1%
25	www.datatur.sectur.gob.mx	INTERNET	<1%
26	www.surcosistemas.com.ar	INTERNET	<1%
27	repositorio.ucv.edu.pe	INTERNET	<1%

Se excluyeron los depósitos de búsqueda:

Ninguno

Excluido del Informe de Similitud:

Bibliografía

Citas textuales

Citas

Coincidencias menores (15 palabras o menos)

Se excluyeron las fuentes:

Ninguno

RECONOCIMIENTOS

AI INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL por permitirme formar parte de esta prestigiosa institución; por siempre LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA.

A mi alma mater la ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS por formarme profesionalmente y lograr cumplir mis sueños, además de enseñarme que el éxito se puede alcanzar.

AI LABORATORIO DE NANOMATERIALES Y ENERGÍA LIMPIA por haberme brindado su espacio, equipos e instrumentos para los diferentes análisis de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

MA. GUADALUPE PÉREZ JIMÉNEZ Y AGUSTÍN HUMBERTO NERI DONIS

Quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por apoyarme incondicionalmente en este camino, por la confianza que me han brindado, por motivarme en cada obstáculo de mi vida e impulsarme a seguir creciendo. El amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban por mi desarrollo profesional es simplemente único y se refleja en mis logros. Por estar dispuestos a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio. Gracias a quienes me inspiraron a llegar a donde he llegado a ustedes que son mis héroes.

A MIS HERMANOS

GIOVANY HUMBERTO NERI PÉREZ E ITZIAR NERI PÉREZ

Por siempre estar presentes en mi desarrollo, acompañarme en todo momento, por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de mi vida y mostrarme lo importante que es la educación.

A MIS SOBRINOS Y FAMILIA

Que por medio de su alegría me motivan a seguir adelante.

AL DR. MARTIN DANIEL TREJO VALDEZ

Por todo el apoyo, el tiempo que dedico a compartirme su conocimiento y guía en la elaboración de esta Tesis.

ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
JUSTIFICACIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	8
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	9
1.1. Contaminación por aguas residuales en el estado de Hidalgo.....	10
1.1.1. Zona de mayor contaminación.....	11
1.1.2. Aplicación del agua residual.....	15
1.1.3. Efectos de la contaminación por aguas residuales en el estado de Hidalgo.....	16
1.2. Energías renovables.....	17
1.3. Producción de Hidrógeno.....	19
1.3.2. Comparativo en la producción de Hidrógeno.....	21
1.4. Oxihidrógeno.....	22
1.5. Tratamiento de aguas residuales.....	22
1.5.1. Filtración.....	23
1.5.2. Diseño de un filtro.....	24
1.6. Normatividad aplicada en el análisis de aguas residuales.....	25
1.7. Electrólisis.....	26
CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	27
2.1. Filtro de gravedad.....	28
2.1.1. Materiales.....	28
2.1.2. Diseño.....	29
2.2.3. Construcción del prototipo de filtro.....	32
2.2. Celda electrolítica.....	33
2.2.1. Diseño de prototipo de la celda electrolítica.....	35
2.3. Integración de filtro de gravedad con la celda electrolítica.....	37
2.4. Toma de muestra.....	40
CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	42
3.1. Análisis Físicoquímico.....	43
3.2. Cuantificación de metales.....	46
3.3. Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno.....	49
3.4. Costos.....	51
CONCLUSIONES.....	52
PERSPECTIVAS.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
ANEXOS.....	58
I. TOMA DE MUESTRA.....	58
II. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO.....	59
II.1. Conductividad.....	59
II.2. Resistencia.....	60

II.3	Potencial de hidrógeno.....	62
II.4.	Sólidos totales disueltos.....	63
II.5	Salinidad.....	64
III.	CUANTIFICACIÓN DE METALES.....	65
III.1.	Polarografía diferencial de pulsos.....	65
III.2.	Absorción atómica.....	67
IV.	PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA GASEOSA HIDRÓGENO- OXÍGENO.....	71
IV.1.	Recolección de gases sobre agua.....	71
V.	COSTOS.....	73
V.1	Comparativa de GIMFI con equipos en el mercado	73
V.2	Costo energético en la producción.....	76
VI.	GLOSARIO.....	77
VII.	RELACIÓN DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	78
VIII.	RECONOCIMIENTOS OTORGADOS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.	
Figura 1	Estado de Hidalgo.....	10
Figura 2	Regiones geoculturales del estado de Hidalgo.....	12
Figura 3	Ubicación de los distritos de riego en México.....	12
Figura 4	Ubicación de los distritos de riego pertenecientes al organismo de cuenca número XIII Valle del Mezquital.	13
Figura 5	Mapa de sistema de riego en Ixmiquilpan, Hidalgo.....	14
Figura 6	Mapa de sistema de riego de Tetepango, Hidalgo.....	14
Figura 7	Mapa de sistema de riego de Tula, Hidalgo.	15
Figura 8	Sistema de almacenamiento de energía según capacidad y tiempo de descarga.....	18
Figura 9	Clasificación de los principales métodos de obtención de Hidrógeno.....	20
Figura 10	Lecho de filtros de partículas sólidas.	24
Figura 11	Diseño del prototipo de filtración por gravedad.....	31
Figura 12	Prototipo de filtración	33
Figura 13	Tipo de arreglo en celda electrolítica.....	34
Figura 14	Diseño de placa soporte.....	35
Figura 15	Diseño de placa neutra.....	35
Figura 16	Diseño de placa catiónica/aniónica.....	36
Figura 17	Prototipo de celda Electrolítica	37
Figura 18	Diseño del sistema para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno.....	38
Figura 19	Prototipo de sistema para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno.....	39
Figura 20	Zona de muestreo en el Valle del Mezquital.....	40
Figura 21	Canal ubicada en la carretera Ajacuba- Tetepango Km 28.....	41
Figura 22	Canal ubicado en Atitalaquia, Hgo.....	41
Figura 23	Canal ubicado en Tlahuelilpan, Hgo.	41

Figura 24	Canal ubicado en Mixquiahuala de Juárez ,Hgo.	41
Figura 25	Análisis de conductividad de muestras de agua	43
Figura 26	Análisis de resistividad	44
Figura 27	Análisis del potencial de Hidrógeno.....	44
Figura 28	Análisis de sólidos totales disueltos.....	45
Figura 29	Análisis de Salinidad.....	46
Figura 30	Análisis de Cadmio.....	47
Figura 31	Análisis de Plomo.....	47
Figura 32	Análisis de Cadmio en Atitalaquia.....	48
Figura 33	Análisis de Cadmio en Atitalaquia.....	48
Figura 34	Análisis de cobre por Espectroscopia de Absorción Atómica. Con fines de comparación, se presenta el dato de riego agrícola.....	49
Figura 35	Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a 15 A y 30 V.....	50
Figura 36	Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a 15 A y diferente voltaje	50
Figura 37	Producción de la mezcla Hidrogeno-Oxígeno para las muestras de Atitalaquia y el Rio de Tezontepec filtradas por GIMFI a 15 A y diferente voltaje	51
Figura 38	Comparativo de costos en el mercado y GIMFI.....	51
Figura 39	Costo energético para una producción de 100 cm ³ /s de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno.....	52
Figura 40	Curva de calibración de Cu.....	70
Figura 41	Recolección de gases sobre agua.....	72
Figura 42	Generador de Hidrogeno de alta pureza.....	74
Figura 43	Hofftam electrolisis.....	74
Figura 44	Kit Hidrógeno Celda Seca 29 placas.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Enfermedades del estado de Hidalgo.....	17
Tabla 2	Comparativo entre los procesos de producción de Hidrógeno.....	21
Tabla 3	Métodos y su respectivo tratamiento de aguas residuales.....	23
Tabla 4	Materiales del prototipo de filtro por gravedad.....	28
Tabla 5	Primer ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.....	30
Tabla 6	Segundo ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.....	30
Tabla 7	Tercer ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.....	30
Tabla 8	Especificación de la granulometría en el prototipo de filtración por gravedad.....	31
Tabla 9	Capacidad volumétrica del prototipo de filtro.....	32
Tabla 10	Comparación entre arreglo monopolar y bipolar para celda electrolítica.....	34
Tabla 11	Material empleado en la celda electrolítica.....	36
Tabla 12	Material para el sistema de obtención Hidrógeno-Oxígeno.....	38
Tabla 13	Absorbancia promedio para cada estándar.....	70

Tabla 14	Límites permisibles de metales pesados de acuerdo con la NOM-001-SEMARNATA-1996.....	71
Tabla 15	Costos Filtro GIMFI.....	75
Tabla 16	Costos Celda GIMFI.....	75
Tabla 17	Costos sistema de acoplamiento GIMFI.....	75
Tabla 18	Costo final de GIMFI.....	76
Tabla 19	Costo energético para diferentes muestras a una misma producción.....	76

RESUMEN

La presente tesis muestra un sistema para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno mediante el empleo de aguas residuales. Primero se presenta la investigación documental de la contaminación por agua residual en el estado de Hidalgo; a través del cual se seleccionó al Valle del Mezquital, Hidalgo; por presentar los índices más altos de contaminación.

Después se muestra el diseño, material y elaboración de dos prototipos; un filtro de gravedad y una celda electrolítica que en conjunto forman un sistema, el cual permite la generación de la mezcla gaseosa Hidrógeno-Oxígeno.

Posteriormente se muestran los análisis fisicoquímicos y de metales de aguas residuales y su correspondiente agua obtenida por el prototipo de filtro; de los cinco canales que conforman el Valle del Mezquital. Con los resultados obtenidos se presenta la hipótesis de que mediante el prototipo de filtro se genera agua óptima para el proceso de electrólisis. La cual se comprobó mediante el análisis de la producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno, al comparar el agua más contaminada de la zona del Valle del Mezquital con diferentes tipos de agua.

Finalmente se presenta una comparación económica del costo de los prototipos y el costo energético para una determinada producción de la mezcla gaseosa Hidrógeno-Oxígeno.

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presentan los fundamentos, experimentación básica y los resultados adquiridos de la obtención de mezcla de oxígeno e hidrógeno a partir de electrólisis de efluentes de agua residual recolectados en la zona del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo.

El capítulo uno trata de las generalidades de la tesis. Se presenta información documental que muestra los niveles de contaminación que tienen algunos efluentes de agua en el estado de Hidalgo. Se menciona de forma particular, la zona de mayor contaminación en el estado, que es el Valle del Mezquital, de donde se recolectaron muestras de agua residual para su análisis fisicoquímico, como es el contenido de metales pesados. En los distritos de riego que rigen esta zona se encuentran las aguas residuales del sector primario que afectan la salud de la población y que podrían usarse como fuente para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno. Se describe de forma general el método de filtración de agua residual y los factores que influyen en el proceso. Se menciona la normatividad que se aplica en el análisis de contenido de metales pesados en aguas residuales. Se presentan los fundamentos de electrólisis alcalina del agua y se describen algunas particularidades que afectan de manera directa este proceso como es el diseño de las celdas electrolíticas.

El capítulo dos describe la construcción del prototipo usado en esta tesis para filtrar agua residual. También se muestra el diseño, materiales y construcción del prototipo de electrolizador para producir la mezcla Hidrógeno-Oxígeno aprovechando las aguas residuales filtradas.

En el capítulo tres se presentan los resultados del análisis de contenido de metales pesados realizados a las muestras de agua residual y sus filtrados. Se caracterizaron también otros parámetros como pH, conductividad, salinidad, resistencia óhmica y sólidos totales. Se muestran resultados de producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a la salida del electrolizador, prototipo alimentado con el agua residual filtrada. Se discuten cuáles son las condiciones óptimas de voltaje y corriente con que debe operarse el electrolizador para la obtención del volumen máximo de mezcla Hidrógeno-Oxígeno.

Finalmente, se presentan las conclusiones y perspectivas del presente trabajo de tesis.

JUSTIFICACIÓN

La presente tesis se enfoca en el estudio de aguas residuales del Valle de Mezquital en Hidalgo para la generación del combustible renovable Hidrógeno-Oxígeno. Actualmente, una de las problemáticas de mayor importancia en el mundo es el incremento de contaminación ambiental, siendo el agua residual uno de los factores más importantes por discutir y resolver. México está clasificado entre los 20 países con mayor índice de contaminación con una enorme generación de aguas residuales a las que se les da un tratamiento mínimo o nulo, de acuerdo al informe de Medio Ambiente emitido por la SEMARNAT en 2017. En particular, la Ciudad de México es la mayor productora de aguas residuales del país y envía una gran parte de sus desechos al estado de Hidalgo. Esto ha afectado principalmente a la Zona del Valle del Mezquital, la cual a su vez utiliza las aguas residuales para la producción agrícola sin darle un tratamiento previo y ocasionando que se tenga un incremento en enfermedades y muertes por infecciones intestinales principalmente en niños menores de 6 años. Por ello el presente trabajo se enfoca en proponer una mejora a la problemática de esta zona reduciendo estos niveles de contaminación por medio del aprovechamiento de estos efluentes usando un sistema que permita obtener combustible limpio. Los sistemas de estudio son dos prototipos; un filtro de gravedad y un electrolizador. Con el filtro se obtiene el agua filtrada que alimenta al electrolizador; ambos prototipos construidos con materiales de bajo costo.

OBJETIVOS

Objetivos General:

Proponer, diseñar y construir un sistema que permita reutilizar el agua residual obtenida de efluentes del Valle de Mezquital, Hidalgo; para obtener combustible renovable Hidrógeno-Oxígeno por medio de electrólisis alcalina.

Objetivos Particulares:

- Identificar las localidades del Valle del Mezquital, Hidalgo, que presenten mayor contaminación de efluentes y acudir a tomar muestras de agua residual para su posterior análisis químico y reutilización en procesos electrolíticos.
- Diseñar un sistema de filtración por gravedad para las muestras de agua residual y elegir para su construcción solamente material de bajo costo que sean reutilizables y tengan un mínimo impacto en el deterioro medioambiental.
- Construir el electrolizador prototipo usando materiales reciclados para realizar el estudio correspondiente de parámetros potencial-corriente de la producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

En el capítulo uno se presenta información documental que muestra los niveles de contaminación que tienen algunos efluentes de agua en el estado de Hidalgo, especificando los canales de riego que rigen el Valle del Mezquital (la zona de mayor contaminación del estado). Se puntualiza al hidrógeno como fuente de combustible renovable. Describe de forma general el método de filtración de agua residual y los factores que influyen en el proceso. Se menciona la normatividad que se aplica en el análisis fisicoquímico así como del contenido de metales pesados en aguas residuales y se presentan los fundamentos de la electrolisis alcalina del agua.

1.1. Contaminación por agua residual en el estado de Hidalgo

El estado de Hidalgo se ubica en la zona centro de los Estados Unidos Mexicanos ubicado a una longitud 99°51'34.2"W a 97°59'5.64"W y una Latitud 19°35'52.08"N a 21°23'54.6"N; limita al norte con San Luis Potosí, al noreste con Veracruz, al sureste con Puebla, al sur con Tlaxcala así como el Estado de México, y al oeste con Querétaro como se muestra en la Figura 1; el estado cuenta con 84 municipios dividido en 10 zonas geográficas: la Huasteca, la Sierra Gorda, la Sierra Alta, la Sierra Baja, la Comarca Minera, la Sierra de Tenango, el Valle de Tulancingo, la Cuenca de México, la Altiplanicie Pulquera y el Valle del Mezquital siendo este el de mayor extensión territorial del estado. Actualmente tiene una población de 2 862 970 de personas, de las cuales un 62.6% se dedican a actividades terciarias, el 33.3% actividades secundarias y solo el 4.1% a actividades primarias; lo que genera una aportación económica del 1.68% del producto interno bruto al país [1,2].



Figura 1. Estado de Hidalgo [1].

Desde hace más de una década se ha caracterizado por presentar altos índices de contaminación por aguas residuales, lo cual ha sido informado a través de diversos medios de comunicación. Por ejemplo, una noticia de 2006 dio un gran impacto al informar el índice de contaminación y enfermedades que ocasiona el uso de aguas residuales en el que se describía: *“Los padecimientos asociados al consumo y exposición de aguas residuales han ubicado a la entidad en el noveno lugar nacional con el mayor número de muertes por enfermedades diarreicas en menores de cinco años de edad, lo que en cifras representa que, al año, un promedio de 50 niñas y niños fallecen por esta causa y convierten el caso en situación de alarma”* (Proceso Noticias 2006). Además se dio a conocer que: *“El estado de Hidalgo es la entidad receptora de los mayores volúmenes de aguas residuales en todo el mundo y al mismo tiempo, es la que menor cantidad de líquido limpio a nivel nacional, a pesar de que cuenta con ocho plantas municipales de tratamiento”* (Televisa Noticias 2019) [3].

A lo largo de los últimos años siguen surgiendo noticias de las problemáticas que presenta el estado de Hidalgo por el uso de aguas residuales sin previos tratamientos, entre los cuales se ha informado que los principales precursores de contaminantes son; la refinera de Petróleos Mexicanos (PEMEX), cuatro cementeras, tres caleras y la presa Endhó, que recibe las aguas residuales de la Ciudad de México y se encuentra en situación deplorable con altos niveles de Mercurio, Arsénico, Plomo, Bario y otros, que generan enfermedades en los pobladores. Esta problemática afecta principalmente la salud de los pobladores de Hidalgo, debido a la presencia de metales pesados que llegan a contaminar las zonas. Ejemplo de ello se dio a conocer por milenio noticias, la cual informo que las aguas residuales que se generan en el Valle de México se conducen a través del drenaje profundo hasta el río Tula y se transportan a cielo abierto a la presa Endhó, localizada en el municipio de Tepetitlán; sin ningún tratamiento se utilizan para riego agrícola en más de 80 mil hectáreas de cultivos. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud en esa zona, los casos de gastroenteritis, influenza y amibiasis son muy superiores a los promedios nacionales; así como los casos de malformaciones congénitas y casos de cáncer [4,5].

A pesar de que se están implementando diferentes métodos para reducir la contaminación de aguas, el desarrollo se está llevando a cabo de manera pausada; puesto que el tratamiento para las aguas residuales apenas presenta un porcentaje menor al 10% de la captación que recibe. Hidalgo es la entidad con menos plantas de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con un informe de la Comisión Nacional del Agua, tiene una cobertura de tratamiento del 7.9% del agua desechada por la comunidad [6].

1.1.1. Zona de mayor contaminación

De las diez regiones geoculturales con las que cuenta el estado de Hidalgo, el Valle del Mezquital es la que presenta mayor contaminación, se encuentra conformada por 28 municipios: Actopan, Ajacuba, Alfacayucan, El Arenal, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Cardonal, Chapantongo, Chilcuautla, Francisco I. Madero, Huichapan, Ixmiquilpan, Mixquiahuala de Juárez, Nicolás Flores, Nopala de Villagrán, Progreso de Obregón, San Agustín Tlaxiaca, San Salvador, Santiago de Anaya, Tasquillo, Tecozautla, Tepeji del Rio de Ocampo, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, y Tula de Allende. La cual presenta la mayor extensión territorial como se muestra en la Figura 2, además cuenta con 495,000 habitantes que se dedican principalmente a actividades

agrícolas, así como la producción del pulque, esta zona presenta un clima que en promedio es seco semi-cálido [7].

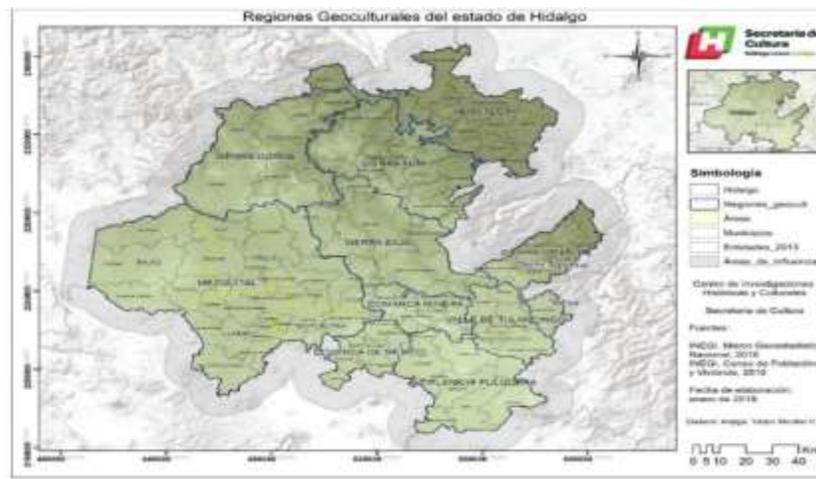


Figura 2. Regiones geoculturales del estado de Hidalgo [2].

El uso de aguas residuales data de finales de 1856 con la construcción del Gran Canal de Desagüe, cuya función fue colectar las aguas generadas por producción pluvial en el Valle de México hacia el Valle del Mezquital, ubicado en el organismo de cuenca número XIII Valle de México como se observa en la Figura 3, de igual forma se puede distinguir que México cuenta con trece distritos de riego en todo su territorio. Siendo la de mayor producción la zona centro y escasamente dos distritos de riego para la zona sur, esta distribución se ve afectada por factores como el clima, tipo de suelo y actividad agrícola. Actualmente el organismo XIII que pertenece al estado de Hidalgo cuenta con una superficie agrícola de siembra de 84 586 m² que ha generado una producción de 3 984.40 toneladas de materia prima con un valor de producción de 1 795. 20 millones de pesos [8].



Figura 3. Ubicación de los distritos de riego en México [8].

El organismo de cuenca número XIII denominado Valle de México cuenta con la ubicación de los distritos DR003 Tula, el primero en crearse en el año de 1904; el distrito DR100 Alfacayucan y el distrito DR112 Ajacuba como se muestra en la Figura 4. Estos distritos de riego se caracterizan por la transformación de áreas de cultivo temporal en áreas de riego continuo mediante distribución de canales de riego para irrigar los cultivos [8,9].

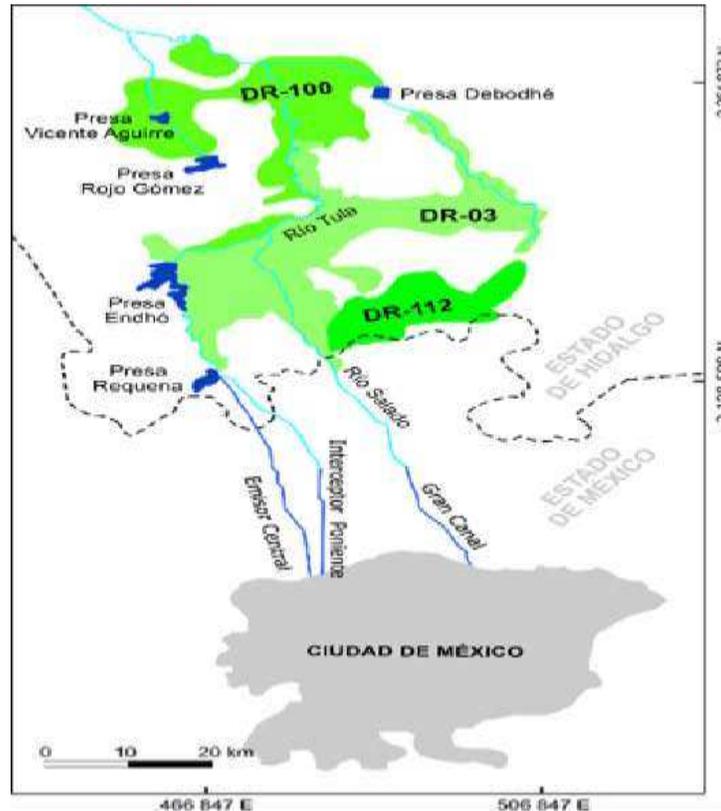


Figura 4. Ubicación de los distritos de riego pertenecientes al organismo de cuenca número XIII Valle del Mezquital [9].

Los canales de riego permitieron a los pobladores el desarrollo de la agricultura, representado por tres sistemas de riego; el primero formado por jagüeyes y las presas de Ixmiquilpan, cuya función es distribuir a las tierras más fértiles ubicadas en la zona sur de Ixmiquilpan Figura 5. El segundo es el sistema de riego de Tetepango que se muestra en la Figura 6, el cual beneficia la producción agrícola a los municipios de Tlaxcoapan, Atitalaquia y Tlahuelilpan. Por último está el sistema de riego de Tula que se aprecia en la Figura 7, donde se encuentra la presa Endhó. La infraestructura hidráulica presenta canales abiertos construidos de concreto cuyo objetivo es abastecer la zona del Valle del Mezquital para la mejora de economía de esta región; sin embargo, a lo largo de los años han contaminado ríos, presas y jagüeyes de agua limpia [10].

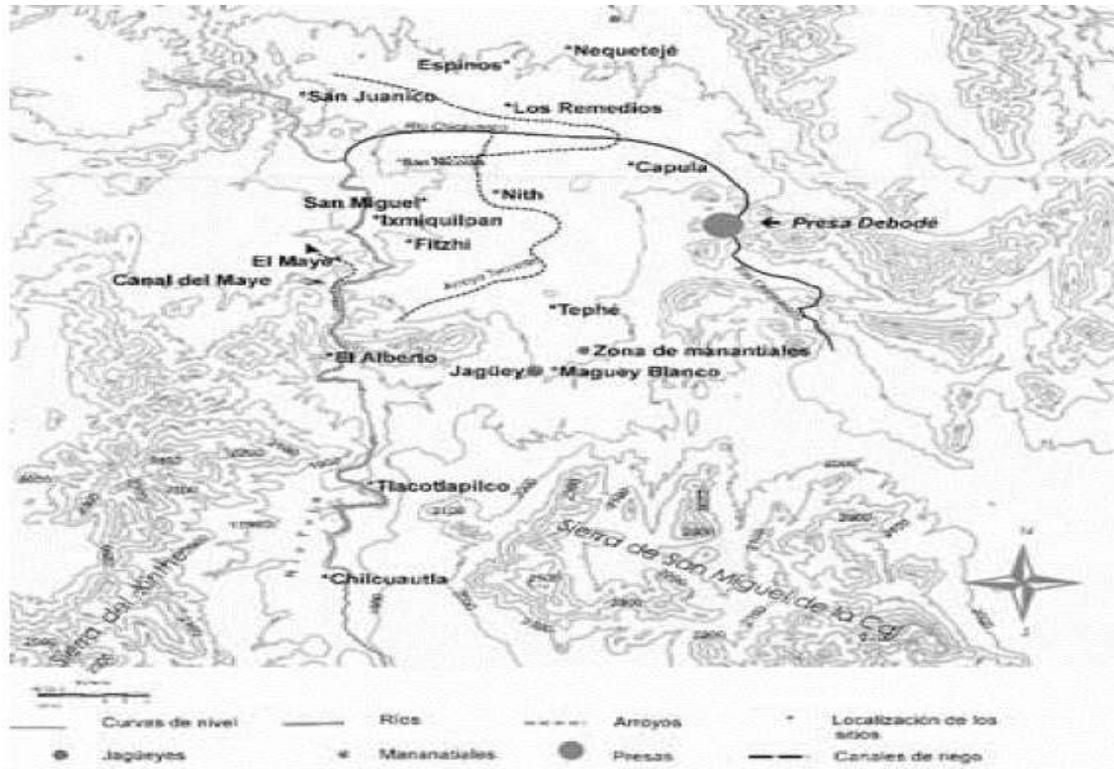


Figura 5. Mapa de sistema de riego en Ixmiquilpan, Hidalgo [10].



Figura 6. Mapa de sistema de riego de Tetepango, Hidalgo [10].

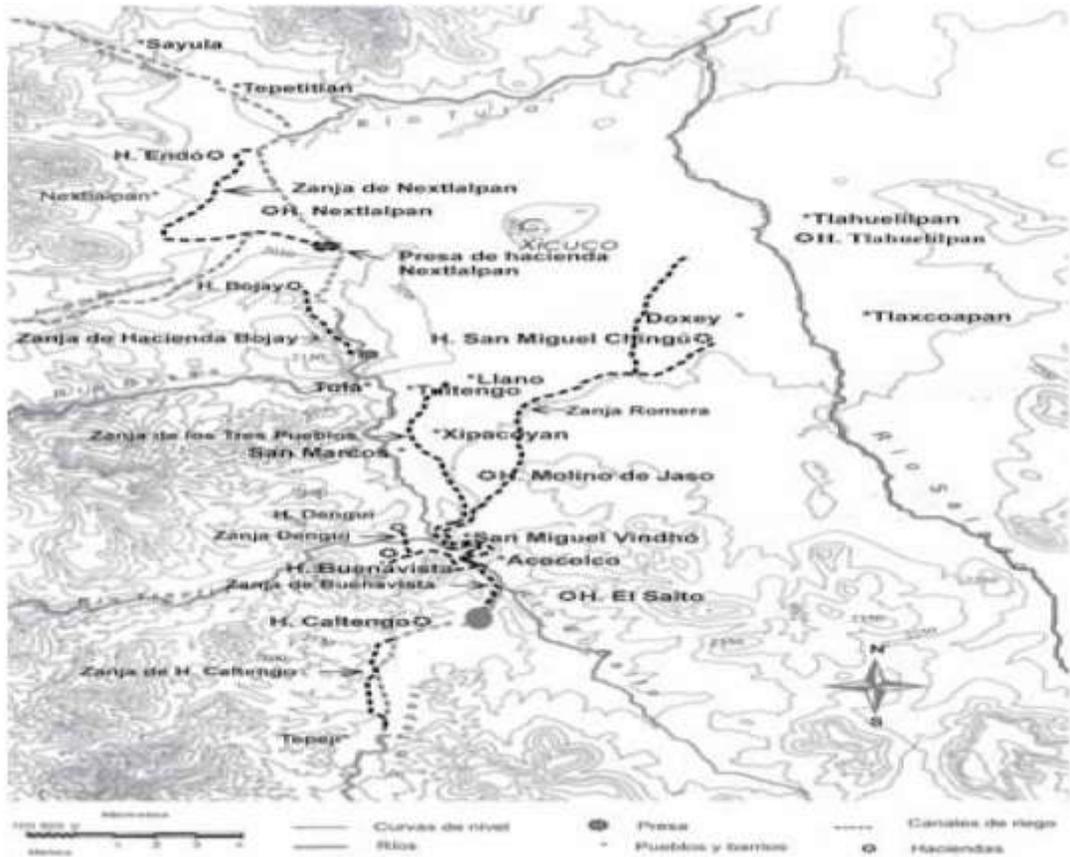


Figura 7. Mapa de sistema de riego de Tula, Hidalgo [10].

1.1.2. Aplicación del agua residual

El valle del mezquital se caracteriza por ser una de las mayores zonas de la república que es productora de hortalizas; sus cultivos son el frijol, lechuga, col, espinaca, zanahoria, betabel, trigo, avena, alfalfa, maíz, entre otros vegetales; teniendo un periodo de producción de tres a cinco meses dependiendo la cosecha de vegetal o forraje. Para lo cual se emplean aguas residuales sin pretratamiento; de las 46 mil 480 unidades agrícolas con superficie de riego en el estado; el sesenta por ciento usan aguas negras en los cultivos; 39 por ciento aguas blancas (de pozos y lluvias) y sólo el uno por ciento aguas residuales tratadas, de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. El empleo de aguas residuales se vio por la necesidad que tuvieron los pobladores para la producción agrícola, debido al clima que presenta esta región, la escasez de agua en la zona y los suelos no son aptos para la producción agrícola de temporal [7].

Entre las características que beneficia el uso de agua residual es la mejora de la calidad del suelo por su carga de nutrientes químicos como: Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, B, P y N entre otros, lo que permite aumentar la productividad, pero también contienen elementos tóxicos como: Cd, Hg, Pb. Lo que afecta el rendimiento a largo plazo como se dio a conocer por el estudio de Evaluación de Aguas Residuales de la Ciudad de México utilizadas para Riego, de los investigadores Ronald Ontiveros y Lamine Diakite, en que se estable que la disminución del tonelaje de producción es a causa de la salinidad y contaminación en las tierras, ocasionado por las aguas residuales provenientes de procesos industriales; ocasionada por la generación de metales pesados. Por este motivo La Organización Mundial de la Salud recomienda tener un reporte de tasa de 1,5 m³ de agua de riego por 1 m² de área de terreno en un año, para el tipo de clima semiárido. Debido a que las aguas residuales tratadas pueden suministrar 225 kg de nitrógeno y 45 kg de fósforo por hectárea en un año, reduciendo o eliminando las necesidades de fertilización complementaria, pero el uso desmedido de aguas residuales a largo plazo ocasiona daños irreversibles en el suelo, convirtiéndolos en suelos infértiles [10, 7].

1.1.3. Efectos de la contaminación por agua residual en el estado de Hidalgo

La excesiva acumulación de contaminantes, como son los metales pesados en los suelos, conlleva una elevada absorción de metales pesados en los cultivos, por lo tanto afecta la seguridad y calidad de los alimentos. El consumo de los alimentos contaminados por metales pesados puede provocar la ingesta de sustancias tóxicas en el cuerpo humano, la cual no se manifiesten inmediatamente, pero si en varios años dependiendo de la exposición. Esto se ve reflejado en las enfermedades presentes en los pobladores del estado de Hidalgo como se muestra en la Tabla 1, que muestra las diez enfermedades con mayores índices, donde se puede apreciar las infecciones intestinales, así como amebiasis intestinal que generalmente son ocasionadas por parásitos presentes en los alimentos. Además de las enfermedades que ocasiona a los pobladores, el uso de aguas residuales limita la producción agrícola por la disminución de precipitaciones, así como el deterioro y pobreza de los suelos [11].

Tabla 1. Enfermedades del estado de Hidalgo [11].

NUMERO DE PERSONAS/ ENFERMEDADES	TOTAL	IMSS	ISSSTE	PEMEX	IMSS-PROSPERA	SSA A/	DIF	RESTO DE LAS INSTITUCIONES
Infecciones respiratorias agudas	780,223	129,027	41,785	12,509	103,573	472,086	16,303	4,940
Infección de vías urinarias	118,842	25,933	9,058	1,786	16,971	63,847	954	293
Infecciones intestinales por organismos y las mal definidas	81,135	18,894	8,477	1,583	6,616	41,888	2,767	910
Gingivitis y enfermedad periodontal	53,111	5,886	1,319	379	7,156	38 207	0	164
Úlceras, gastritis y deudentis	52,258	8,087	3,891	271	6,948	32 957	0	104
Conjuntivitis	33,757	8,912	2,174	748	3,434	18 489	0	0
Vulvovaginitis	30,798	284	1,055	171	9,444	19 775	0	69
Otitis media aguda	19,567	103	1,234	112	2,967	14,659	444	48
Obesidad	16,541	7,526	1,730	118	2,285	4,651	0	231
Amebiasis intestinal	10,410	1,326	828	43	1,595	6,565	0	53

1.2. Energía renovable

La energía es toda causa capaz de producir un trabajo, el principio general establece que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma; la clasificación de la energía se basa en dos tipos; la primera es la energía externa o macroscópica la cual es debida a la masa, velocidad y posición dentro del sistema de referencia y sus dos formas son la energía potencial y la energía cinética. La segunda clasificación es la energía interna o microscópica, que radica en la estructura de átomos y moléculas entre la cuales se clasifican en la energía mecánica interna, la energía química, la energía térmica, la energía másica, la energía eléctrica y la energía luminosa. Los diferentes tipos de energía pueden dar conversión a otra energía diferente mediante diferentes procesos o dispositivos debido a que la energía permanece constante y solo cambia de forma; un ejemplo de ello es la energía térmica que mediante una reacción endotérmica se convierte en energía química. [12].

Hoy en día se está implementando la aplicación de energías renovables para un desarrollo sustentable, porque permite menor inversión de aplicación y menor bagaje tecnológico para un generar un mayor crecimiento económico. Este tipo de energía hace referencia a aquella que

permita su renovación continuamente y por lo tanto su utilización sea ilimitada. Entre las cuales se encuentran la energía solar, la biomasa, la energía eólica, la energía hidráulica y el uso de los combustibles renovables e hidrógeno. La aplicación de ellas da como resultado un factor importante, que es la implementación de combustibles limpios renovables, lo cual permite disminuir los índices de contaminación que afecta la población del entorno, generada por los gases de efecto invernadero, la calidad del agua y la degradación del suelo [13].

1.3. Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento químico formado únicamente por un electrón y un protón, en su forma natural se presenta como un gas incoloro e inodoro, se encuentra presente en grandes cantidades tanto en la Tierra como en el Universo, además su principal característica es su alto grado de inflamabilidad. El hidrógeno es un claro elemento que puede ser utilizado como vector energético alternativo, porque en su combustión solo cambia de estado liberándose en forma de agua sin emitir ninguna otra emisión; al contrario de los hidrocarburos que no pueden ser destruidos. Lo que genera una opción a largo plazo para disminuir los índices de contaminantes ambientales, además, el hidrógeno utilizado como energético químico presenta una viabilidad para almacenamiento a largo plazo, así como el balance estacional de las fuentes de energía renovables como se puede observar en la Figura 8 [14].

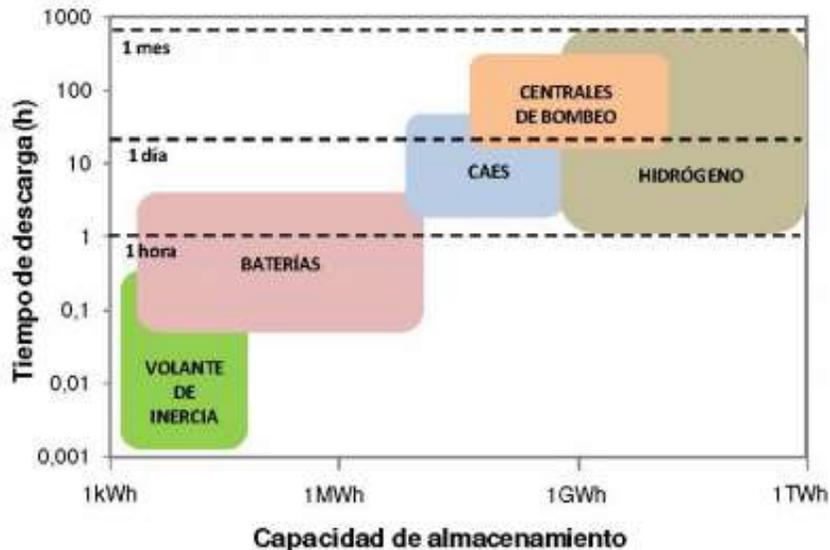


Figura 8. Sistema de almacenamiento de energía según capacidad y tiempo de descarga [14].

La tecnología del hidrogeno se encuentra desarrollada en países de primer mundo, como Alemania y Reino Unido que cuenta con una red pública de gas, además, la Unión Europea entre España-Francia tiene una perspectiva de contar con más de 20 estaciones de servicio de hidrogeno denominado corredor Burgos. Pero para América Latina esta visión no es similar dado que solo Argentina cuenta con estaciones de carga vehicular llamadas Hidrogeneras. En el caso de México la infraestructura del hidrogeno se encuentra en fases de investigación, de acuerdo a la el TRL (Technology Readiness Level) utilizado por la NASA. Mientras que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) pretende el desarrollo tecnológico mediante programas de incentivación a la innovación, aunque actualmente, solo se cuenta con algunas empresas con tecnología energética basada en el hidrogeno, como lo es la Einnovación S.A. de C.V. que en vinculación con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDETEQ) y el Centro de Tecnología Avanzada unidad Querétaro (CIATEQ), implementó un prototipo de electrólisis avanzada de primera generación denominado Tritón 50 (T50) para aplicaciones industriales [15].

1.3.1 Producción del hidrógeno

La producción del hidrógeno se deriva principalmente de la utilización de combustibles fósiles aunque también puede realizarse con otras materias primas como el agua, biomasa o recursos fósiles. Actualmente existen un gran número de técnicas para la producción de hidrogeno los cuales se diferencian por la tecnología aplicada, diseño del proceso y materia prima empleada; esta última es un factor importante debido a que a día de hoy el 96% del hidrogeno producido requiere como fuente primaria la combustión de fósiles, lo que representando el 95% de la producción en torno a 65 millones de toneladas anuales. A continuación, se describen los métodos para la producción de hidrogeno en la Figura 9, entre los cuales se encuentran los procesos de reformado, oxidación parcial gasificación y electrolisis. Enfocándose a una nueva aplicación de energías renovables, lo que ha promovido la aplicación de electrolisis alcalina; cuyo fundamento se explica posteriormente debido a que este tipo de tecnología es la más desarrollada hasta la fecha de todas las tecnologías de producción vía electrolítica, a pesar de que solo representa una producción de hidrogeno en el mercado del uno al dos por ciento [16].

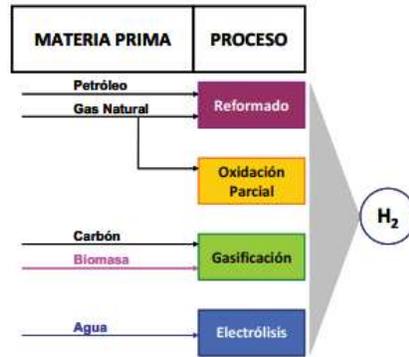


Figura 9. Clasificación de los principales métodos de obtención de Hidrógeno [16].

A continuación, se describen los principales métodos de producción de hidrógeno descritos en la Figura 9.

Reformado con vapor. Es similar al proceso de reformado de orgánicos como metanol y se basa en el esquema de Steam Methane Reforming. Entre sus condiciones de operación se encuentra el uso de altas temperaturas y aplicación de catalizadores que bajen u optimicen esta temperatura de operación (ejemplo Cu, Ni, Pd y Pt). Los gases resultantes del reformado tienen un poder calorífico de un 8% mayor que el del metanol puro, lo que supone una mejor eficiencia del reactor [16, 17].

Oxidación Parcial. Consiste en una reacción exotérmica, en la que un combustible reacciona con una cantidad de oxígeno inferior a la necesaria, para que se produzca una oxidación incompleta del mismo obteniendo así el hidrógeno. Las condiciones de operación para este proceso son temperaturas de 1300-1500°C a una presión entre 30 y 100 bar para evitar el uso de catalizadores. La desventaja que tiene esta técnica son los costos de inversión elevados, mientras que la ventaja es menor grado de desarrollo tecnológico [16, 17].

Gasificación. Puede aplicarse tanto a biomasa como a carbón; a partir de la biomasa se puede obtener hidrógeno mediante gasificación pirolisis o metanización. En estos procesos se generan gases ricos en metano, a partir de los que se obtiene hidrógeno mediante Steam Methane Reforming. Se puede conseguir metanol a partir de la materia orgánica y utilizar como precursor del hidrógeno; para el caso del carbón el problema es que se trata de reacciones muy endotérmicas. La desventaja de esta técnica es que aún no se han implementado para la escala comercial [16, 17].

Electrólisis. Es la separación de la molécula del agua a través de un suministro de energía, el proceso cuenta con dos electrodos uno funciona como cátodo mientras que el otro como ánodo y la separación se va efectuando por la afinidad de cargas contraria hacia los electrodos. Actualmente

se utiliza para la producción de hidrógeno y oxígeno a una muy alta concentración. La electrólisis se puede efectuar de dos formas, las cuales se describen a continuación.

Electrólisis alcalina. En el ánodo se genera oxígeno y en el cátodo hidrógeno que se mantienen separados por una membrana permeable a los iones la cual mantiene el equilibrio de cargas, se realiza a presión atmosférica, a temperatura ambiente o con elevada temperatura; es un proceso fiable porque representa eficiencias del 70% generalmente se inicia con una corriente de 1.5 V seguidas en un medio electrolítico.

Electrólisis PEM (Proton Exchange Membrane). Emplea una membrana de intercambio protónico como electrolítico sólido. Es aplicada para pequeñas producciones, debido a sus costos elevados por el catalizador y la membrana protónica además presentan menor eficiencia [16, 17].

1.3.2. Comparativo de la producción de Hidrógeno.

Los procesos de producción de hidrógeno presentan ventajas e inconvenientes, así como características únicas para cada método de producción y aplicación. Como se muestra en la Tabla 2, las diferentes ventajas y desventajas con el fin de identificar cual proceso se enfoca más en el desarrollo sostenible con la implementación de energías renovables.

Tabla 2. Comparativo entre los procesos de producción de Hidrógeno [16].

<i>Proceso</i>	<i>Ventaja</i>	<i>Inconvenientes</i>
<i>Reformado con vapor</i>	Elevada eficiencia Perfectamente desarrollado a gran escala Hidrógeno a bajo costo	Emisiones de CO ₂ Gran infraestructura Unidades a pequeña escala No comerciales
<i>Oxidación parcial</i>	Tecnología utilizada muy avanzada	Emisiones de CO ₂ Gran infraestructura Elevados costos de inversión
<i>Gasificación</i>	Tecnología muy desarrollada Abundancia y bajo costo de materia prima	Grandes emisiones de CO ₂ Gran infraestructura Eficiencia baja
<i>Electrólisis del agua</i>	Emisiones de CO ₂ nulas Tecnologías testada Hidrógeno de gran pureza	Elevados costos energéticos

De acuerdo con la Tabla 2, la electrólisis del agua es el proceso medioambiental más favorable a pesar de sus inconvenientes en cuantos a costos energéticos elevados. Actualmente el sistema de almacenamiento de hidrógeno más aplicable consiste en la implementación de energía solar térmica a muy alta concentración, con el fin de descomponer la molécula del agua y de esta forma almacenar hidrógeno. Mediante el proceso fotovoltaico se puede aplicar un proceso de electrólisis, el cual no modifica el comportamiento del combustible; sigue liberando energía en su proceso de oxidación ya sea mediante la combustión o en las celdas de combustible, lo que contribuye a una base de desarrollo tecnológico. A pesar de presentar un reto en el predominio del sistema tradicional con el desplazamiento de los combustibles fósiles.

1.4. Oxihidrógeno

El gas hidroxígeno u oxihidrógeno es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en una relación molar 2:1. Su método de obtención es mediante el proceso de electrólisis del agua, consiste en la descomposición de la molécula del agua (H_2O), en oxígeno (O_2) e hidrógeno ($2H_2$), mediante la circulación de una corriente eléctrica en el agua. Para optimizar la producción del gas hidroxígeno es necesario modificar el pH del agua mediante un ácido o base.

Su proceso de combustión produce agua y 142.35 kJ de calor por cada gramo de hidrógeno. Dentro de sus propiedades se destacan su energía mínima de ignición, la cual está alrededor de los 0.02 mJ, y su inflamabilidad en condiciones de temperatura de 298 °K y presión de 1 atm en aire seco va desde 4% hasta un 94% de hidroxígeno [23].

1.5. Tratamiento del agua residual

Langdon Perarse afirma: “Los principios básicos de tratamiento de las aguas negras descansan sobre una cimentación física, química, bacteriología y bioquímica. Cuando las aguas negras llegan a las instalaciones de tratamiento se aplican principios de física en los aparatos y también se puede considerar la ayuda de las bacterias, así como de diversos productos químicos”. Los procesos de tratamiento de aguas negras se dividen en dos tipos principalmente que se describen a continuación [18].

Primarios. En el cual los sólidos flotantes, en suspensión o sedimentables, de las aguas negras no tratadas, se reducen por sedimentación libre, tamización fina o fosas sépticas [18].

Secundario. Recibe las aguas negras procedentes de un tratamiento primario donde se efectúa otro tratamiento complementario que puede ser mecánico, químico o biológico con el fin de reducir sólidos en suspensión o disueltos, así como la demanda bioquímica de oxígeno [18].

En estos procesos se emplean diferentes métodos de tratamiento como se describen en la Tabla 3, cabe mencionar que la diferencia entre el tratamiento primario y secundario no siempre se encuentra dividido, también puede encontrarse un conjunto entre ambas y en ocasiones puede existir un tratamiento preliminar antes del tratamiento primario con el objetivo de reducir sólidos de mayor tamaño, además, la aplicación de los tratamientos dependerá de la calidad del líquido que se desea tener [18].

Tabla 3. Métodos y sus respectivos tratamientos de aguas residuales [18].

Método	Tratamiento
Paso por rejillas o cribas	Filtración
<i>Gruesas</i>	Lechos de contacto
<i>Finas</i>	Filtro de goteo, normales
<i>Pulverización de los sólidos</i>	Filtros de goteo de alta calidad
<i>Espumado</i>	Filtros intermitentes de arena
Preaireación	Proceso de activación de lodos
<i>Sedimentación</i>	Procedimiento normal
<i>Separación de la arenilla</i>	Diversas modificaciones
<i>Separación de detritus</i>	Tratamiento de lodo
<i>Sedimentación simple por gravedad únicamente</i>	Digestión, con o sin concentración o desecación
	Lechos de arena
<i>Sedimentación con precipitación química</i>	Decantación
	Concentración química
<i>Proceso químico propiamente dicho</i>	Flotación
	Prensas
<i>Septización o digestión</i>	Centrifugadores
<i>Tanques sépticos</i>	Desecadores por calor
<i>Tanques imhoff</i>	Incineración
Aireación y fotosíntesis	Métodos de eliminación
<i>Estanques de oxidación</i>	Sobre el terreno
<i>En el agua</i>	Riego superficial o sub-superficial
<i>Disolución</i>	

1.5.1. Filtración

Un proceso de filtración es la separación de partículas sólidas a partir de un fluido haciendo pasar el fluido a través de un medio filtrante en el que se depositen los sólidos. Las características de la filtración se basan en que a menor tamaño de partículas del material de filtración, será mayor la superficie de filtración, otra característica a considerar es la vida del filtro que dependerá de la vida útil que exista sobre la superficie del material filtrante. La función de la filtración en aguas residuales es permitir a los compuestos pasar a formas más estables y que se llega a una oxidación completa en donde la intensidad dependerá del grado de filtración obtenido. Los factores importantes que debe cumplir el medio filtrante es de retener los sólidos, dando lugar a un filtrado razonablemente claro, no debe obstruirse o cegarse, debe ser químicamente resistente y tener suficiente resistencia física para soportar las condiciones del proceso, ha de permitir que la torta formada se desprenda de forma limpia y completa, no debe ser excesivamente caro. Entre las desventajas de la filtración se encuentra la obstrucción del filtrado y la inhibición de la aireación lo que limita al tamaño mínimo del material filtrante. Por las características presentes en el agua residual se recomienda la utilización de lechos de sólidos la cual está formada por pequeñas partículas que se separan del líquido mediante una tela filtrante o un tamiz fino, pueden estar sometidos a presión o ser de gravedad. En este último el medio filtrante puede ser un tamiz grueso, o un lecho de capa gruesa como la arena el diseño; se observa en la Figura 10, se basa en una entrada por aspersión, posteriormente contiene una serie de partículas que van desde las más finas hasta las partículas gruesas y en la parte inferior se retiene el líquido clarificado [19].

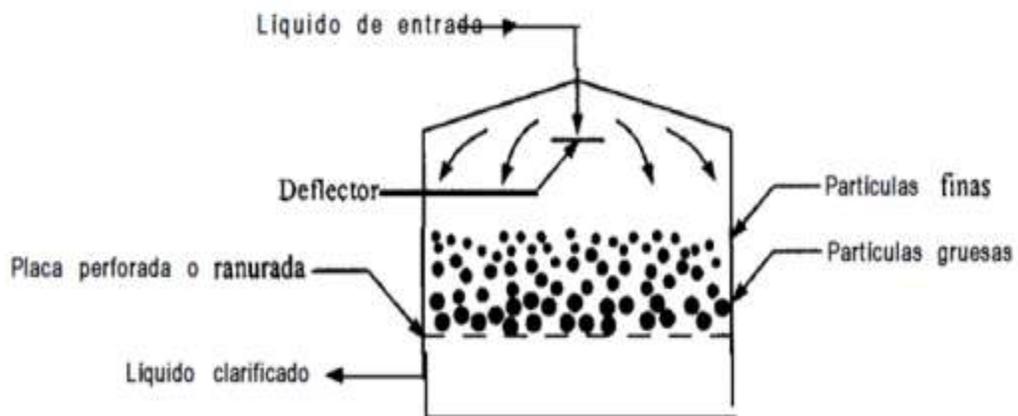


Figura 10. Lecho de filtros de partículas sólidas [19].

1.5.2. Diseño de un filtro

En el diseño de un filtro se emplean diferentes materiales (los cuales conforman un seccionado de capas dentro del filtro a lo que se le llama parte sólida. El número de capas, la granulometría del material seleccionado, así como la altura son factores de diseño únicos puesto que no existe una sola forma de filtro; por ello en la construcción se basa en registros existentes, sin embargo las variables que afectan el diseño repercuten en la calidad de agua que se desee obtener, el tiempo de filtrado (si se requieren uno o más ciclos de filtración de acuerdo a los sólidos que hayan sido retenidos, pero esto incrementa la caída de presión y resistencia al flujo), la renovación de las capas, el tamaño de partícula a retener y la eficiencia del filtrado. Por lo cual en ausencia de datos se efectúan pruebas piloto modificando estas variables hasta poder seleccionar el diseño que dé resultados satisfactorios. Entre las capas más utilizadas se encuentra la grava, arena y carbón activado, por permitir la eliminación de las principales características de aguas residuales que son olor, color y sólidos suspendidos [20].

1.6. Normatividad aplicada en el análisis de agua residual

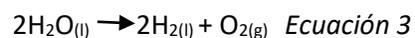
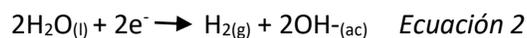
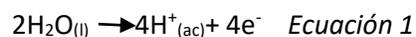
La calidad de las aguas negras se encuentra en variación constante, las causas de está son, los cambios en la cantidad de agua de dilución, debido a la estación del año que se presente por la entrada de agua de lluvia, lavado de las calles puesto que son canales abiertos, las características industriales que descarguen distintos clases de productos de desecho, según el proceso de fabricación o las fases de dicho proceso, de igual forma durante la noche el flujo de estas aguas contiene menos concentraciones de residuos que de día porque los desechos industriales se realizan durante el día. Las muestras que contienen partículas o materia orgánica requieren, en general, un tratamiento previo antes de su análisis fisicoquímico. Entre las características a analizar se encuentra, el aspecto físico de la muestra el cual comprende desde el color, olor, temperatura; de los cuales los factores relevantes son la conductividad, que permite conocer la capacidad de una sustancia para trasportar energía eléctrica, el pH para identificar si es ácida o básica, los sólidos totales disueltos para conocer el grado de minerales presentes en la muestra. Otro análisis relevante es la determinación de metales, en donde cada marcha analítica deberá tener como mínimo una curva de calibración formada por un blanco y dos o más patrones, las propiedades a analizar dependerán del uso que se requiera para estas aguas.

Antes de emplear un método es necesario conocer su límite de detección para saber que procedimientos y equipos emplear, así como identificar los rangos en parámetros de los programas

regulatorios para estas características; se encuentren presentes en las NORMAS OFICIALES MEXICANAS, la CONAGUA y la SEMARNAT. Para garantizar que los resultados de un análisis son verídicos los procedimientos a seguir deben ser verificados; al implementar un procedimiento diferente deben realizarse mayor número de pruebas que al seguir un procedimiento existente. Por ello en el análisis de las aguas residuales que se llevaran a cabo en la presente tesis, se efectuarán conforme lo dictan las normas oficiales mexicanas de acuerdo con los parámetros seleccionados que sean significativos para la calidad del agua [18,21].

1.7. Electrólisis

La electrólisis del agua, es un proceso electroquímico que se fundamenta en las reacciones de óxido-reducción; sucede cuando al pasar una corriente eléctrica que usa un electrólito o una solución alcalina en una mezcla con sales minerales, separa los elementos que componen el agua en sus gases Oxígeno (O₂) e Hidrógeno (H₂). La electrólisis permite obtenerlos con purezas iguales o superiores al 99%. En las celdas electrolíticas se lleva a cabo dos reacciones la de oxidación en el ánodo Ecuación 1 y la de reducción en el cátodo Ecuación 2; generando así la reacción global Ecuación 3, que genera la liberación del hidrógeno y oxígeno en su forma gaseosa.



Las celdas utilizadas en la electrólisis del agua se construyen de hierro o acero, la tensión de descomposición del agua es de 1.7 volts, pero el potencial necesario para efectuarse es más elevado dependiendo del material del electrodo, porque genera una sobretensión elevada del hidrógeno. En el proceso industrializado se diseñan células de acero o hierro al igual que la instalación de tuberías, para el electrodo se realiza un análisis de corrosión de acuerdo con el electrolito utilizado generalmente soluciones de NaOH al 15% o de KOH al 25% tomando en cuenta el rendimiento. Tiene una elevación de costos por la tensión real aplicada; generalmente existen dos tipos las que utilizan diafragmas entre ánodo y cátodo y las que usan electrodos dentro de unas campanas, las más importantes son las primeras, además, se diferencian por la posición del ordenamiento de electrodos, los diagramas y la salida de gases [17,22].

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo, se describe a detalle el diseño y construcción del prototipo de filtro de gravedad, así como la celda electrolítica para obtener la mezcla gaseosa de Hidrógeno-Oxígeno. También, se explica el funcionamiento y operación de los dos prototipos acoplados.

2.1. Filtro de gravedad

El filtro de gravedad permite separar la materia sólida presente, en el agua recolectada directamente de fuentes contaminadas. Está constituido por diferentes materiales que conforman un determinado número de capas minerales con las cuales se consigue obtener agua libre de sedimentos. La filtración por gravedad es una operación de bajo costo que genera beneficios económicos ya que no requiere de un sistema de bombeo para su funcionamiento.

2.1.1. Materiales

En general, los filtros de gravedad están formados por capas alternadas de arena y carbón activado que permiten la eliminación de color y olor en el agua. Con el fin de obtener agua para una posterior electrolisis, se trabajó en un diseño con cinco tipos de capas minerales: mármol, tezontle, arena, carbón activado, grava y algodón. Estos materiales fueron seleccionados por sus propiedades físicas las cuales se describen en la tabla 4, así como su función principal en el filtro [24].

Tabla 4. Materiales del prototipo de filtro por gravedad [24].

	Descripción del material	Función en el filtrado
Mármol	Es una roca metamórfica constituida principalmente por calcita y dolomita, compacta, de textura cristalina blanca o con vetas de distintos colores siendo un producto inorgánico.	Tiende a absorber sales metálicas.
Tezontle	Es una roca de origen volcánico, presenta un aspecto deteriorado y esponjoso, con alto grado de porosidad.	Permite la filtración de agua y es rico en minerales como calcio y zinc.
Arena	Es un elemento granular de rocas y minerales compuestos de partículas, principalmente por silicatos, con un diámetro de 0.06 a 2 milímetros. Entre sus propiedades esta la captura máxima de las partículas suspendidas por su forma subangular.	Evita el deterioro de la lixiviación de los minerales, aumenta el tiempo de vida del filtro, proporciona mayor rapidez de filtrado.

Continuación de Tabla 4. Materiales del prototipo de filtro por gravedad [24].

	Descripción del material	Función en el filtrado
Carbón activado	Es un producto de origen vegetal que se caracteriza por tener una cantidad de átomos disponibles en la superficie y una estructura porosa capaz de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor desagradables. Tiene la cualidad de atrapar diferentes compuestos como metales pesados, toxinas, algunas proteínas y productos de desecho.	Absorbe las sustancias orgánicas del agua. No resiste a virus y bacterias.
Grava	Son rocas minerales, constituidas principalmente por cuarzo, cuarcita, clasto de caliza, basalto y granito. El tamaño está comprendido entre 2 y 64 milímetros. Permite la retención de sedimentos y partículas.	Separar los sólidos sedimentables, haciendo que la carga en el filtro disminuye optimizando la operación mediante un proceso de remoción de sólidos suspendidos más eficiente.
Algodón	Es una fibra vegetal natural compuesta por polímeros que forman fibras de célula generando una especie de corteza con tenacidad especial que presenta propiedades como resistencia, higroscopicidad, elongación, elasticidad y alargamiento de ruptura	Le permite contener partículas pequeñas aun siendo más pesadas.

2.1.2. Diseño

Mediante pruebas experimentales se determinó la granulometría óptima para diseñar el filtro de agua, el cual se muestra detalladamente en la Figura 11. Se trabajó de forma empírica seleccionando el tipo y el tamaño de grano en los materiales y variando los espesores de las capas. Los resultados se presentan en las Tablas 5-7. Como muestra la Tabla 5, se trabajó un solo espesor de capa en todos los minerales, mientras que en la tabla 6, se usaron espesores mayores de los minerales más ligeros. De igual forma, para la Tabla 7, se trabajó con espesores de capa mayores de los minerales más pesados. A partir de las observaciones hechas al agua filtrada y la rapidez del filtrado se optó por

usar una repetición de capas con diferentes espesores tanto para minerales ligeros como pesados obteniendo así el diseño final del filtro de la Figura 11.

Tabla 5. Primer ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.

Espesor de capa	Mineral	Observaciones
8 cm	Espacio para agua	Obtención de un agua grisácea y con una gran cantidad de partículas finas.
8 cm	Tezontle	
8 cm	Mármol	
8 cm	Grava	
8 cm	Carbón activado	
8 cm	Arena	
8 cm	Algodón	

Tabla 6. Segundo ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.

Espesor de capa	Mineral	Observaciones
10 cm	Espacio para agua	Las partículas de mayor tamaño forman una torta en la entrada del filtro lo que hace un filtrada más lento y la obtención del agua se vuelve turbia.
5 cm	Tezontle	
5 cm	Mármol	
5 cm	Grava	
10 cm	Carbón activado	
10 cm	Arena	
4 cm	Algodón	

Tabla 7. Tercer ensayo de selección granulométrica para el prototipo de filtro de gravedad.

Espesor de capa	Mineral	Observaciones
10 cm	Espacio para agua	La filtración es más rápida, no hay presencia de partículas de gran tamaño pero aun presenta un ligero tono turbio color verdoso.
10 cm	Tezontle	
10 cm	Mármol	
4 cm	Grava	
4 cm	Carbón activado	
4 cm	Arena	
4 cm	Algodón	

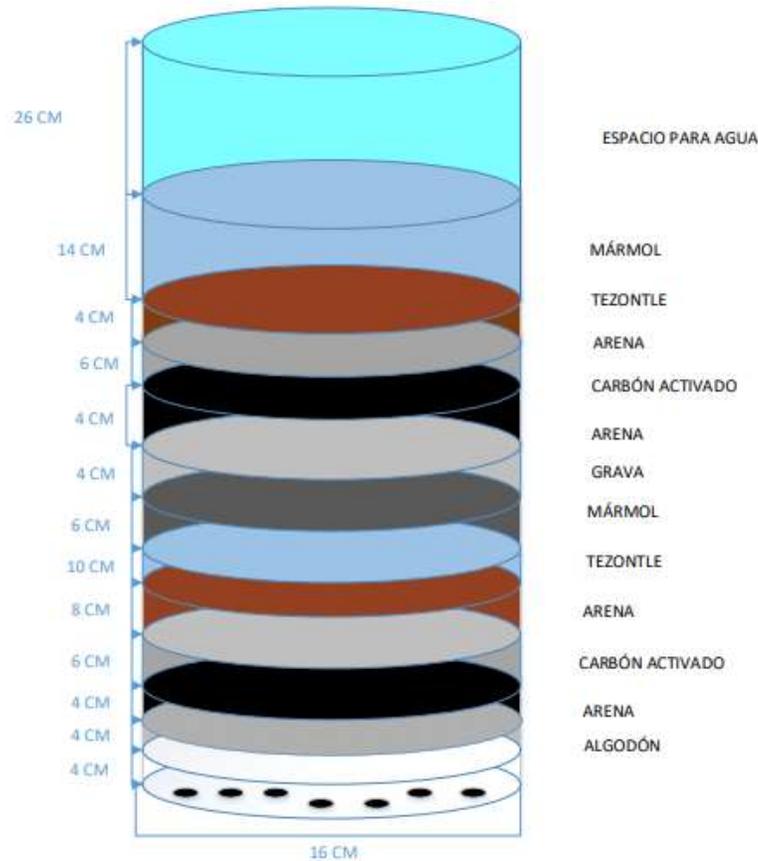


Figura 11. Diseño del prototipo de filtración por gravedad.

Para el desarrollo del prototipo de las pruebas experimentales, se trabajó con diseño a una escala de 1:3. En la tabla 8 se representa la cantidad de material empleado en el diseño del prototipo normal y la escala final.

Tabla 8. Especificación de la granulometría en el prototipo de filtración por gravedad.

Material/Prototipo	Prototipo de filtro		Prototipo de Filtro a escala 1:3	
	Cantidad	Especificación	Cantidad	Especificación
Mármol	500 g	1 cm=25 g	170 g	1 cm=8.5 g
Tezontle	500 g	1 cm=42 g	168 g	1 cm=14 g
Arena	500 g	1 cm=28 g	171 g	1 cm=9.5 g
Algodón	200 g	1 cm=50 g	168 g	1 cm=42 g
Malla de asbesto	2.424 m	1 capa=202 cm	2.424 m	1 capa= 79 cm
Recipiente de cristal forma cilíndrica	1 pieza cilíndrica	h=1 m D=0.30 m	1 pieza cilíndrica	h=0.30 m D=0.10 m

2.1.3. Construcción de prototipo de filtro.

Para la construcción del prototipo se eligió un recipiente cilíndrico para armar el filtro con las dimensiones señaladas en la tabla 8, el cual se limpió con alcohol etílico. Se lavaron con agua corriente todos los minerales (excepto el carbón activado y el algodón) hasta observar que el agua de residuo fuera cristalina y se dejaron secar completamente. Después, se colocaron las capas de los minerales de acuerdo al esquema de la Figura 11, separando cada capa del mineral con una malla de plástico de forma circular de 5 cm de radio. Posteriormente se realizaron pruebas para determinar el volumen de filtrado a soportar y el tiempo completo de filtración. Los resultados se muestran en la Tabla 9, para el prototipo de un filtro a escala de 1:3.

Tabla 9. Capacidad volumétrica del prototipo de filtro.

Cantidad ingresada de agua residual	Tiempo	Cantidad obtenida mediante filtración	% Pérdidas
900 mL	25 min	856 mL	4.9%
500 mL	15 min	460 mL	8%
300 ml	11 min	270 mL	10%

Mediante esta experimentación, se obtuvo que, al agregar un mayor volumen de agua residual, se tenían una menor pérdida de agua filtrada, esto sucede porque las capas del filtro adquieren humedad dependiendo de la cantidad introducida de agua residual. Obteniendo que con la adición de 300 mL de agua se recupera el 90% del agua ingresada, mientras que con 900 mL se recupera el 95% del agua. Los resultados se obtuvieron con el prototipo real de trabajo que se muestra en la Figura 12.

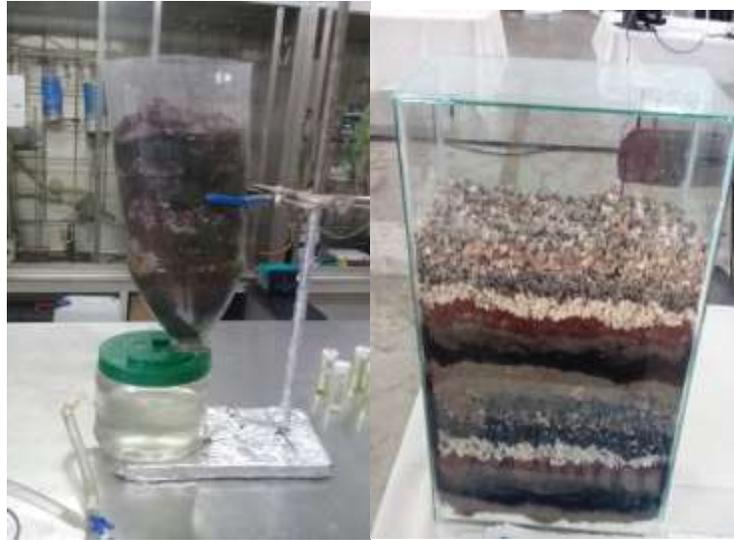


Figura 12. Prototipo de filtración usando en este trabajo.

2.2. Celda electrolítica

En la celda electrolítica se generan una reacción de oxidación y una reacción de reducción que permiten la obtención de la mezcla gaseosa de Hidrogeno-Oxígeno. La celda está constituida por un determinado número de placas aniónicas, catiónicas y neutras; de acuerdo con el volumen de producción de gas que se desee obtener. La colocación de las placas puede ser en arreglo monopolar o bipolar, la selección depende del proceso a realizar la cual se describe a continuación.

- Arreglo monopolar (electrodos alternos) se muestra en Figura 13 a), en el cual todos los ánodos tiene una conexión común integrada por bornes de la fuente de corriente continua, respetando sus terminales de polaridad negativa (ánodo) y positiva (cátodo); con un número de celdas individuales en paralelo una con otra, lo que genera el mismo voltaje en todas las celdas individuales, representando así el voltaje total. No ocurre lo mismo con la corriente aplicada esta se divide entre las celdas conectadas en paralelo.
- Arreglo bipolar se observa en la Figura 13 b), cada placa funciona como ánodo en una de sus caras y como cátodo en la otra, por lo mismo dos de sus celdas adyacentes forman una celda de la unidad las cuales están vinculadas eléctricamente mediante el electrolito como medio de comunicación en forma de serie. Además, solo dos de sus celdas (las finales) están conectadas a la fuente de corriente. Lo que hace que el voltaje de la celda total este representado por la suma de los voltajes de las celdas individuales y que la corriente aplicada circule por cada unidad de celda [25,26].

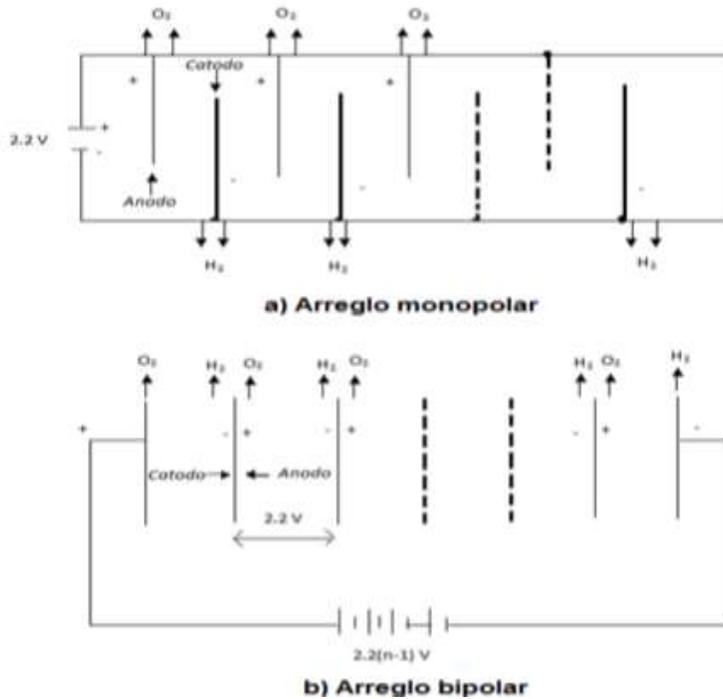


Figura 13. Tipo de arreglo en celda electrolítica [26].

La Tabla 10 muestra una comparativa entre los arreglos monopolar y bipolar. Para este trabajo, se optó por un diseño bipolar de acuerdo con sus ventajas y desventajas.

Tabla 10. Comparación entre arreglo monopolar y bipolar para celda electrolítica [27].

Arreglo monopolar	Arreglo bipolar
Las reacciones electroquímicas se producen en ambos lados de cada electrodo.	Las reacciones electroquímicas suceden simultáneamente en los lados opuestos del mismo electrodo, incluyendo aquellos que no están directamente conectados a la fuente de alimentación.
La manufactura es simple	La manufactura es complicada
Altas pérdidas eléctricas en baja tensión causando grandes pérdidas óhmicas.	Reduce las pérdidas óhmicas en los conectores de circuito eléctrico pero exige mayor presión de diseño y fabricación para evitar que el electrolito y el gas se fuguen de la celda.

2.2.1. Diseño de prototipo de celda electrolítica.

A continuación, se describe las partes que componen el diseño de la celda electrolítica que se usó en esta tesis.

Placa soporte: Esta construidas de acrílico, el espesor es mayor a las placas de acero debido a que tiene la función de soportar a estas, su diseño se aprecia en la Figura 14, es un cuadrado de 10 cm de lado con cuatro orificios de 3/8" colocado en cada vértice a 0.5 cm de los extremos de la placa y un orificio de 5/8" en la parte central inferior a 0.5 cm del extremo.

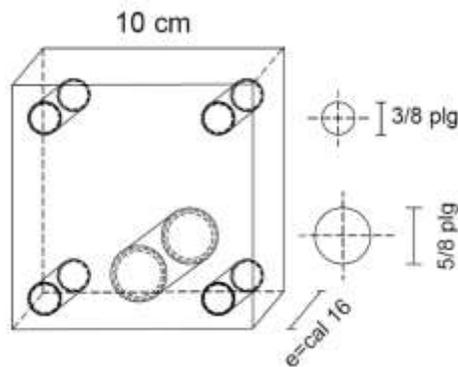


Figura 14. Diseño de placa soporte.

Placa neutra: Está constituida por acero inoxidable AISI 316 calibre 12, no presentan ninguna polaridad, su estructura de diseño es en forma octagonal regular como se aprecia en la Figura 15, tienen 3.5 cm de lado, además dos orificios colocados en el centro a 0.5 cm de los extremos, el inferior de 5/8", el cual da paso al agua y el superior de 3/8" que da paso a los gases.

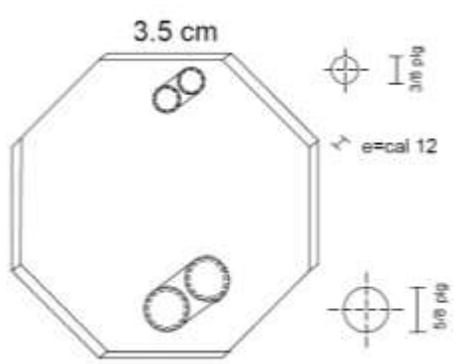


Figura 15. Diseño de placa neutra.

Placa catiónica/aniónica: Está constituida por acero inoxidable AISI 316 calibre 12, son permeables a los cationes y aniones de acuerdo a la posición de colocación en la celda, será receptora por la polaridad de la energía eléctrica. Su diseño es similar a la placa neutral, pero en el extremo derecho posee una pestaña rectangular como se aprecia en la Figura 16, con un orificio de 3/8" colocado a 0.5 cm de los extremos, además permite dar soporte a la celda electrolítica.

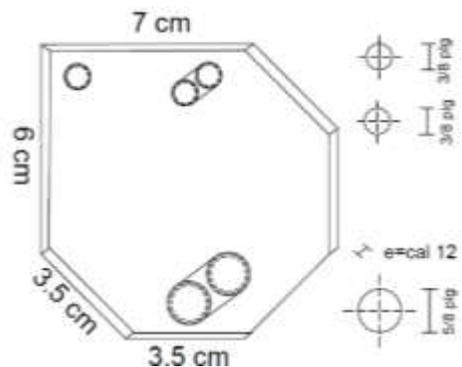


Figura 16. Diseño de placa catiónica/aniónica.

Los materiales para construir la celda se muestran en Tabla 11. Se optó por placas de acero AISI 316 calibre 12 ya que tiene una mayor resistencia a la corrosión, un factor importante en la electrólisis. Los anillos de caucho (O-rings) sirven para dar un sello hermético, mientras que la varilla roscada, las tuercas y rondanas son el soporte mecánico de la placa de acrílico.

Tabla 11. Materiales empleados en construcción de la celda electrolítica.

Cantidad	Material
1 m	Placa de acero AISI 316 Calibre 12 (obtenida en casas de chatarra)
1 m	Placa de acrílico calibre 16 (obtenida en casas de chatarra)
8 piezas	Anillo de caucho (O-rings) de 7 cm de diámetro
1 pieza	Varilla roscada galvanizada de 3/8 plg por 1 m
12 piezas	Tuerca de 3/8 plg
8 piezas	Rondana de 3/8 plg

Para el armado del electrolizador, primero se realizó el corte en la placa de acero obteniendo ocho placas neutras de acuerdo con la Figura 15 y tres placas catiónicas/aniónicas con el diseño de la Figura 16, posteriormente se cortó la placa de acrílico para tener dos placas soporte con el diseño

de la Figura 14. Después se armó el electrolizador con el siguiente orden: placa soporte, placa aniónica (pestaña rectangular lado derecho), 4 placas de carga neutra, placa catiónica (pestaña rectangular lado izquierdo), 4 placas de carga neutra, placa aniónica (pestaña rectangular lado derecho) y placa de soporte. Se separó cada placa con un anillo de caucho (O-ring) cuidando que este no interfiera con los orificios de las placas. Se cortó la varilla roscada galvanizada en 4 tramos de 10 cm colocándose cada uno en los cuatro orificios de la placa soporte, atravesando las placas aniónicas y la catiónica, se colocó dos tuercas entre cada placa que atraviesa la varilla roscada para fijarla al sistema; hasta llegar a la otra placa soporte. Luego se colocó una rondana y una tuerca en cada orificio de las placas soporte del lado contrario a la ubicación de las placas. En los orificios de 5/8 pulgadas, se acopló una conexión de aleta de pescado. Finalmente se comprimió el electrolizador mediante el ajusté de las tuercas para un sello hermético a presión. La figura 17 muestra el prototipo final armado que se usó en este trabajo.



Figura 17. Prototipo de celda electrolítica usado en este trabajo.

2.3. Integración de filtro de gravedad con la celda electrolítica

Con la finalidad de integrar el filtro de gravedad a la celda electrolítica, se planteó una serie de conexiones como se muestra en la Figura 18. Lo cual genera una operación más sencilla que permite introducir una determinada cantidad de agua residual al electrolizador y solo manipular las válvulas así como controlar el voltaje, para generar la mezcla Hidrógeno-Oxígeno. Como muestra la Figura 18, el agua filtrada se dirige a un tanque de almacenamiento y esta se regula con una válvula de paso. Después, del tanque se alimenta la celda con otra válvula de paso para regular la capacidad

de la celda en su operación. Finalmente, en la parte superior de la celda se encuentra otra línea con una válvula de aguja para permitir la liberación de la mezcla gaseosa Hidrógeno-Oxígeno.

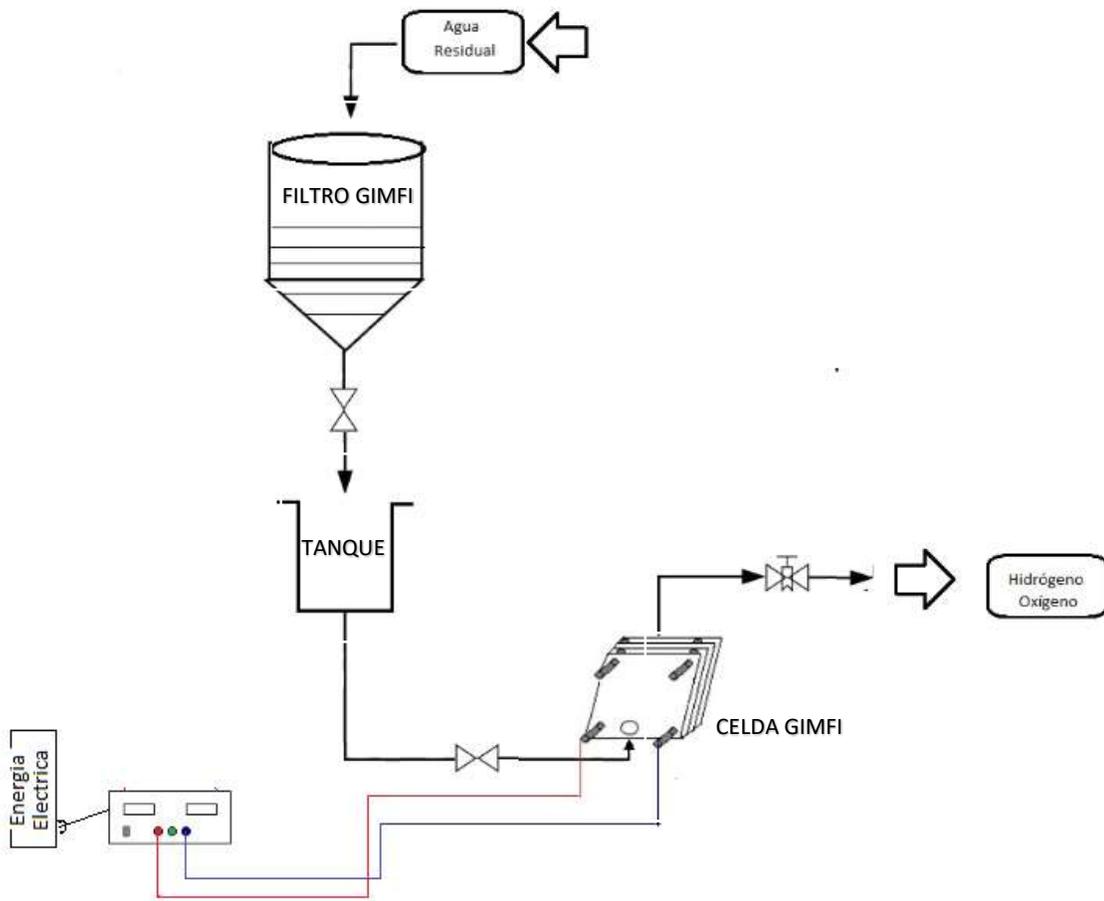


Figura 18. Diseño del sistema para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno.

Para las conexiones de los prototipos, se emplearon los materiales de la Tabla 12.

Tabla 12. Material para el sistema de obtención Hidrógeno-Oxígeno.

Cantidad	Material
1 m	Manguera industrial 1/8 plg
1 pieza	Conexión tipo aleta de pescado
1 pieza	Válvula de aguja
2 piezas	Válvula de paso
1 pieza	Recipiente hermético de 1 Lt.
2 piezas	Pinza tipo caimán

Primero, para el acoplamiento del filtro de gravedad con la celda electrolítica, al frasco hermético se le realizó una perforación en la parte superior del extremo derecho de 1.5 cm de diámetro y en la parte inferior de 1 cm de diámetro. Posteriormente se colocó una conexión aleta de pescado en la parte inferior. Se unió 0.5 m de manguera, para permitir conectar con el electrolizador asimismo se colocó la válvula de paso que permite el flujo al electrolizador. Finalmente se colocó 0.5 m de manguera en la salida del electrolizador y en el extremo la válvula de aguja para la liberación de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno.

Una vez conectados los prototipos, el proceso de electrólisis se efectuó de la siguiente manera; al filtro se le coloca 2 litros de agua residual y se abre la válvula que conecta con el tanque de almacenamiento, esperar 20 minutos aproximadamente para que el tanque se encuentre cargado. Abrir la válvula de paso que interconecta con el electrolizador hasta observar que el agua de filtrado se encuentre a la mitad de las placas del electrolizador. Cerrar la válvula para que continúe llenándose el tanque de almacenamiento del agua filtrada. Realizar la conexión de la pinza caimán color negro en el electrodo izquierdo (cátodo -) y la otra pinza caimán color rojo en el electrodo derecho (ánodo +). Regular fuente a 30 volts. La producción de la mezcla gaseosa Hidrógeno-Oxígeno se aprecia al tener pequeñas burbujas en el agua del electrolizador, para su captura o manejo abrir la válvula de aguja. La figura 19 muestra los prototipos conectados para la producción de la mezcla Hidrógeno-oxígeno.



Figura 19. Prototipo de sistema para la obtención de Hidrógeno-Oxígeno.

El sistema del filtro de gravedad acoplado a la celda electrolítica se identificará con el nombre de GIMFI (agua sucia-orígen otomí). Para la referencia de los prototipos será Filtro GIMFI al prototipo de filtro y Celda GIMFI al prototipo de celda electrolítica.

2.4. Metodología de muestreo

El agua residual es la materia prima para la generación de los gases, la cual se obtiene de los canales de agua residual en el estado de Hidalgo, a continuación, se describe como se realizó la selección y toma de muestra con la finalidad de realizar un análisis en el proceso de producción del gas Hidrógeno-Oxígeno aplicando la metodología de las normas mexicanas.

Primero, se identificó la Zona del Valle del Mezquital por presentar los índices más altos de contaminantes en Hidalgo, seleccionando así cinco municipios como se muestra en la Figura 20, los cuales se encuentran conformados por los canales de riego DR003 Tula y el DR112 Ajacuba; presentes en los municipios de Tezontepec de Aldama, Mixquiahuala de Juárez, Tlahuelilpan, Ajacuba, Tetepango y Atitalaquia.

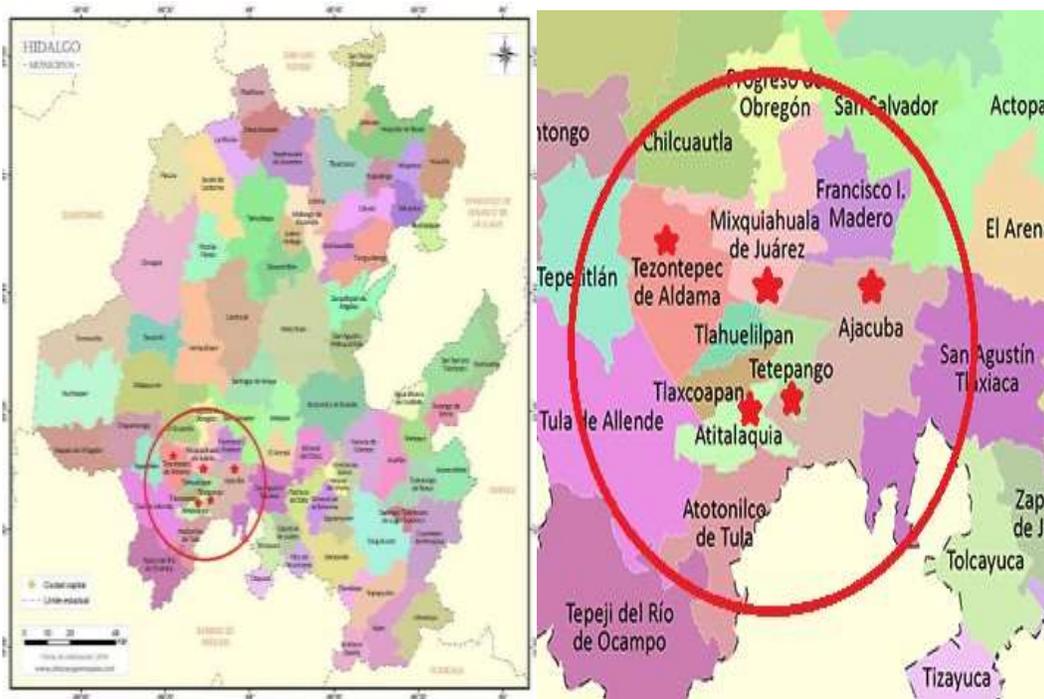


Figura 20. Zona de muestreo en el Valle del Mezquital.

Posteriormente se identificó que los distritos de riego estos construidos por diferentes diseños; es un canal abierto, por los cuales fluye el agua, presentando una superficie libre. Constituidos por canaletas de concreto o simplemente son zanjas que dan paso al agua para el riego de cultivos lo cual hace que sean diferentes las propiedades de esta agua residual. Como se aprecia en las Figuras

21-24 cada zona de muestreo es diferente y a simple vista se observa el grado de contaminación presente.



Figura 21. Canal ubicada en la carretera Ajacuba- Tetepango Km. 28.



Figura 22. Canal ubicado en Atitalaquia, Hgo.



Figura 23. Canal ubicado en Tlahuelilpan, Hgo.



Figura 24. Canal ubicado en Mixquiahuala de Juárez, Hgo.

Finalmente, al tener identificada la zona de acuerdo con la Figura 20, y los puntos de muestreo en los canales abiertos, se realizó una toma de muestra de acuerdo a la NMX-AA-003-1980 AGUAS RESIDUALES. – MUESTREO; el procedimiento a detalle se describe en el anexo apartado I.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo muestra el análisis fisicoquímico para las muestras de agua residual y filtradas; con el fin de comparar los niveles de conductividad, resistividad, potencial de hidrógeno, sólidos totales disueltos y salinidad en una muestra sin tratamiento y la obtenida al salir del Filtro GIMFI (prototipo de filtro). Posteriormente se analizó la presencia de los metales más contaminantes presentes en el agua, los cuales fueron Cd, Pb y Cu. Después se efectuó un análisis de producción en la mezcla Hidrógeno-Oxígeno, al utilizar diferentes muestras de agua, mediante electrólisis aplicando una variación de voltaje a la Celda GIMFI (prototipo de celda electrolítica). Finalmente se elaboró un estudio del costo para la fabricación del Sistema GIMFI (el sistema del filtro de gravedad acoplado a la celda electrolítica), el cual muestra su comparación en el mercado y los costos energéticos a una determinada producción.

3.1 Análisis Físicoquímico

Este estudio comprende la identificación de los parámetros de conductividad, resistividad, potencial de hidrógeno, sólidos totales disueltos y salinidad en las muestras de agua residual del Valle del Mezquital, Hidalgo y su correspondiente filtración por GIMFI.

Mediante la medición de conductividad para agua residual y la obtenida por el Filtro GIMFI se puede apreciar en la gráfica de la figura 25, que las muestras de aguas residuales tienen valores menores a $20 \mu\text{s/cm}$ lo cual sucede por el grado de contaminación presente. Mientras que para el agua filtrada se tiene un incremento con valores mayores a $1000 \mu\text{s/cm}$. Comparando los resultados de la gráfica de la figura 25, se plantea que posiblemente el agua al pasar por el Filtro GIMFI genera un intercambio de iones contenidos en los materiales como el mármol, la piedra volcánica (tezontle) y la grava debido a que están constituidos estructuralmente por diversos minerales.

El incremento de la conductividad ocurre en gran medida en las muestras de agua residual (Ajacuba, Atitalaquia, Mixquiahuala y Tetepango) en comparación con la muestra de agua del Río de Tezontepec donde el incremento es menos pronunciado, lo cual pudiera deberse a su característica de origen por ser un tipo de agua con carácter dulce. Cabe mencionar que la conductividad depende principalmente de la carga de los iones disueltos (tanto positivos y negativos) y su movilidad, por ende, se espera que, el flujo de la corriente eléctrica sea mejor debido a la presencia de estos portadores de carga.

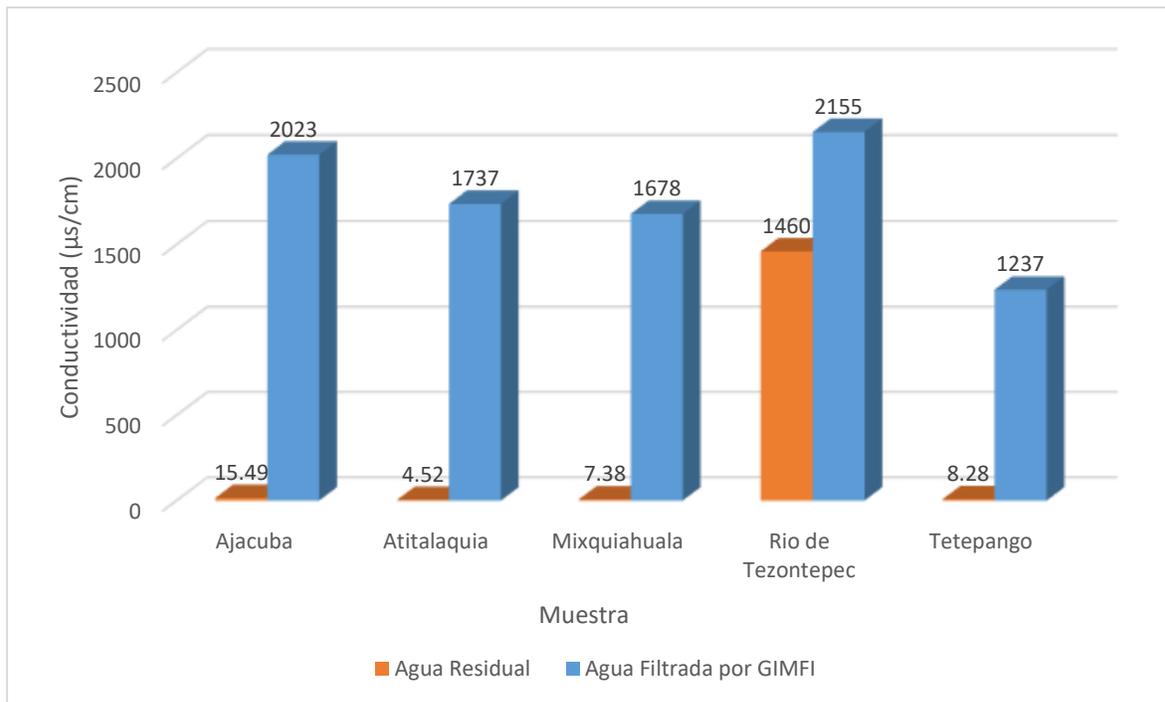


Figura 25. Análisis de conductividad de muestras de agua.

La resistividad es un parámetro inversamente proporcional a la conductividad razón por la cual en la gráfica de la figura 26, al tener una alta conductividad se genera un pequeño valor de resistividad, por lo cual se espera que no se obtengan tiempos de reacción en la electrolisis tan elevados ya que no se presentará oposición al flujo de la corriente eléctrica.

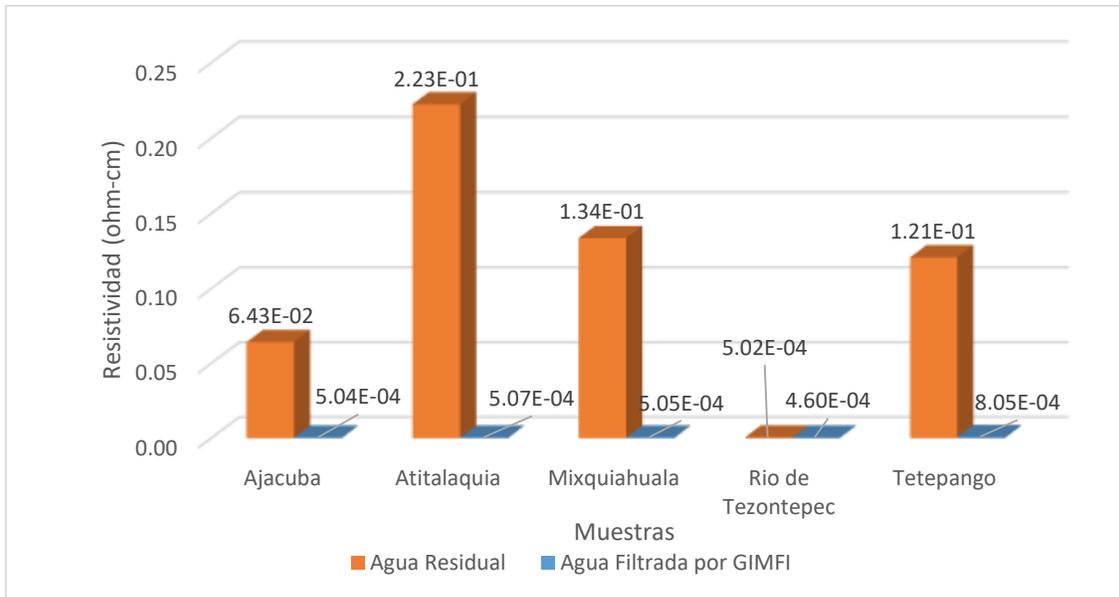


Figura 26. Análisis de resistividad.

El filtro GIMFI además de la retención de sólidos y partículas suspendidas también promueve un incremento en el potencial de hidrógeno como se muestra en la gráfica de la figura 27. Es posible, que la variación del pH este dada por el origen de la muestra; la disminución del grado de contaminación representa en el siguiente orden; Atitalaquia que proviene de los desechos de un parque industrial, la muestra de Mixquiahuala es una zona semi-urbana, las muestras de Ajacuba y Tetepango son canaletas directas para riego agrícola, finalmente se encuentra el rio de Tezontepec. Las muestras filtradas por el Filtro GIMFI se caracterizan por tener valores iguales o superiores del 7.4 denominado medianamente básico, lo cual sugiere que los iones que se incorporan a las muestras son alcalinos.

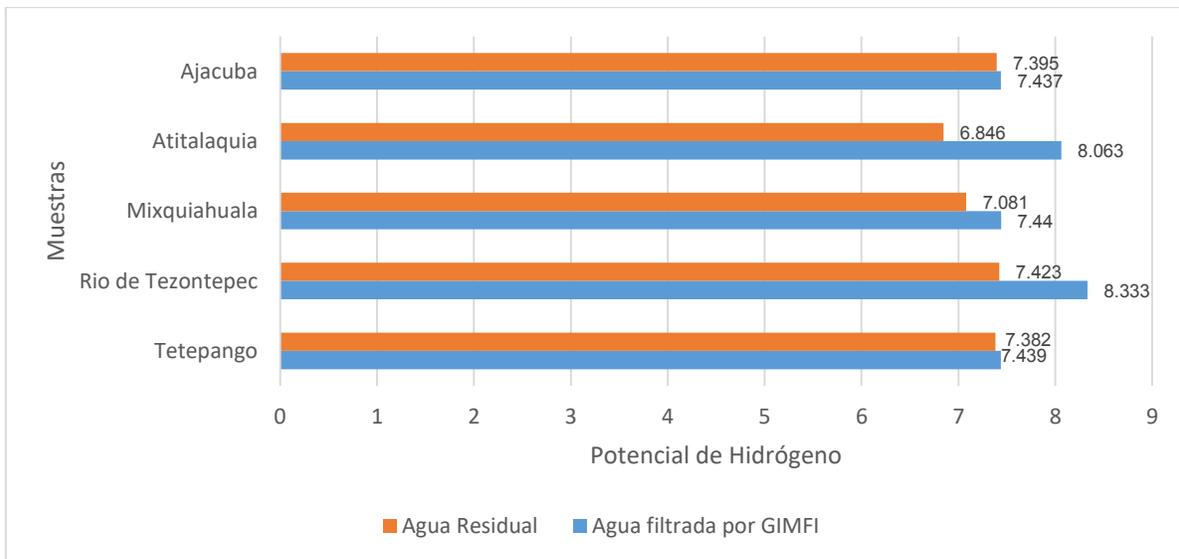


Figura 27. Análisis del potencial de Hidrógeno.

La cantidad presente de sólidos totales disueltos es otro factor importante porque representa la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua, en la gráfica de la figura 28, se puede observar que las muestras de agua residual tienen valores menores de 8 ppm en comparación con las filtradas con valores superiores de 600 ppm lo que representa un incremento significativo, por lo tanto se plantea como hipótesis una mayor presencia de especies iónicas como calcio, fosfatos, nitratos, sodio, potasio o cloruro provenientes de los materiales que constituyen el filtro GIMFI.

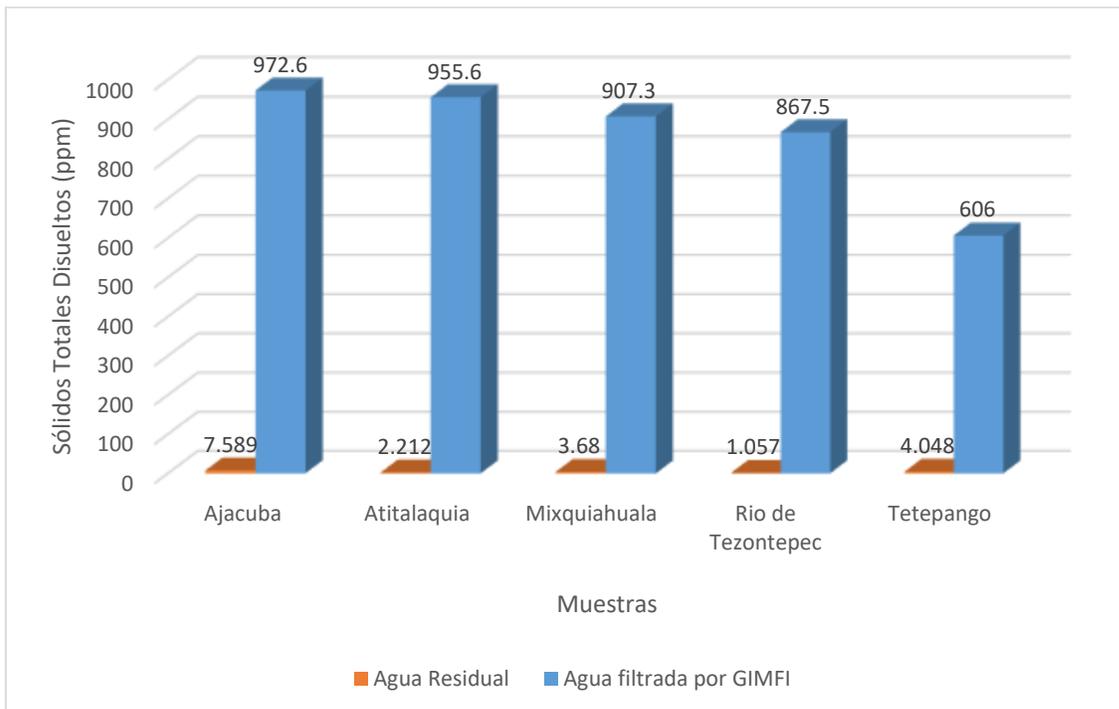


Figura 28. Análisis de sólidos totales disueltos.

Al realizar el análisis de la salinidad, como se muestra en la gráfica de la figura 29, se observa una disminución significativa. Las muestras de agua residuales presentan valores superiores a 2.4 g/L mientras que las filtradas por GIMFI valores menores a 1 g/L. La salinidad está representada en un 99% por los iones de cloro, sodio, magnesio, azufre, calcio, potasio, bromo, estroncio, boro y flúor. La técnica de medición aplicada constituye un 85% de certeza para los iones sodio y cloro, por lo que, al tener presente una disminución, se establece la hipótesis que los iones sodio y cloro se quedan retenidos en el filtro GIMFI. Cabe mencionar que las muestras de Ajacuba y Tetepango son de canaleta directo a riego agrícola por ello presentan los valores más alto de salinidad, aunque al pasar por el Filtro GIMFI también generan mayor pérdida de ella.

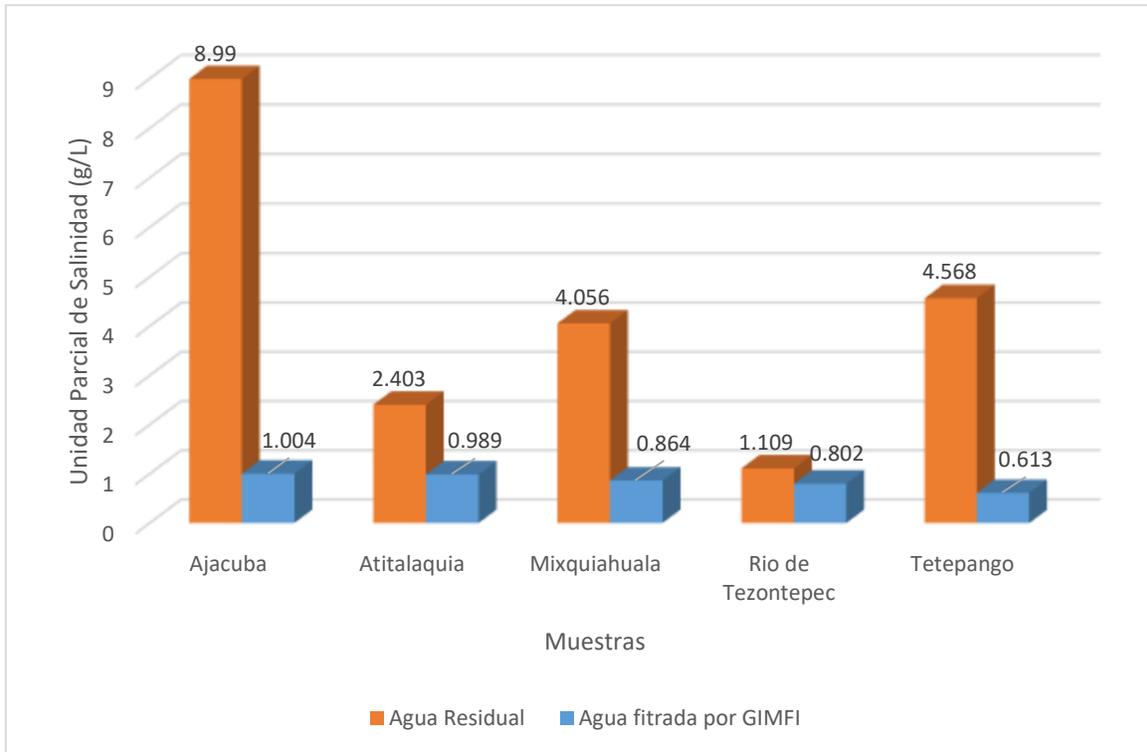


Figura 29 Análisis de Salinidad

3.2 Cuantificación de metales pesados

Se cuantificó el contenido de los iones de algunos metales contaminantes del agua como son Cd, Pb y Cu para las muestras de agua residual en Ajacuba, Atitalaquia, Mixquiahuala y Tetepango, así como también del agua filtrada usando el filtro GIMFI. Con el fin de conocer el cambio en la concentración del ion metálico, así como la retención de estos en el prototipo de filtro, las técnicas analíticas que se emplearon fue polarografía diferencial de pulsos y absorción atómica.

La Figura 30 presenta la cuantificación de Cadmio en las muestras de Ajacuba, Mixquiahuala y Tetepango usando la técnica de polarografía diferencial de pulsos, obteniendo concentraciones superiores a 0.014 mg/L en agua residual y menores a 0.02 mg/L en las muestras filtradas por GIMFI, lo que representa un porcentaje promedio de 77.44% de disminución del cadmio, por lo que el catión es retenido por los materiales del filtro GIMFI.

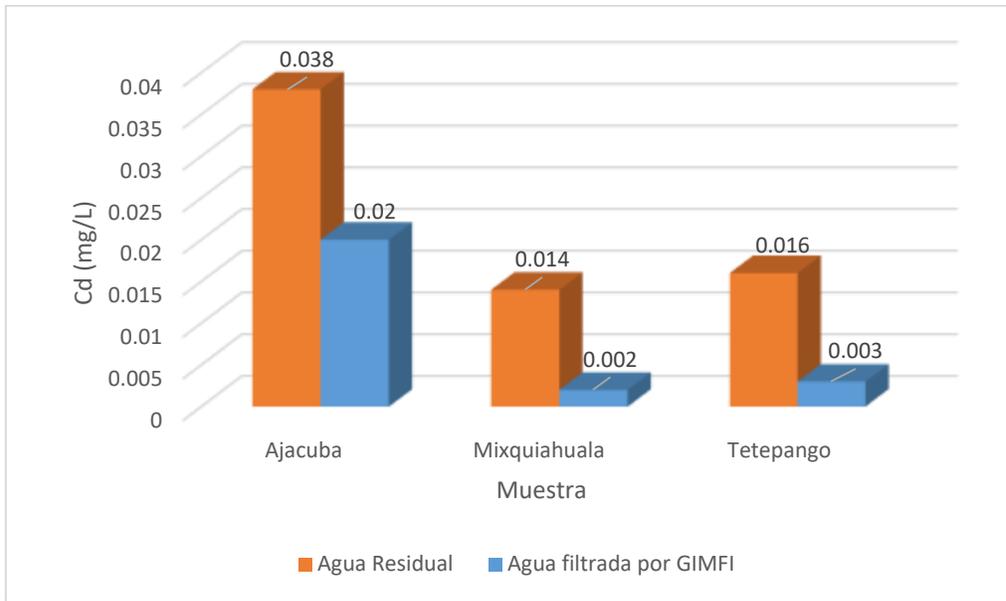


Figura 30. Análisis de Cadmio.

En la Figura 31 se muestra los resultados del contenido de iones de plomo en muestras de Ajacuba, Mixquiahuala y Tetepango obtenidos por la técnica de la polarografía diferencial de pulsos. Las muestras de agua residual presentan valores de concentración en un intervalo de 0.012 a 0.017 mg/L en tanto que en las muestras filtradas hay una disminución de la concentración entre 0.009 y 0.005 mg/L. De forma similar que el caso descrito para cadmio, hay una reducción promedio del 50.28% de iones plomo gracias al filtro GIMFI.

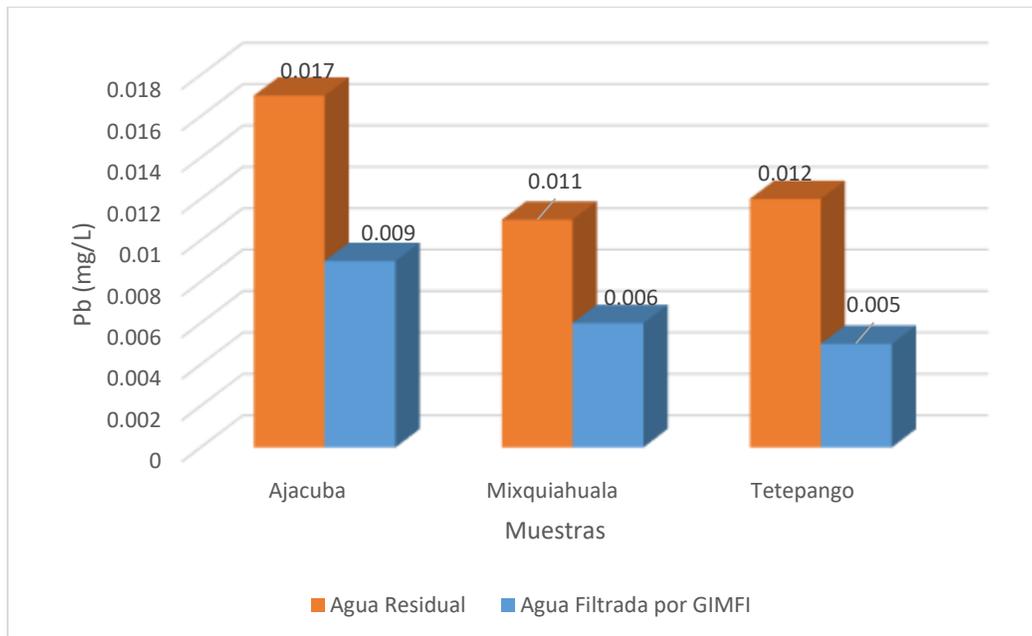


Figura 31. Análisis de Plomo.

Se optó analizar por separado la muestra proveniente de Atitalaquia ya que presentaba índices más altos de contaminación por metales pesados. También, se decidió realizar más de una operación de filtrado de la muestra de agua residual original, con la finalidad de cuantificar el índice de reducción de concentración total que se genera. La gráfica de la figura 32 muestra que la reducción de contenido de Cd después de la primera filtración es de 26%, mientras que al ser filtrado cuatro veces se reduce hasta un 44% en comparación con la muestra de agua residual inicial.

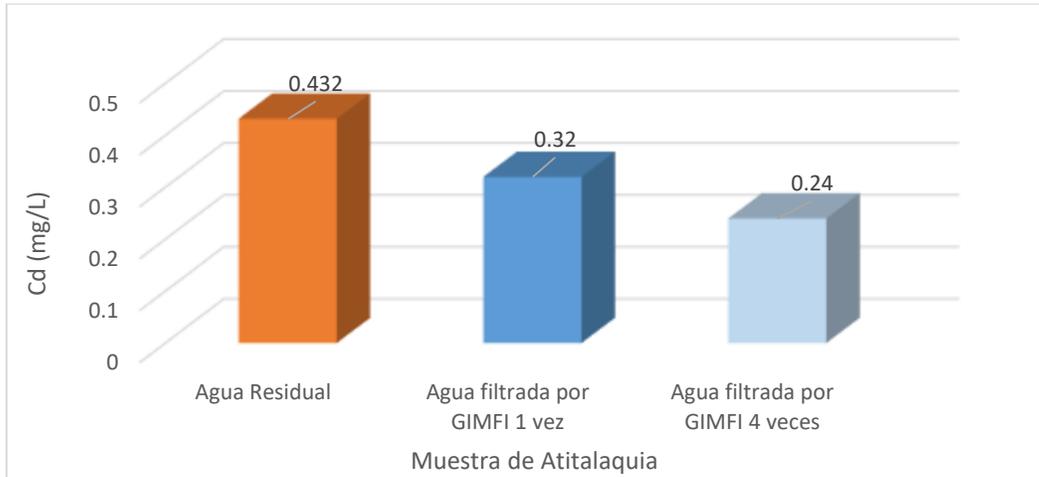


Figura 32. Análisis de Cadmio en Atitalaquia.

El análisis de iones plomo contenidos en la muestra de agua de Atitalaquia se muestra en la gráfica de la Figura 33. Para esta muestra se observa una disminución del 50% del plomo como resultado de la primera operación de filtrado. Sin embargo, ya no ocurre cambio en la concentración del plomo a partir del primer ensayo por lo que se concluye que el filtro GIMFI agota su capacidad de retención para estos iones.

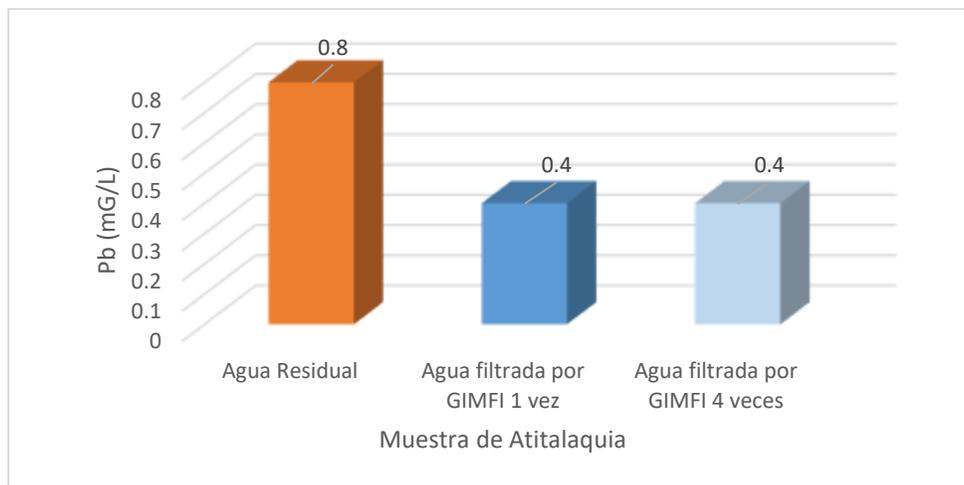


Figura 33. Análisis de iones plomo en muestra Atitalaquia.

Para el análisis de cobre se descartó la técnica de polarografía diferencial de pulsos debido a que la señal obtenida se encontraba muy cercana a la barrera catódica de detección, optando así por la técnica de absorción atómica. Sin embargo, debido a la limitación en tiempo de uso del

espectrómetro de absorción atómica, solo se analizaron los filtrados resultantes de las muestras después de ser filtradas. Por esta razón y con fines comparativos, se plantea una concentración hipotética inicial de 2-6 mg/L de cobre que podrían contener las muestras de agua residual para uso agrícola reportado por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Los resultados de análisis de cobre de las muestras de agua filtradas con el filtro GIMFI se presentan en la Figura 34, obteniéndose un intervalo de concentración de iones cobre entre 0.25 y 0.015 mg/L.

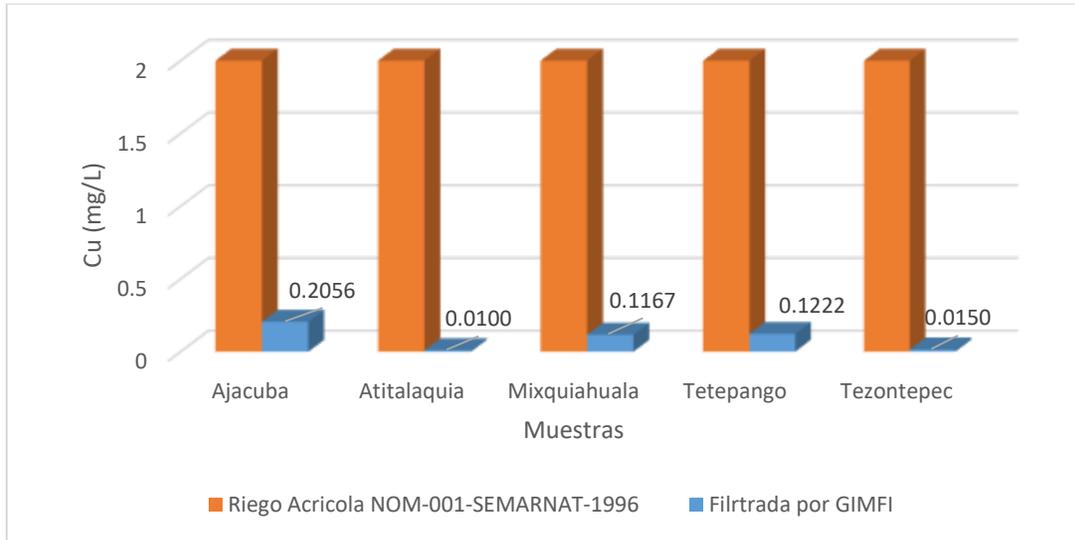


Figura 34. Análisis de cobre por Espectroscopia de Absorción Atómica. Con fines de comparación, se presenta el dato de riego agrícola.

3.3 Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno

Para la producción de mezcla hidrógeno-Oxígeno, se optó por utilizar una intensidad de 15 amperes y una variación del voltaje de 30 a 60 volts. En la figura 35, la gráfica muestra los resultados obtenidos del gasto volumétrico en cm^3/s usando la muestra de Atitalaquia filtrada por GIMFI ya que presenta los índices más altos de contaminación de acuerdo con las propiedades fisicoquímicas analizadas. Los resultados se comparan con la producción de gas usando agua corriente (doméstica sin tratamiento alguno), agua potable, agua desionizada y agua desionizada filtrada por GIMFI.

Cada una de estas muestras es fisicoquímicamente diferente, lo cual repercute en el proceso de electrólisis, donde, en la figura 35 se aprecia que la muestra de Atitalaquia obtenida por el filtro GIMFI es la que mayor índice de producción de gas presenta. En contraste, el agua potable y agua de uso corriente, permiten una producción de hidrógeno-oxígeno menor a un 50% que el flujo total obtenido usando la muestra de Atitalaquia filtrada por GIMFI.

De la figura 35, se deduce que la muestra de agua desionizada es la que presenta el índice más bajo de producción de mezcla gaseosa como consecuencia de la ausencia de iones portadores de carga. En contraste, el agua desionizada pasada por el filtro GIMFI produce un flujo comparable con aquel obtenido, usando agua potable, con lo cual se demuestra que el uso del filtro GIMFI optimiza el proceso de electrólisis.

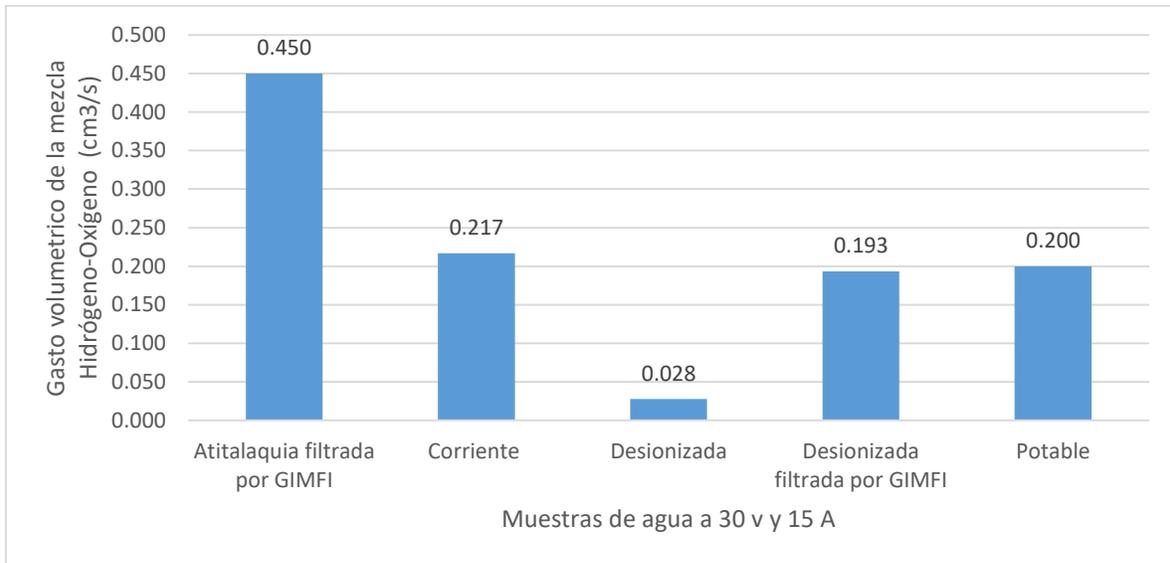


Figura 35. Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a 15 A y 30 V.

Para las muestras de la Figura 35 se analizó la producción de gas Hidrógeno-Oxígeno variando el voltaje en un intervalo de 30 a 60 volts y manteniendo constante la intensidad de corriente a 15 A. Los resultados se muestran en la figura 36, donde se aprecia que al incrementar el voltaje la producción de mezcla Hidrógeno-Oxígeno también aumenta para cada muestra. Se observa, por ejemplo, que en la muestra de Atitalaquia filtrada por GIMFI los valores de producción entre 30 y 40 volts son muy cercanos a una producción de 0.5 cm³/s de Hidrógeno-Oxígeno, mientras que a 50 y 55 volts se tiene alrededor de 0.9 cm³/s de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno y un incremento medio para 45 V y 60 V. Una variación similar del gasto volumétrico en función del voltaje se puede observar para cada tipo muestra.

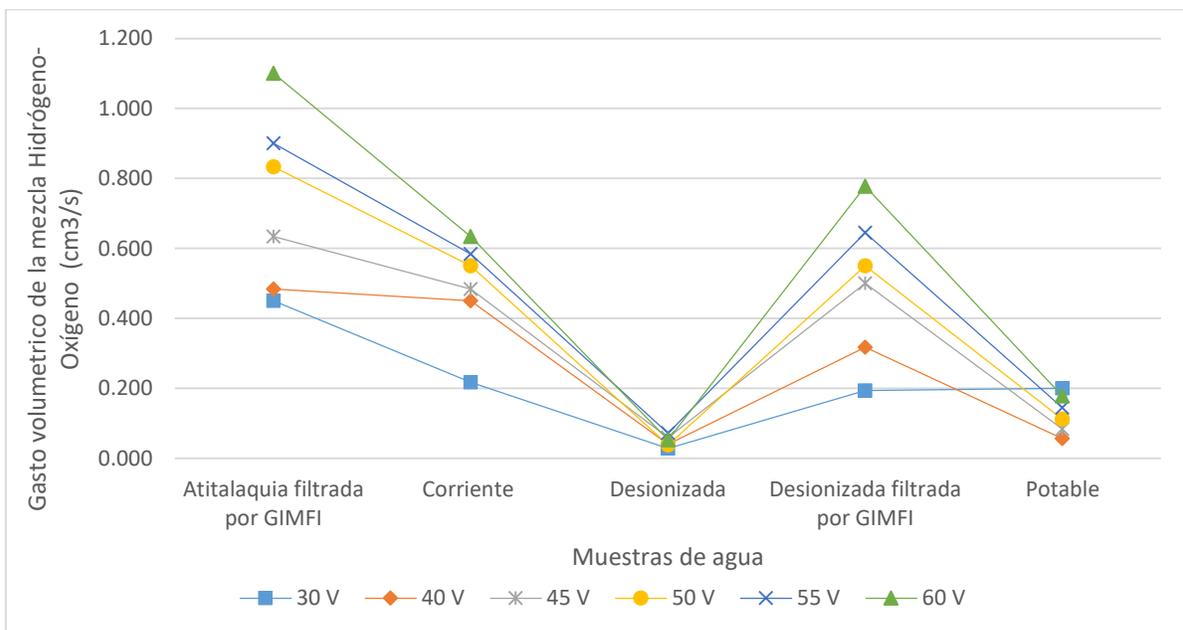


Figura 36. Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a 15 A y diferente voltaje

Con el fin de realizar una comparación del tiempo requerido para la producción de mezcla gaseosa a distintos valores de voltaje e intensidad de corriente constante entre la muestra de mayor y menor índice de contaminación del Valle de Mezquital se eligió las muestras de Atitalaquia y el Rio de Tezontepec. De acuerdo con la figura 37, la gráfica muestra que para un voltaje de 15 V el tiempo de producción de 50 cm³ es mayor a 5 minutos mientras que usando un voltaje de 30 V para la misma producción se requiere un tiempo menor a un minuto.

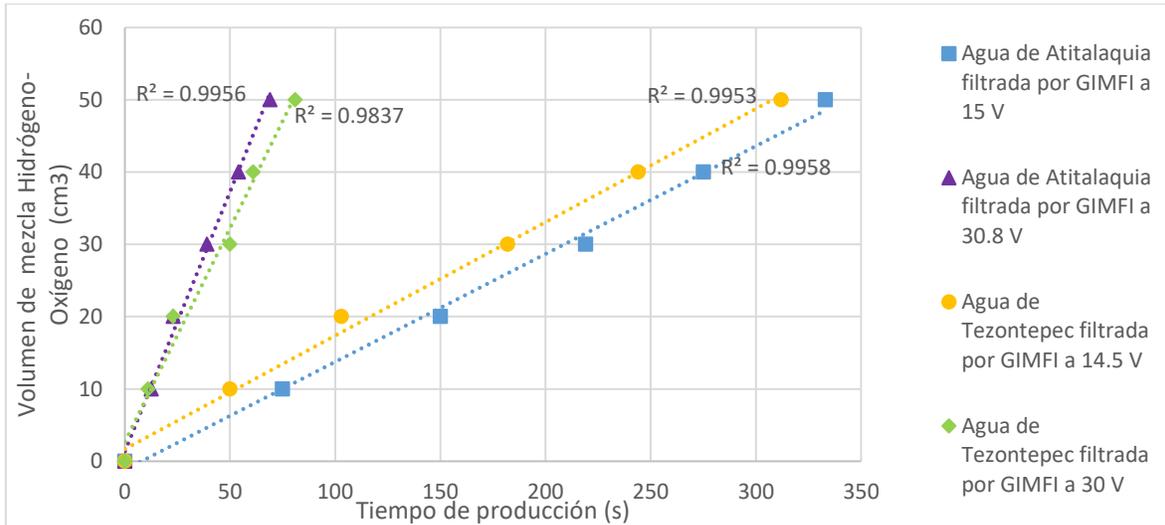


Figura 37. Producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno para las muestras de Atitalaquia y el Rio de Tezontepec filtradas por GIMFI a 15 A y diferente voltaje.

3.4 Costos

Un factor importante a analizar es el costo de elaboración del sistema para producir la mezcla de gas Hidrógeno-Oxígeno. De acuerdo con la figura 38 se analizaron los precios con equipos disponible en el mercado para la producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno o Hidrógeno; donde notoriamente se aprecia que el costo del sistema GIMFI representa un mínimo valor en comparación con los demás. Si se incrementará al doble el costo de elaboración por el tiempo y mano de obra requerido aun presentaría un porcentaje menor del 50% de acuerdo al equipo más barato en el mercado (Kit hidrógeno celda).



Figura 38. Comparativo de costos en el mercado y GIMFI.

Finalmente en la figura 39 se estableció un voltaje de operación de 30 volts y 15 A, dado a que un voltaje menor las demás muestras no presentaban una producción contante para el análisis del costo energético (en el presente año 2021) para una producción de 100 cm³/s. Se obtiene así que la muestra de Atitalaquia filtrada por GIMFI presenta un costo menor a 2 pesos, la cual es más económicamente factible en comparación con la muestra de agua corriente, potable y la desionizada filtrada, descartando completamente la desionizada por el tiempo de producción tan elevado que presenta.

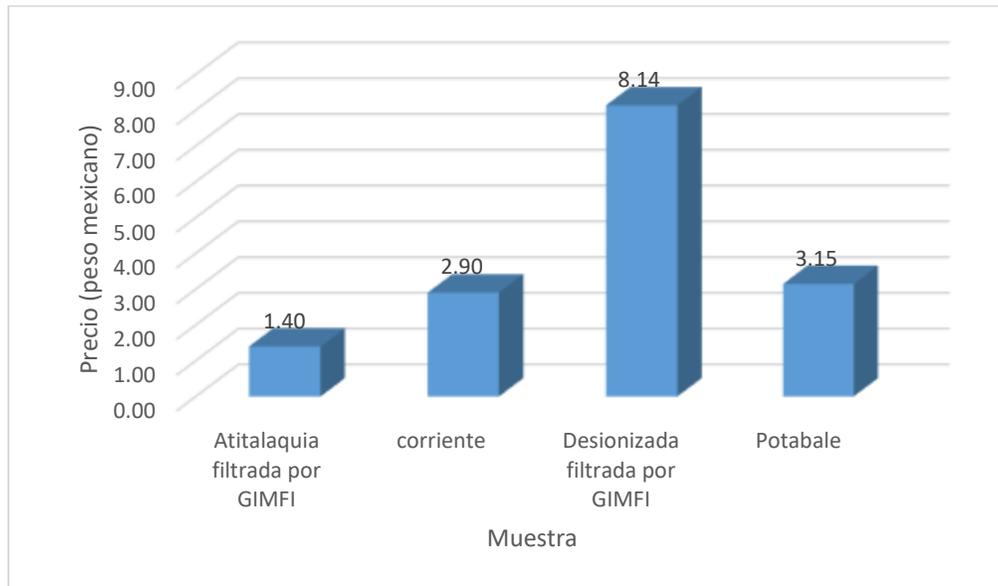


Figura 39. Costo energético para una producción de 100 cm³/s de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno.

CONCLUSIONES

- Se logró identificar que los municipios de Ajacuba, Atitalaquia, Mixquiahuala, Tetepango y el Rio de Tezontepac pertenecientes al Valle del Mezquital están entre los que presentan más altos índices de contaminación del estado de Hidalgo, de los cuales se obtuvieron muestras representativas de agua residual.
- Se construyó un sistema denominado GIMFI para la obtención de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno a partir de dos prototipos interconectados: el primero un filtro de gravedad constituido por diferentes minerales y el segundo una celda electrolítica. Para ambos, se emplearon materiales reciclados y de bajo costo.
- Se realizó un análisis fisicoquímico de conductividad, resistividad, potencial de hidrógeno, sólidos totales disueltos y salinidad en las muestras de agua residual del Valle del Mezquital, Hidalgo y su correspondiente filtración por GIMFI. Se pudo identificar que el filtro genera un intercambio de iones, aumento de sólidos totales disueltos, un pH alcalino, y retención de salinidad. En adición, al cuantificar metales pesados se demostró que el filtro promueve una reducción de cadmio, cobre y plomo contenidos en las muestras iniciales.
- Los resultados obtenidos de la producción de gases Hidrógeno-Oxígeno muestran que se produjo un mayor volumen por unidad de tiempo usando agua filtrada con GIMFI (muestra de Atitalaquia) en comparación con el uso de agua potable de uso corriente. Por lo tanto, el agua filtrada es óptima para el proceso de electrólisis.
- Se presentó una evaluación del costo de los prototipos filtro GIMFI-electrolizador el cual en comparación con electrolizadores comerciales representa una diferencia menor al 50%.
- El trabajo desarrollado en esta tesis se considera un proyecto sustentable, y económicamente factible.

PERSPECTIVAS

- El sistema GIMFI puede acoplarse a un panel solar, mediante un diseño que sustituya la fuente de poder, cambiando así el suministro de energía eléctrica por energía solar al electrolizador. De esta manera el proceso de electrólisis sería altamente rentable porque generaría un solo costo de inversión y no un costo continuo por emplear energía eléctrica.
- Se puede realizar un diseño adicional a la salida de la celda GIMFI donde se obtiene la mezcla gaseosa Hidrógeno-Oxígeno; para conectarse a quemador y ser aplicada como estufa en comunidades de bajos recursos que contengan problemas de contaminación de agua.

Referencias bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *México en cifras*. Consultado 10-09-2020. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=13>
- [2] Hidalgo.gob .mx, *Regiones geo culturales del Estado de Hidalgo*. Consultado 10-09-2020 Recuperado de <http://cultura.hidalgo.gob.mx/regiones-geoculturales-del-estado-de-hidalgo/>
- [3] Alarma en Hidalgo, por el consumo de aguas residuales. (25 de diciembre de 2006).Proceso. Recuperado de <https://www.proceso.com.mx/224138/alarma-en-hidalgo-por-el-consumo-de-aguas-residuales>
- [4] Declaran emergencia ambiental en Tula, Hidalgo; presa Endhó con altos niveles de mercurio. (16 de julio de 2019). Noticieros Televisa. Recuperado de <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/tula-hidalgo-semarnat-declara-emergencia-ambiental/>
- [5] Miranda, F. (29 de diciembre de 2018). Exigen sanear el río Tula y dejar de recibir aguas negras de la CDMX. Milenio. Recuperado de <https://www.milenio.com/estados/exigen-sanear-rio-tula-dejar-recibir-aguas-negras-cdmx>
- [6] Garcia, A. (10 de marzo de 2016). Hidalgo el estado con mayor contaminación. Megalópolis informando a la gran urbe. Recuperado de <https://megalopolismx.com/noticia/8241/hidalgo-el-estado-con-mayor-contaminacion-en-sus>
- [7] Núñez, A.L. (2015). Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México pag. 30-42
- [8] CONAGUA. (2010). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego* [archivo pdf]. México D.F. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, pp. 7,254, 289, 295 Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgih-1-10libroeadr2008-09.pdf>
- [9] ResearchGate, Uso de Aguas residuales en la agricultura. Consultado 12-09-2020. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ubicacion-del-valle-del-Mezquital-norte-de-la-Ciudad-de-Mexico-y-los-tres_fig18_313564116
- [10] Ramírez, V. (2013). Sistemas de riego en Ixmiquilpan, Tetepango y Tula, siglos XVII-XIX. SCIELO, Vol.34 (ISSN 2448-7554). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292013000400007
- [11] Secretaria de Salud. Boletín epidemiológico. Consultado 07-10-2020. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1285/sem43.pdf>

- [12] De Juana, J.(2008). Energías Renovables para el desarrollo. Madrid, España: Editorial Thomson Ediciones Spain, pp. 5-10. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=NyvcConR-xoC&printsec=frontcover&dq=energia+renovable&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjMw766x4rIAhVOnp4KHTotDgoQ6AEILzAB#v=onepage&q=energia%20renovable&f=false>
- [13] Castells, X. (2011). Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad. Madrid, España: Ediciones Días de Santos S.A. pp.595, 599-610
- [15] Chávez, A. U. México y su transformación a un sistema energético basado en hidrogeno. Recuperado de <https://centrosconacyt.mx/objeto/hidrogeno/>
- [14] Clemente, M.C.; Sánchez, M.; Rodríguez, L. (2018). Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrogeno a partir de energías renovables. Anales de la Real Academia de Doctores, Vol. 3(ISSN 1138-2414) pp.19-36. Recuperado de <https://www.radoctores.es/doc/2V3N1-CLEMENTE%20-%20produccion%20de%20hidrogeno.pdf>
- [16] Herraiz, I. (2012). Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrogeno a partir de la electrolisis alcalina del agua. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- [17] Castells, X. (2005). Madrid, España. Tratamiento y Valoracion energética de residuos Ediciones Díaz de Santos S.A., pp. 1051-1057 Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=qYmL8Q10TYcC&printsec=frontcover&dq=tratamiento+y+valorizaci%C3%B3n+energetica+de+residuos+xavier+el%C3%ADas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwit07P-0pXIAhUCXq0KHTIMC8cQ6AEIKzAA#v=onepage&q&f=false>
- [18] Harold, E.; Boumann, E.R. (1980). Alcantarillado y tratamiento de aguas negras. España. Compañía Editorial Continental S.A., México, capítulo 14 y 21
- [19] McCabe, W.L.; Smith, J.C. (1978).Operaciones básicas de la Ingeniería Química. Barcelona, España. Editorial Reverte, S.A., Vol.II, pp. 998-1005
- [20] Filtración en grava y arena. Consultado 04-10-2020 Recuperado de <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/filtracion.htm>
- [21] APHA, AWWA, WPCF. (1992). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, España. Ediciones Días de Santos S.A., pp.2-1,2-38,3-1, 3-4
- [22] Rubio. L.A. (1953). Electroquímica aplicaciones. Madrid España. Editorial Tecnos S.A, pp. 164-169

- [23] Díaz A. R, González J. E., González A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna, Revista UIS Ingenierías, pp. 143-154. Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5537/553756967014/553756967014.pdf>
- [24] Schumann, W. (2007) Guía de rocas y minerales. México. Editorial OMEGA pp. 200-250
- [25] Rubio. L.A. (1953). Electroquímica aplicaciones. Madrid España. Editorial Tecnos S.A, pp. 164-169
- [26] Aguilar, E. (2015). Evaluación electroquímica de distintos arreglos de electrolizadores alcalinos. (Tesis de Licenciatura). Escuela superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. IPN. Ciudad de México.
- [27] Hernandez, J.N. (2018). Desarrollo de electrodos modificados para electrolisis alcalina y su acoplamiento a un reactor oxihidrogeno. (Tesis de Licenciatura). Escuela superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. IPN. Ciudad de México
- [28] NMX-AA-003-1980. (1980). NORMA MEXICANA NMX-AA-003-1980, AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social.
- [29] NMX-AA-09-SCFI-2000. (2000). NORMA MEXICANA NMX-AA-093-SCFI-2000, ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social.
- [30] NMX-AA-008-SCFI-2016. (2016). NORMA MEXICANA NMX-AA-008-SCFI-2016, ANÁLISIS DE AGUA.- MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.- MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social.
- [31] NMX-AA-034-SCFI-2015. (2015). NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua- medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social.
- [32] Guzmán, S.R. (2014). Degradación fotocatalitica de Cr(VI) en agua potable usando semiconductores de TiO₂ dopados con tungsteno (Tesis de Licenciatura). Escuela superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. IPN. Ciudad de México.
- [33] NMX-AA-051-SCFI-2001. (2001). NORMA OFICIAL MEXICANA NMX-AA-051-SCFI-2001. (2001). ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social
- [34] NOM-001-SEMARNATA-1996.NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites permisibles máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial, Secretaria de Trabajo y Prevención Social

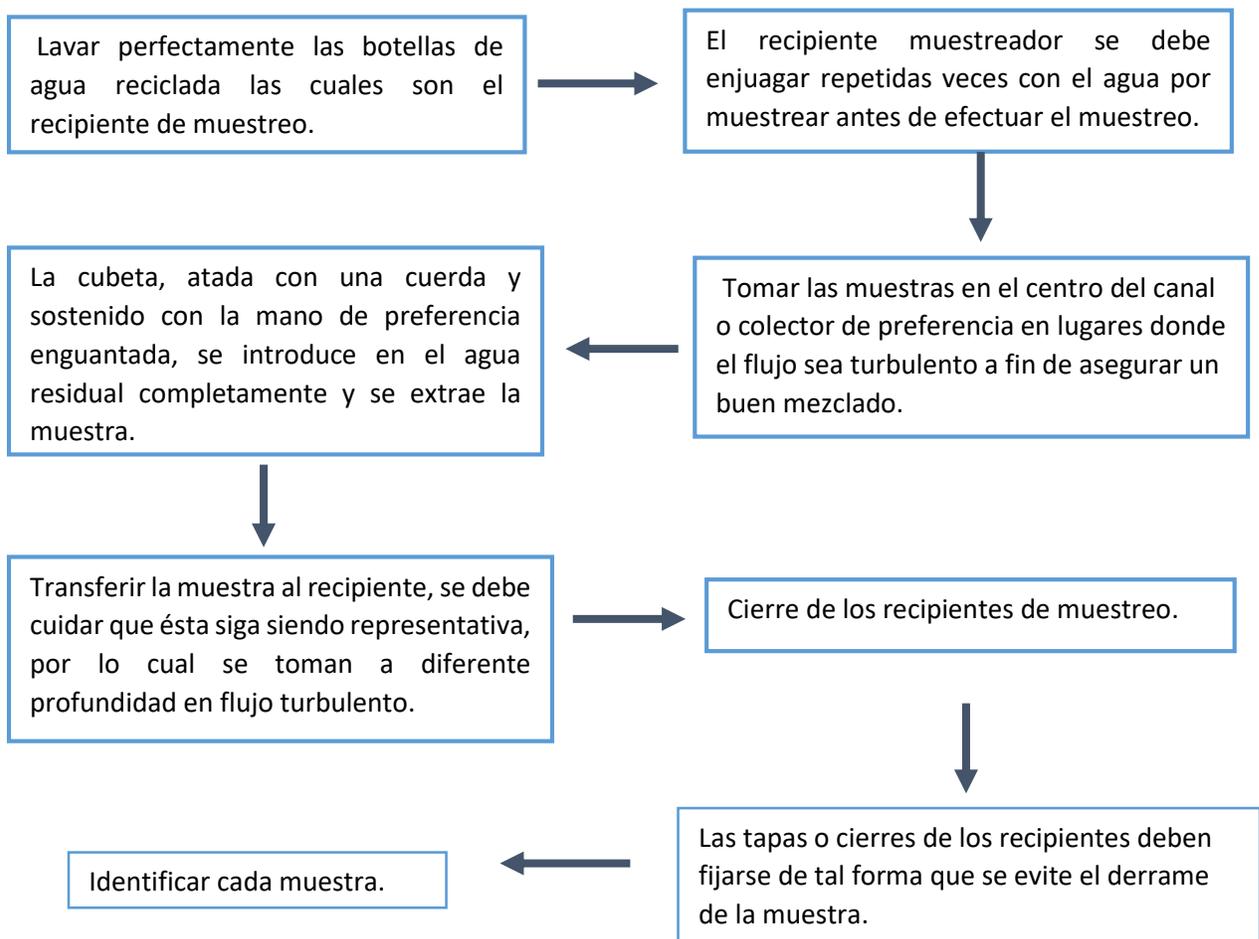
- [35] Jerry D. Wilson. Física. México Editorial reverte (2008), pág. 350-400
- [36] Generador de Hidrogeno de alta pureza. Mercado Libre. Consultado 10-04-2021. Recuperado de <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-692851681-generador-de-gas-hidrogeno-alta-pureza-0-500ml>
- [37] Hofftam electrolisi. Mercado Libre. Consultado 10-04-2021. Recuperado de <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-836610954-american-educational-7-500-hoffman-electrolisis-aparato-32- JM>
- [38] Kit Hidrógeno Celda Seca 29 placas. Consultado 10-04-2021. Recuperado de <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-859859406-kit-completo-hidrogeno-celda-seca-29-placas-10-cil-60-a-75>

ANEXOS

I.METODOLOGÍA DE MUESTREO

En los puntos determinados para toma de muestra se efectuó la recolección de 2 litros de agua residual. Utilizando un recipiente con capacidad de 2 litros perfectamente limpia para cada punto de muestreo, un metro de cuerda, embudo, una cubeta, guantes de nitrilo, cubrebocas, etiquetas y pluma. El procedimiento de muestreo se realizó acuerdo al diagrama de bloques 1. Finalmente, cada muestra se etiquetó con los siguientes; identificación de la descarga, número de muestra, fecha y hora de muestreo, punto de muestreo, nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo. De acuerdo a lo establecido en la norma NMX-AA-003-1980 AGUAS RESIDUALES. MUESTREO, mientras que los datos de identificación se vaciaron en la bitácora de laboratorio de nanomateriales y energía limpia para su posterior análisis [28].

Diagrama de bloques para la toma de muestra de agua residual de acuerdo con la NMX-AA-003-1980 AGUAS RESIDUALES. - MUESTREO.



II. ANÁLISIS FISCOQUÍMICO

A continuación se describen la metodología empleada mediante las normas mexicanas para la determinación de los parámetros de conductividad, resistencia, potencial de hidrógeno, sólidos totales, salinidad. En las cuales se describe el significado del parámetro, material, equipo y su correspondiente diagrama de bloques que detalla el paso a seguir para la medición correcta del parámetro.

II.1 Conductividad

La conductividad electrónica también denominada conductividad específica, es una medición de la capacidad que presenta una solución para conducir corriente eléctrica siendo un indicativo de la cantidad de iones contenida en una solución. Matemáticamente se define como la inversa de resistencia eléctrica ohmios y su unidad de medición son mhos; la millonésima parte de un mhos es igual a un micromhos o microsiems (μs). Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas.

La determinación de conductividad electrolítica de acuerdo con la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA, el procedimiento se describe a continuación [29].

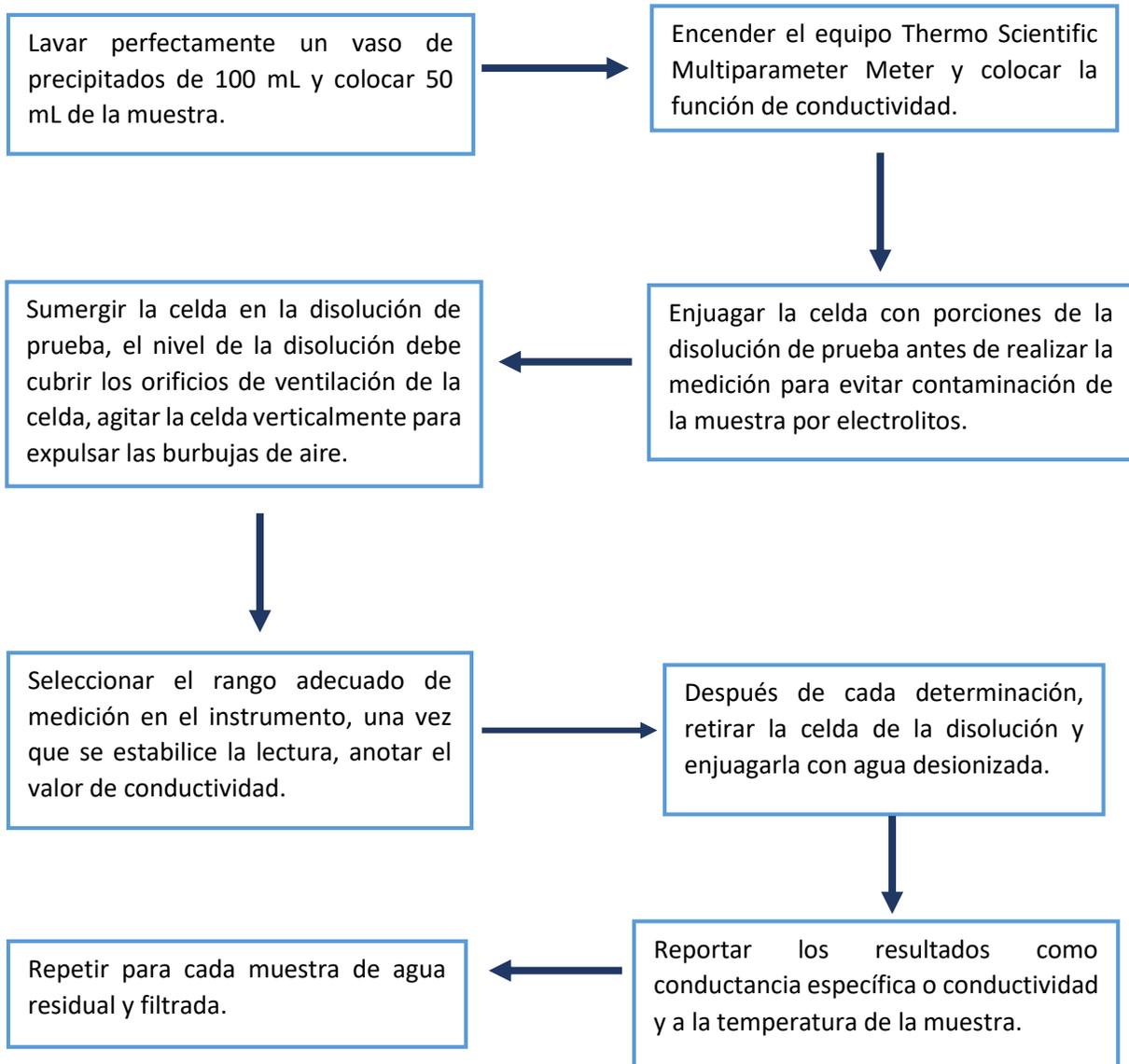
Material

- Vasos de precipitados de 100 mL
- Muestras de agua residual y filtrada cada una de 50 mL

Equipo

- Thermo Scientific Multiparameter Meter
- Electrodo de iones

Diagrama de bloques para la determinación de la conductividad electrolítica de acuerdo con la “NMX-AA-093-SCFI-2000”



II.2 Resistencia

Es la propiedad que tiene una sustancia de oponerse al paso de una corriente eléctrica originada por su diferencial de potencial, se expresa en ohms (Ω) de acuerdo a la ecuación 4. La resistencia de un conductor es inversamente proporcional a su área de sección transversal y directamente proporcional a su longitud.

$$R_s = \frac{1}{\mu}$$

Ecuación 4

Donde:

R_s = Resistencia específica de la muestra (Ohms)

μ = conductividad S/cm

El análisis de la resistencia óhmica se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-093-SCFI-2000, el procedimiento se describe a continuación [29].

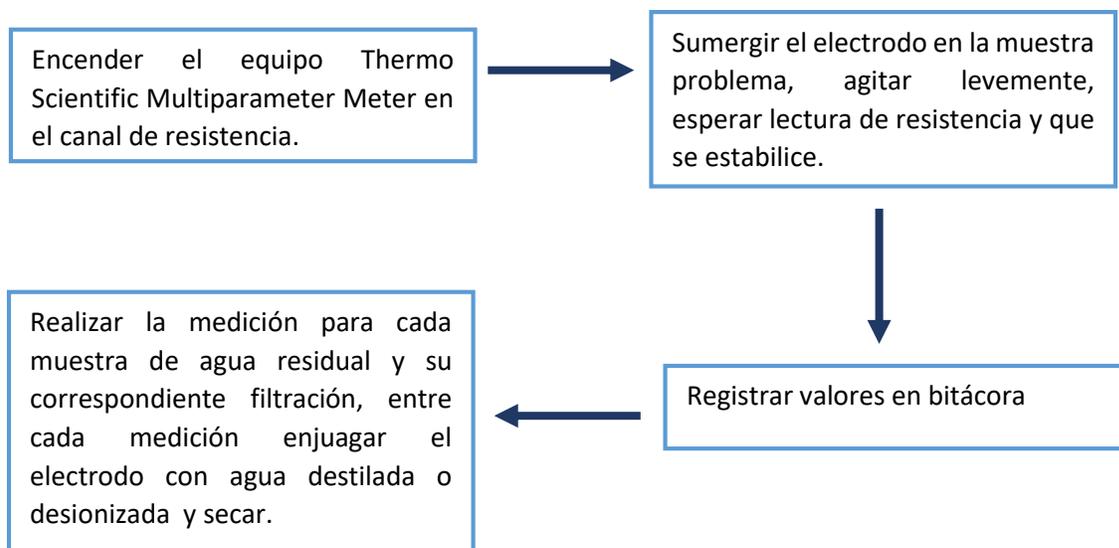
Material

- Vasos de precipitados de 100 mL
- Muestras de agua residual y filtrada cada una de 50 mL

Equipo

- Thermo Scientific Multiparameter Meter
- Electrodo de iones

Diagrama de bloques para la Determinación de resistencia óhmica de acuerdo con la "NMX-AA-093-SCFI-2000"



II.3 Potencial de hidrógeno

La magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la solución, la cual se encuentra en términos es la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución conforme la ecuación 5.

Donde:

$$pH = -\log a_H = -\log (m_H \gamma_H / m^\circ)$$

a_H : es la actividad relativa del ión hidrógeno (en base molar)

γ_H : es el coeficiente de actividad molal del ión hidrógeno H^+ a la molalidad

m_H, m° es la molalidad estándar.

Ecuación 5

Se realizó la determinación del potencial de Hidrógeno de acuerdo a la norma NMX-AA-008-SCFI-2016 "ANÁLISIS DE AGUA. - MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS" a continuación se muestra el procedimiento [30].

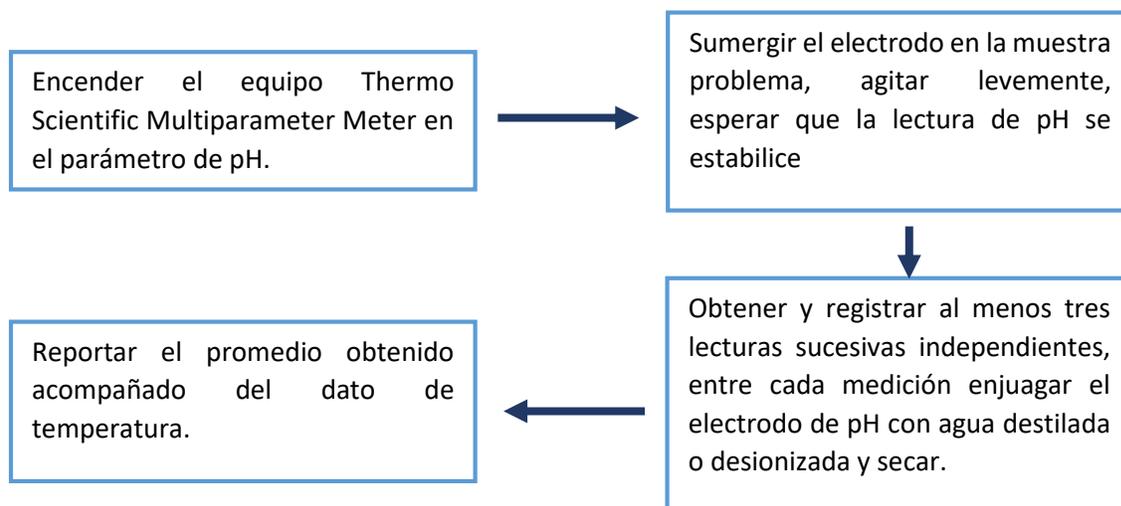
Material

- Vasos de precipitados de 100 mL
- Muestras de agua residual y filtrada cada una de 50 mL

Equipo

- Thermo Scientific Multiparameter Meter
- Electrodo de iones

Diagrama de bloques para la determinación de potencial de hidrógeno de acuerdo con la "NMX-AA-008-SCFI-2016"



II.4 Sólidos totales disueltos

Los TDS (Sólidos Disueltos Totales - Total dissolved solids) son la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua. Esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea la molécula de agua pura (H_2O) y sólidos en suspensión. En general, la concentración de sólidos disueltos totales es la suma de los cationes (carga positiva) y aniones (cargado negativamente) iones en el agua. El total de sólidos disueltos es una medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión micro-granular (sol coloide). Los componentes químicos más comunes en los TDS son el calcio, fosfatos, nitratos, sodio, potasio y cloruro, que se encuentran en la escorrentía de aguas pluviales.

A continuación, se muestra el procedimiento para la determinación de solidos totales disueltos de acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. “ANÁLISIS DE AGUA- MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS” [31].

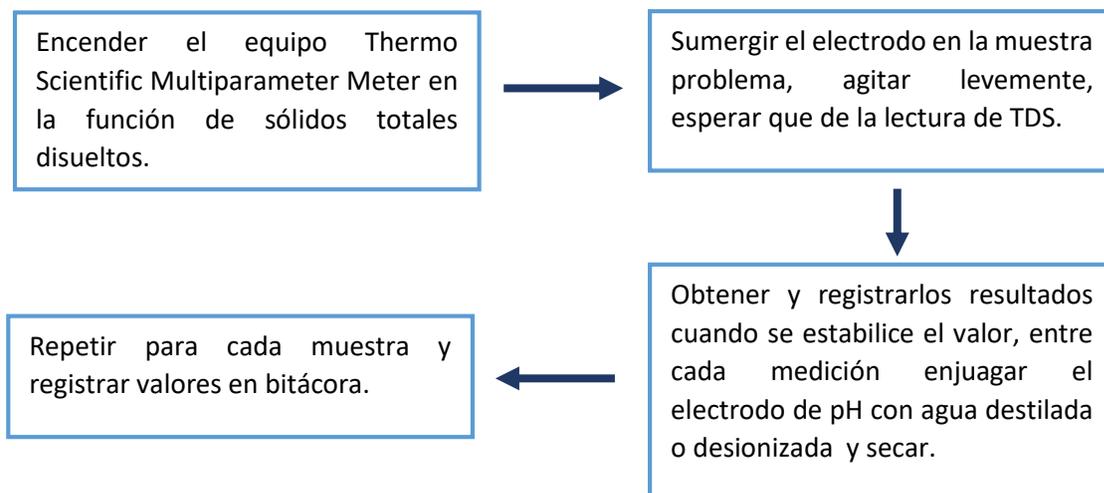
Material

- Vasos de precipitados de 100 mL
- Muestras de agua residual y filtrada cada una de 50 mL

Equipo

- Thermo Scientific Multiparameter Meter
- Electrodo de iones

Diagrama de bloques para el análisis de TSD aplicando la “NMX-AA-034-SCFI-2015”



II.5 Salinidad

La salinidad se define como el total de sales disueltas en el agua del mar. Solamente seis iones componen cerca del 99% de los sólidos disueltos cloro, sodio, magnesio, azufre, calcio, potasio, bromo, estroncio, boro y flúor. El sodio y el cloro constituyen casi el 85%, la técnica que permite medir la cantidad de salinidad presente en una muestra es su medición en un pHmetro puesto que está relacionada con la conductividad eléctrica que presenta.

El análisis se efectuó de acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. “ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.” a continuación se muestra el procedimiento [31].

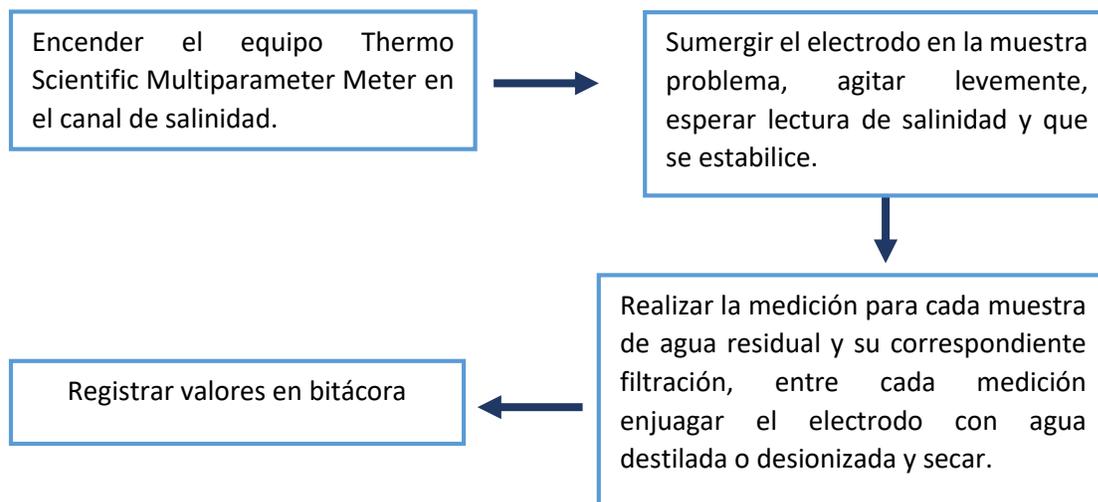
Material

- Vasos de precipitados de 100 mL
- Muestras de agua residual y filtrada cada una de 50 mL

Equipo

- Phmetro Thermo Scientific Multiparameter Meter
- Electrodo de iones

Diagrama de Bloques “Determinación de Salinidad en muestras de aguas residuales y su correspondiente filtrada aplicando la NMX-AA-034-SCFI-2015”



III. CUANTIFICACIÓN DE METALES

III.1 Polarografía diferencial de pulsos

En este método se mide la corriente que circula en función del potencial del electrodo de trabajo ya que esta corriente suele ser proporcional a la concentración del analíto. La instrumentación necesaria requiere de tres electrodos en la celda sumergidos en una disolución que contienen el analíto, siendo el electrodo de trabajo una gota de mercurio suspendida del extremo de un tubo capilar de vidrio y en cuya superficie (gota de mercurio) el analíto puede ser oxidado o reducido. La corriente circula en un electrodo auxiliar de platino y como electrodo de referencia se utiliza un electrodo de KCl. El potencial de la gota de mercurio se mide con respecto al electrodo auxiliar por el cual circula una corriente que se puede considerar despreciable [32].

Para las muestras de Ajacuba, Atitalaquia, Miuiahuala y Tetepango filtradas por GIMFI se analizaron de acuerdo el siguiente procedimiento.

Material

- Matraces aforados de 100 mL
- Pipetas volumétricas de 1 y 4 mL
- Vasos de precipitados de 100 mL

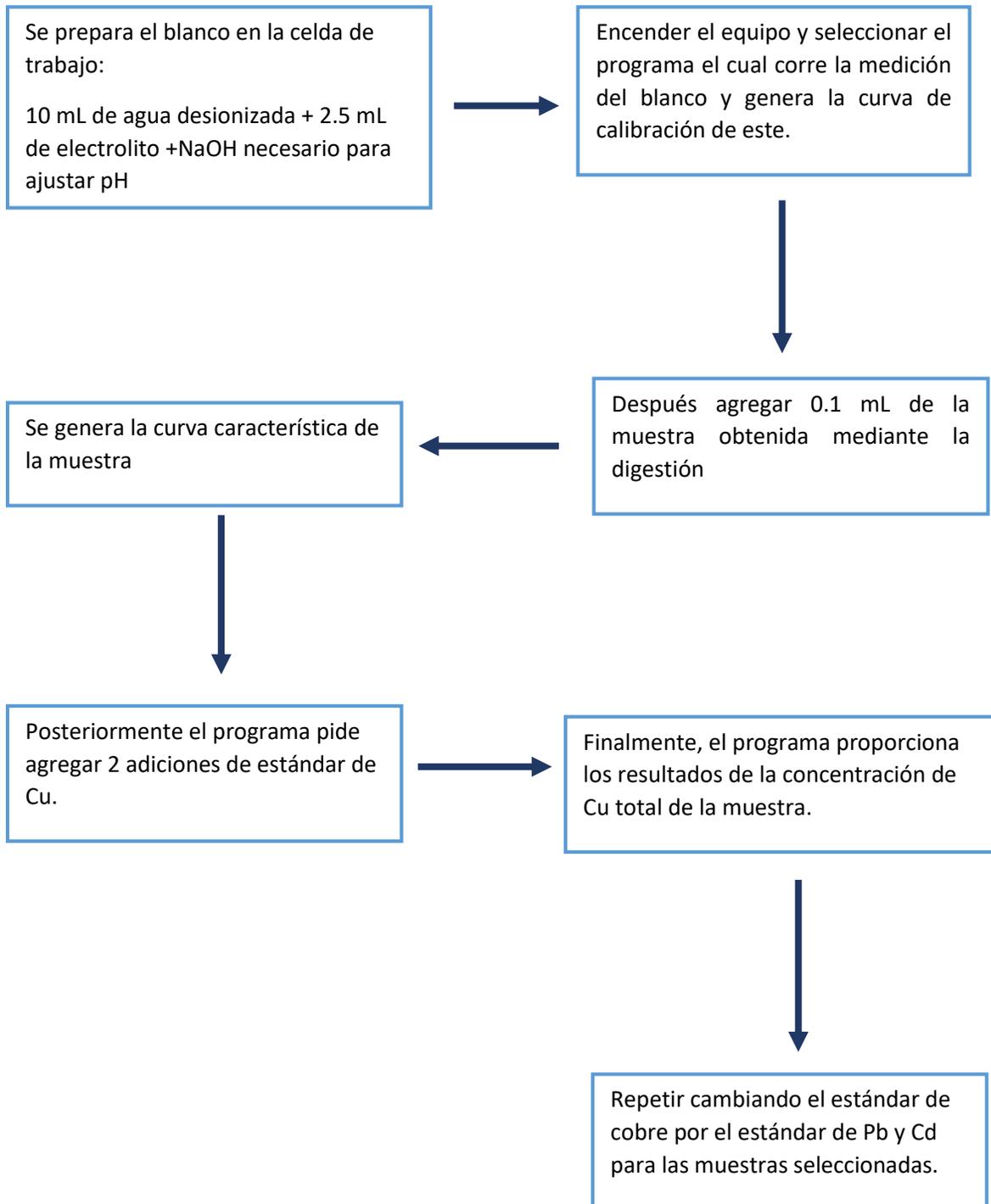
Reactivos

- Agua desionizada
- Electrolito
- NaOH necesario para ajustar un pH a 6.2

Equipo y condiciones de operación

- Electrodo de trabajo: HMDE
- Velocidad de agitación: 20000 rpm
- Modo: DP
- Tiempo de purga: 600 s
- Potencial de deposición: -10000 mV
- Tiempo de deposición: 10 s
- Tiempo de equilibrio: 50 mV
- Potencial inicial: -1000 mV

Diagrama de bloque para la caracterización de Cd y Pb mediante la polarografía diferencial de pulsos.



III.2 Absorción atómica

La espectrometría de absorción atómica es una técnica para determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra. Este método está basado en la atomización del analito en matriz líquida y que utiliza comúnmente un nebulizador pre-quemador (o cámara de nebulización) para crear una niebla de la muestra y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga, en caso de que la transmisión de energía inicial al analito sea por el método "de llama". La niebla atómica es desolvatada y expuesta a una energía a una determinada longitud de onda emitida ya sea por la dicha llama, o una Lámpara de Cátodo hueco construida con el mismo analito a determinar o una Lámpara de Descarga de Electrones (EDL).

En las muestras de agua filtrada por GIMFI se realizó la determinación de Cu de acuerdo a la norma NMX-AA-051-SCFI-2001 Análisis De Agua - Determinación De Metales Por Absorción Atómica En Aguas Naturales, Potables, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba, el procedimiento se describe a continuación [33].

Material

- Matraces aforados de 100 mL
- Pipetas volumétricas de 1 y 4 mL
- Vasos de precipitados de 100 mL
- Pipetas Pasteur

Reactivos

- Agua desionizada
- Cu metálico de alta pureza
- HNO₃ Q.P.
- HNO₃ al 1%

Equipo y condiciones de operación

- Equipo: Perkin Elmer precisely. A. Analyst 200 Atomic Absorption Spectrometer
- Longitudes de onda: 324.75 nm
- Combustible: Acetileno.
- Comburente: Aire comprimido.

Diagrama de bloques para la preparación de la muestra de acuerdo con la “NMX-AA-051-SCFI-2001”

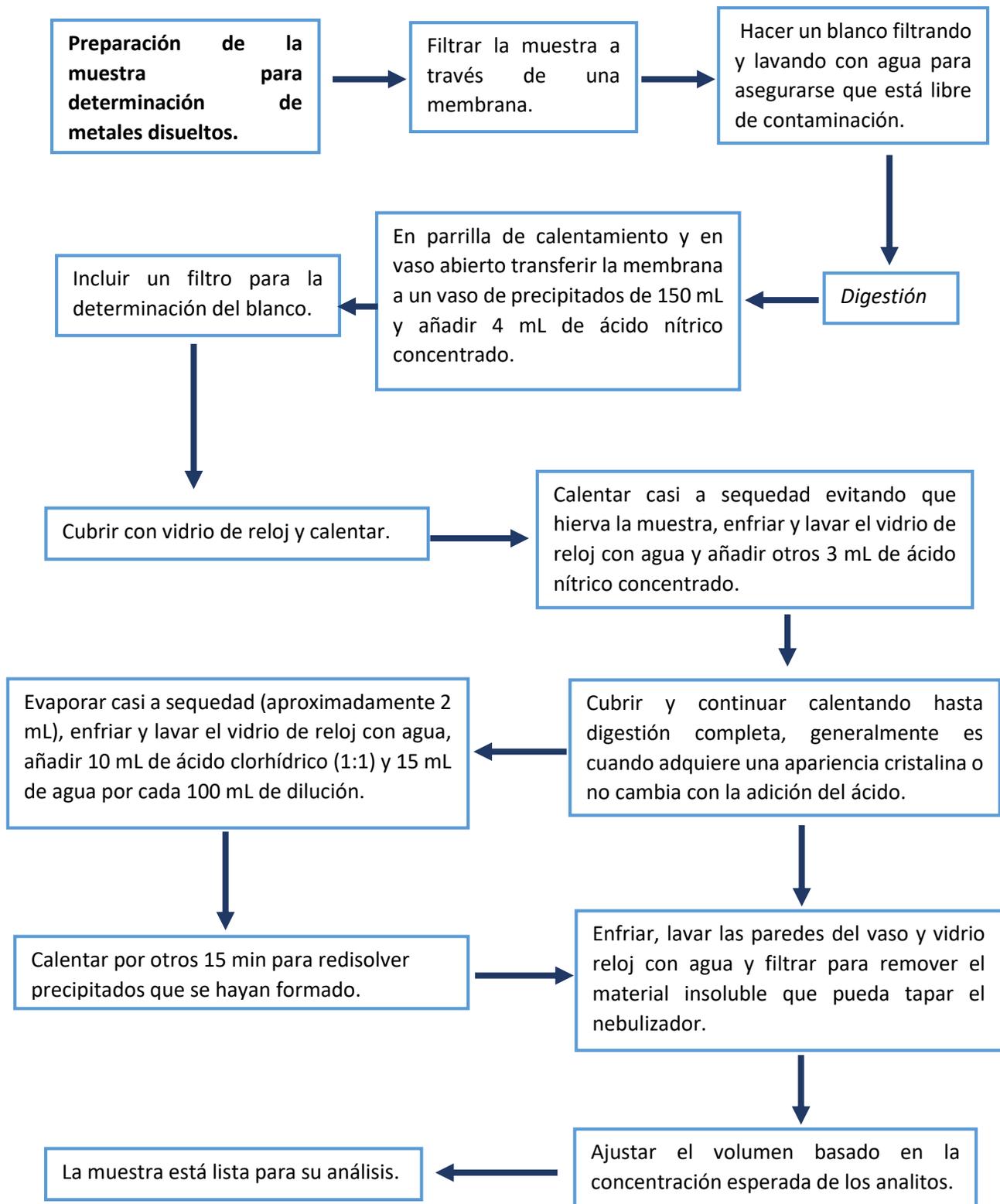
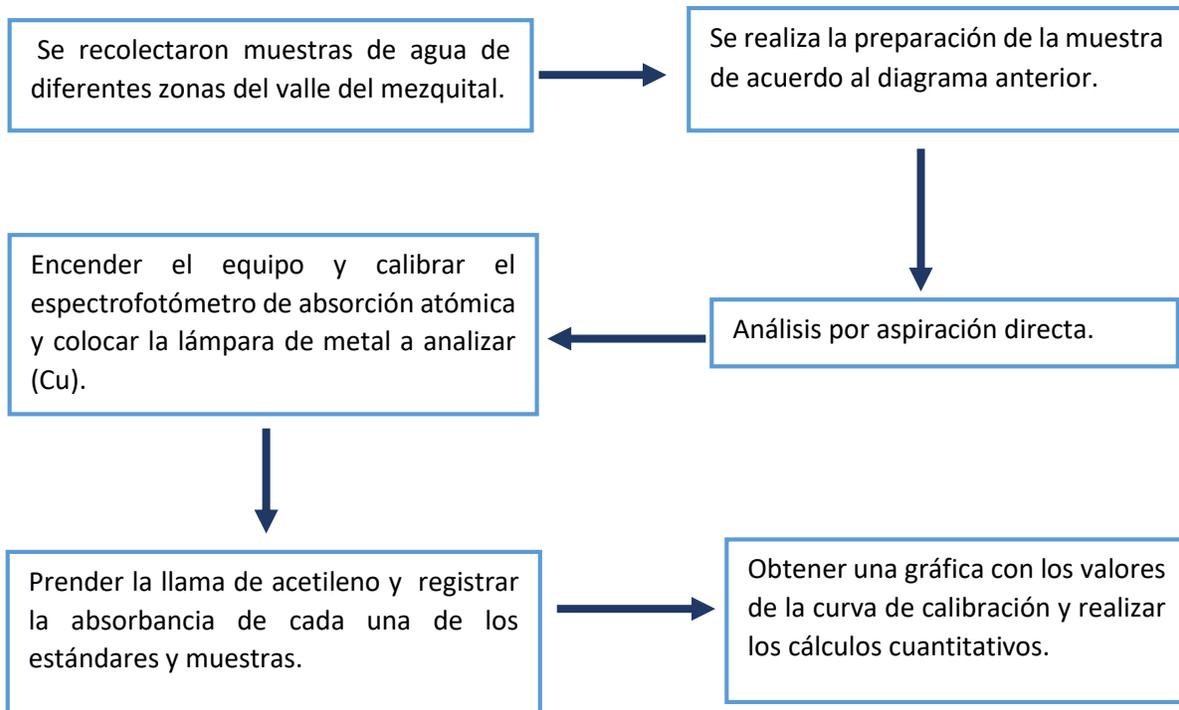


Diagrama de bloques para la medición del metal Cu por absorción atómica de acuerdo con la “NMX-AA-051-SCFI-2001”



Se trabajó con estándares de 0.1 a 1.3 ppm obteniendo por triplicado la absorbancia de la tabla 13 para generar una absorbancia promedio.

Tabla 13 Absorbancia promedio para cada estándar

Estándar	Absorbancia1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia promedio
0.1	0.031	0.031	0.031	0.031
0.3	0.068	0.065	0.067	0.067
0.7	0.143	0.144	0.143	0.143
1	0.18	0.179	0.179	0.179
1.3	0.256	0.257	0.256	0.256

Con los resultados anteriores se realiza la curva de calibración que se presenta en la gráfica de la figura 40.

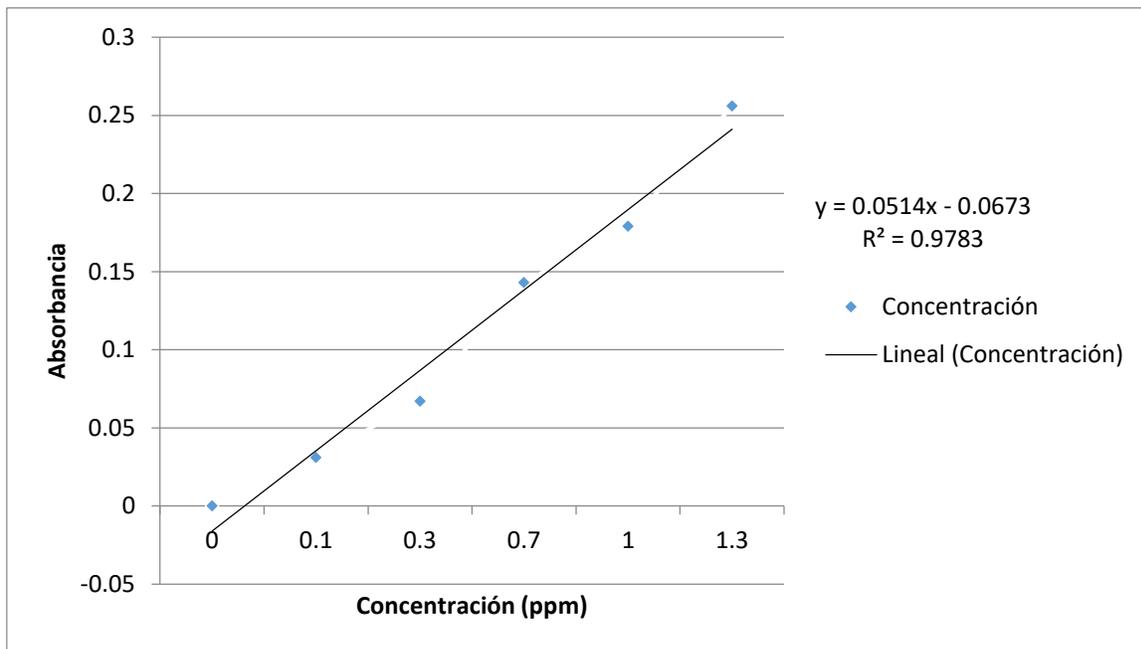


Figura 40. Curva de calibración de Cu.

Con la medición experimental de la absorbancia se generan la ppm contenidas de cobre de acuerdo al cálculo de la ecuación 3

$$\text{Concentración} = \text{Concen. 1} + \frac{\text{Abs}_x - \text{Abs}_1}{\text{Abs}_2 - \text{Abs}_1} (\text{Conc. 2} - \text{Conc. 1})$$

Ecuación 6

La NOM-001-SEMARNATA-1996 establece los límites permisibles de los metales más contaminantes en la tabla 14 para la descarga de aguas residuales que se utilizan en el riego de campo agrícola, encontrando el parámetro del cobre [34].

Tabla 14. Límites permisibles para metales pesados de acuerdo a la NOM-001-SEMARNATA-1996

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
(miligramos por litro)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.
P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

IV. PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA GASEOSA HIDRÓGENO-OXÍGENO

IV.1 Recolección de gases sobre agua

La medición de un gas se puede realizar por el desplazamiento que se ejerce sobre el agua aplicando el principio de Arquímedes: *“Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado”*

El principio se base en:

El estudio de las fuerzas sobre una porción de fluido en equilibrio con el resto del fluido. La sustitución de dicha porción de fluido por un cuerpo sólido de la misma forma y dimensiones El principio de Arquímedes no solo se refiere a los cuerpos sumergidos en líquidos, sino que también es válido cuando se encuentran en el interior de los gases.

En la figura 41 se puede observar de manera gráfica el principio de Arquímedes que se aplicó para la recolección de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno [35].

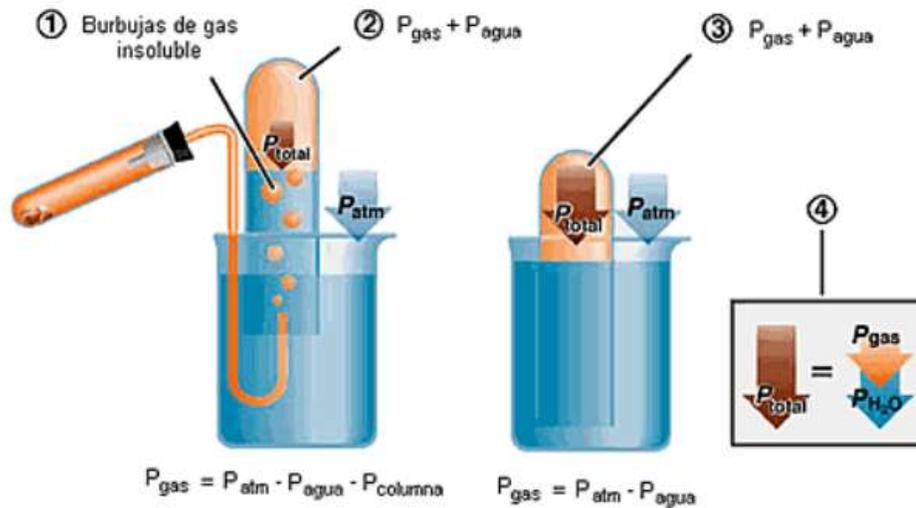


Figura 41 Recolección de gases sobre agua

A continuación, se describe el procedimiento para la cuantificación del gasto volumétrico de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno aplicando el principio de Arquímedes.

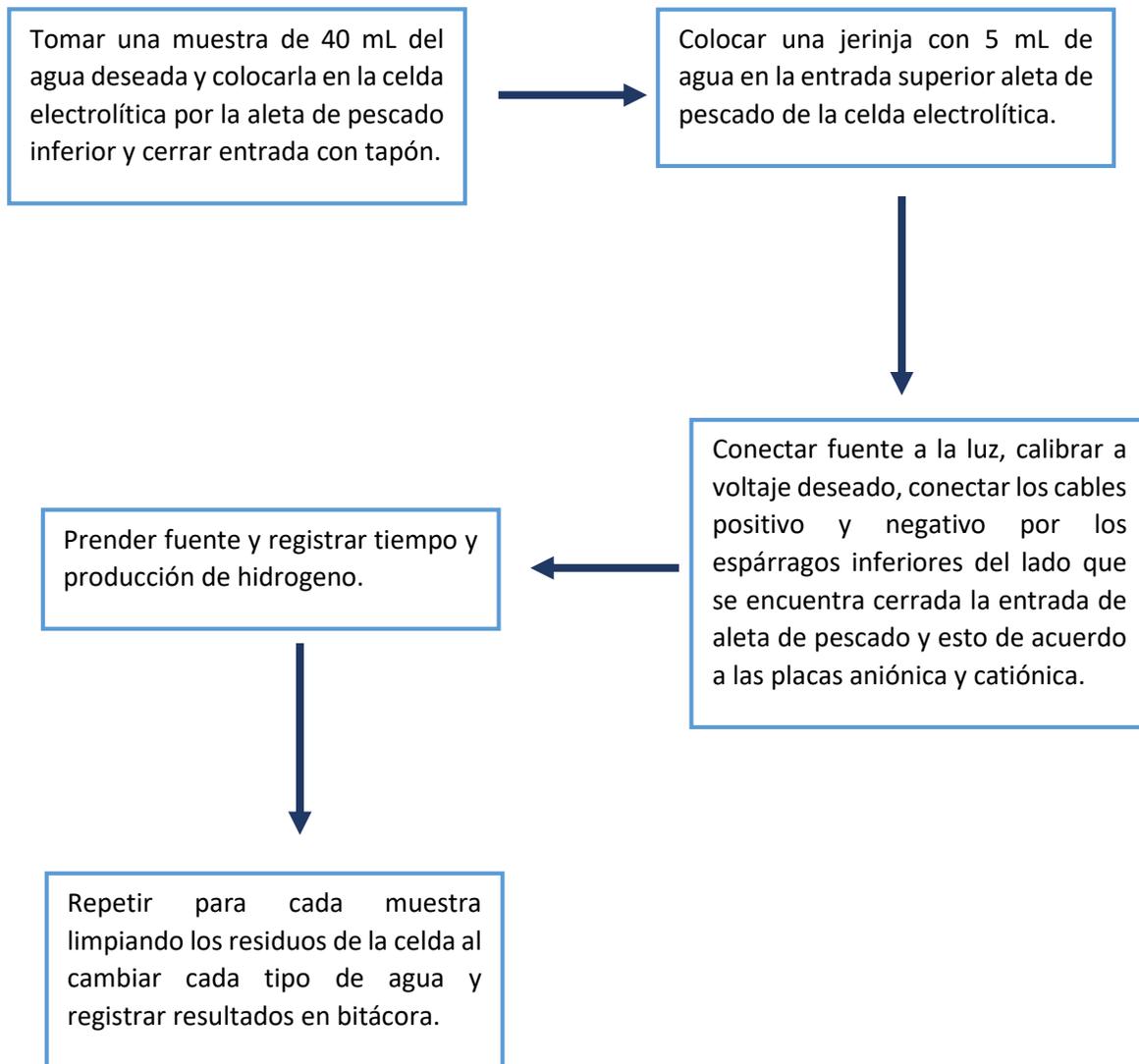
Material

- Jeringa de 50 mL
- Muestras de agua filtrada, potable, des ionizada (cada muestra aprox. 50mL)
- Pinza tipo caiman

Equipo y condiciones de operación

- Prototipo de Celda electrolítica
- Fuente de podercon regulación de voltaje en un rango de 20 a 40 volts

Diagrama de bloques para la producción de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno



V.COSTOS

V.1 Comparativa de GIMFI con equipos en el mercado

En el mercado podemos encontrar sistemas de producción de hidrógeno con diferentes características, pero los costos de compra son elevados en comparación con los costos de elaboración de GIMFI, a continuación, se describen los tres tipos encontrados en el mercado en las figuras 42, 43 y 44 así como las tablas de costo del material para la fabricación de GIMFI.



Características:
Precio: \$ 43 399
Marca: HGH-Hydrogen Generator
Voltaje: 180 v
Frecuencia:60 Hz

Figura 42. Generador de Hidrógeno de alta pureza

[36]



Características:
Precio: \$ 37 757
Marca: American Education

Figura 43. Hofftam electrólisis

[37]



Características:
Precio: \$ 6399
Marca: Celda Seca DRY
Celda de 21 placas

Figura 44. Kit Hidrógeno Celda Seca 29 placas

[38]

Las tablas 15-18 muestran por separado el material requerido, especificación y costo para la elaboración del prototipo de filtro, el prototipo de electrolizador y sistema acoplado para formar a GIMFI.

Tabla 15 Costos Filtro GIMFI

Prototipo de filtro			
Cantidad		Material	Precio (pesos)
500	g	Mármol	\$7.00
500	g	Tezontle	\$3.00
500	g	Arena	\$3.00
500	g	Carbón activado	\$40.00
500	g	Grava	\$3.00
200	g	Algodón	\$1.50
30	cm ²	Malla	\$2.00
2	piezas	Botella de plástico reciclada	\$2.00
2	l	Agua residual	\$0.00
100	mL	Acetona	\$2.00
100	mL	Alcohol	\$3.50
Total=			\$67.00

Tabla 16 Costos Celda GIMFI

Prototipo electrolizador			
Cantidad	Especificación	Material	Precio (pesos)
1	pieza de 1m ²	Placa de acero	\$80.00
1	pieza 0.5 m ²	placa de acrílico	\$20.00
1	pieza de 1m	Varilla roscada	\$2.00
12	piezas	Tuerca de 1/8	\$10.00
8	piezas	Rondanas	\$8.00
2	piezas	Conexión aleta de pescado	\$120.00
8	piezas	Anillo de caucho O-ring	\$180.00
Total=			\$420

Tabla 17 Costos sistema de acoplamiento GIMFI

Sistema Acoplado Filtro- Electrolizador			
Cantidad	Especificación	Material	Precio (pesos)
0.5	m	Manguera industrial transparente	\$3.50
0.3	m	Manguera de hule látex	\$12.00
2	piezas	Conexión aleta de pescado	\$120.00
3	piezas	Frasco de plástico con tapa hermética	\$45.00
2	piezas	Válvula	\$10.00
Total=			190.50

Finalmente se muestra en la tabla 19 la sumatoria de los prototipos que generan el sistema denominado GIMFI.

Tabla 18 Costo final de GIMFI

Precio final	
Prototipo filtro	\$67.00
Prototipo electrolizador	\$420.00
Sistema acoplado filtro- electrolizador	\$190.50
Fuente de poder	\$200.00
Total=	\$877.50

V.2 Costo energético para la producción

Estableciendo un voltaje de 30 volts y una intensidad de corriente de 15 Amperes, dado que con estas condiciones de operación se obtiene una producción constante para las muestras analizadas, la ecuación 11 nos indica la forma de obtener la potencia.

$$P = I * V \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

P= Potencia (Watt)

I= Intensidad eléctrica (A)

V=Voltaje (V)

Estableciendo una producción de 100 cm³/s de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno para las muestras de agua: Atitalaquia filtrada por GIMFI, corriente, potable y desionizada filtrada, se genera en diferente tiempo de producción y de acuerdo con el precio energético en el presente año de \$0.839 Kw/h de acuerdo al sitio web de CFE, se obtuvo la tabla 20 donde se especifica el tipo de agua, los Kw-h que requiere y el precio que genera.

Tabla 19 Costo energético para diferentes muestras a una misma producción

Muestra de agua	Producción Hidrógeno-Oxígeno cm ³ /s	Tiempo (h)	kW-h	Costo (pesos) 2021
Atitalaquia filtrada por GIMFI	100.000	3.7037	1.6667	1.40
Corriente	100.000	7.6923	3.4615	2.90
Desionizada filtrada por GIMFI	100.000	21.5517	9.6983	8.14
Potable	100.000	8.3333	3.7500	3.15

VI. GLOSARIO

Acero. Aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono y que adquiere con el temple gran dureza y elasticidad.

Agua negra. Aguas servidas o aguas cloacales estas están contaminadas en su mayoría por muestras fecales circulan por el sistema de alcantarillado.

Aguas residuales. Líquido de composición variada proveniente de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada, y que por tal motivo haya sufrido degradación o alteración en su calidad original.

Análisis de blanco analítico. Es el someter una alícuota de agua reactiva a todo el proceso de análisis por el cual pasa una muestra real. Los laboratorios deben realizar los análisis de blancos para corregir la señal de fondo del sistema de medición. El análisis de blancos se debe realizar en forma periódica o con cada lote de muestras según lo requiera el método.

Blanco. Agua reactivo o matriz equivalente a la que no se le aplica ninguna parte del procedimiento analítico y sirve para evaluar la señal de fondo.

Canal abierto. Cualquier conducto en el cual el agua fluye presentando una superficie libre.

Conexión tipo aleta de pescado. Conexión de teflón, desviadora con aleta bidireccional.

Conductancia. Es la propiedad que tiene una sustancia de permitir el paso de la corriente eléctrica originada por una diferencia de potencial. Se expresa en siemens (S) equivalente a Ohm a la menos uno (Ω^{-1}).

Varilla roscada. Son tornillos sin cabeza que van roscados en sus dos extremos con diferente longitud roscada, entre los cuales, hay una porción de vástago sin roscar. El extremo roscado corto permanece atornillado en la pieza que se considera fija, mientras que en el otro extremo se atornilla la tuerca que proporciona la unión.

Anillo de caucho (O-ring). Aro sello, aro de goma, junta redonda previene pérdidas y escapes de gases o fluidos presentando las siguientes ventajas: sellan en diversos rangos de presiones y temperaturas, no necesitan ajustes, requieren espacios reducidos y son económicos.

pHmetro: Equipo electrónico para medición del ph o más parámetros fisicoquímicos como conductividad, resistividad o salinidad con una resolución de lectura de al menos 0.01 unidades.

VII.RELACIÓN DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
Ag	Plata
AgCl	Cloruro de Plata
Cd	Cadmio
cm	Centímetros
Cu	Cobre
g	gramo
Gv	Gasto volumétrico
Hg	Mercurio
H-O	Mezcla de Hidrógeno-Oxígeno gaseosa
l	Litro
mg	Miligramos
mhos	Micro Ohmio unidad de resistencia eléctrica.
mL	Mililitros
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
OHM	Ohmio unidad de resistencia eléctrica
Pb	Plomo
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
PSU	Unidad practica de salinidad (gramos de sal por litro)
TDS	Solidos totales disueltos
US	Micro siemes unidad de conductividad eléctrica
V	Volts

VIII.RECONOCIMIENTOS OTORGADOS



IPN

2018
ExpoCiencias Metropolitana
Abril 2018

ESIME

El comité organizador de
ExpoCiencias Metropolitana 2018
OTORGA EL PRESENTE
Reconocimiento

A: Lisset Dayanira Neri Pérez

Por haber obtenido el **SEGUNDO LUGAR**, como Participante en el área Exactas y Naturales categoría Superior en ExpoCiencias Metropolitana 2018. Sede Unidad Académica ESIME Culhuacan

Carlos Aquino Ruiz
Ing^o Carlos Aquino Ruiz
Director Interino de la ESIME Culhuacan, IPN
Presidente del patronato de ExpoCiencias Metropolitana

M. en C. Roberto Hidalgo Rivas
M. en C. Roberto Hidalgo Rivas
Presidente del MILSET
Director de la RED Nacional de Actividades Juveniles en Ciencia y Tecnología

M. en C. Maria de los Angeles Escobar Pérez
M. en C. Maria de los Angeles Escobar Pérez
Directora de ExpoCiencias Metropolitana
RED Nacional de Actividades Juveniles en Ciencia y Tecnología

IPN **UPAEP** **RED** **Somedicyt** **SI UNIVIA** **CONACT** **SI UNIVIA** **CONACT**

RED **IPN** **UPAEP** **Somedicyt** **SI UNIVIA** **CONACT**





El Gobierno del Estado de Michoacán,
a través del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación
con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,

otorga la presente

CONSTANCIA

a: **Lisset Dayanira Neri Pérez**

Por su participación en la arena Expo Talento con el proyecto
“GIMFI, Obtención de combustible renovable a partir de agua residual”

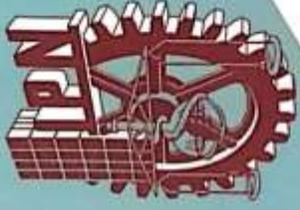
En el marco de las actividades del

iINNOVATION >>> FEST

Morelia, Michoacán - 16 de marzo de 2019.

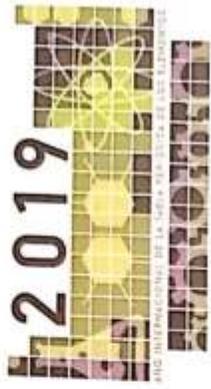



Dr. José Luis Montañez Espinosa
Director General del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación


2019
ExpoCiencias Metropolitana
19 al 22 de marzo de 2019

El comité organizador de
ExpoCiencias Metropolitana 2019
**OTORGA EL PRESENTE
Reconocimiento**

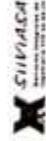
A: Lisset Dayanira Neri Pérez

Por su DESTACADA participación y por haber obtenido el PRIMER LUGAR, como Participante en el área Exactas y Naturales categoría Superior, con el trabajo "Gimfi, obtención de combustible renovable con agua residual" en ExpoCiencias Metropolitana 2019. Sede Unidad Académica ESIME Culhuacan


Dr. José Velázquez López
Director Interino de la ESIME Culhuacan, IPN
Presidente del Patronato
de ExpoCiencias Metropolitana


M. en C. Roberto Hidalgo Rivas
Presidente del MILSET
Director de la RED Nacional de Actividades
Juveniles en Ciencia y Tecnología


M. en C. María de los Angeles Escobar Pérez
Directora de ExpoCiencias Metropolitana
RED Nacional de Actividades Juveniles
en Ciencia y Tecnología





EL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
a través de la Dirección de Investigación



otorga la presente

Constancia

a:

Lisset Dayanira Neri Pérez

Por su participación en el XIV Foro presentando la Ponencia Oral:

"Gimfi. Obtención de Combustible Renovable a Partir de Agua Residual"

Ciudad de México, a 13 de agosto de 2019

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Dra. Laura Arreola Mendoza
Directora de Investigación



