

**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA EN UNA PTAR
PILOTO QUE APLICA LA TECNOLOGÍA DE LAS CÉLULAS DE FLUJO
IÓNICO SELECTIVO (CFIS)**

JONNATHAN DAVID BASTIDAS OBANDO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2022

**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA EN UNA PTAR
PILOTO QUE APLICA LA TECNOLOGÍA DE LAS CÉLULAS DE FLUJO
IÓNICO SELECTIVO (CFIS)**

JONNATHAN DAVID BASTIDAS OBANDO
Trabajo de grado para optar al título de Químico

Director:
JUAN JOSE LOZADA CASTRO
Doctor en Química Analítica

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2022

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo N°. 324 de Octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Juan José Lozada Castro

Director

David Arturo Perdomo

Jurado

Jhon Jairo Ríos Acevedo

Jurado

San Juan de Pasto, 28 de noviembre de 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por brindarme su total apoyo y por sus demostraciones de amor y confianza.

A mis abuelos quienes con su cariño me apoyaron en todas mis decisiones y en el arduo camino.

A mi compañera de vida por todo su amor y su apoyo incondicional para que a través de los años nuestra relación se fortalezca y forjemos una hermosa vida juntos.

Al Maestro Juan José Lozada Castro por su orientación, su completa colaboración durante el desarrollo del trabajo de grado, su valiosa amistad y por sus enseñanzas de vida.

A los integrantes del grupo de investigación Estudio de Sistemas Contaminantes.

A los profesores y laboratoristas por sus enseñanzas académicas y su atención prestada.

A mis amigos y compañeros por su apoyo académico y personal.

A los señores jurados por su tiempo y sus recomendaciones.

A la Universidad de Nariño por acogerme durante mi formación.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evaluó la capacidad de tratar aguas residuales sintéticas y reales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) piloto que utiliza la tecnología de las Células de Flujo Iónico Selectivo (CFIS) (patente SIC título 37239, Juan José Lozada Castro), para ello se realizó un diseño experimental con muestras de aguas residuales sintéticas preparadas en el laboratorio, así como también, una prueba con agua residual real para así determinar las mejores condiciones en el tratamiento de dichas aguas mediante ésta tecnología, se usó como factor relevante el flujo de la muestra y como variables de respuesta la producción de hidrógeno y parámetros fisicoquímicos básicos de calidad del agua residual para vertimientos.

Los resultados obtenidos muestran que el mejor flujo para tratar las aguas residuales sintéticas fue 50 mL/min con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 5,33 horas, reduciendo parámetros de calidad de agua residual sintética como el DQO en un 90,54%, grasas y aceites en 93,8%, color aparente en 90,7%, color verdadero en 85,4%, conductividad en 80,9% y sólidos totales en 83,7% los cuales cumplen con la resolución No. 0631 de 2015 para vertimientos; la muestra de agua residual real se trató bajo el flujo que presentó los mejores resultados para las muestras sintéticas, se logró reducir la carga de materia orgánica en un 86,14%, mostrando así que se trata de una tecnología adecuada para el tratamiento de aguas residuales y que puede aportar información relevante para su posterior aplicación en muestras de agua residual domestica real a gran escala con aproximaciones de tiempo de retención para una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de alto flujo.

En cuanto al hidrógeno producido a partir del tratamiento de las aguas residuales con la tecnología de las células de flujo iónico selectivo (CFIS) se obtuvo una producción máxima de 3,53 moles de hidrogeno por hora, mostrando así una alta viabilidad para ser aplicada en una PTAR municipal, puesto que al mismo tiempo en que se trata un problema de contaminación de fuentes hídricas, se produce un combustible alternativo que puede ser comercializado o utilizado como fuente de energía.

ABSTRACT

This research evaluated the capacity to treat synthetic and real wastewater in a pilot wastewater treatment plant (WWTP) using the Selective Ion Flow Cells (SIFC) technology (SIC patent title 37239, Juan José Lozada Castro), to do this, an experimental design was carried out with samples of synthetic wastewater prepared in the laboratory, the relevant factor used was flow of the sample and the response variables were hydrogen production and basic physicochemical parameters of wastewater quality for discharges.

The results obtained show that the best flow to treat synthetic wastewater was 50 mL/min with a hydraulic retention time (HRT) of 5.33 hours, reducing synthetic wastewater quality parameters such as COD by 90.54%, fats and oils by 93.8%, apparent color by 90.7%, true color by 85.4%, conductivity by 80.9% and total solids by 83.7% which comply with resolution No. 0631 of 2015 for discharges; the real wastewater sample was treated under the flow that presented the best results for synthetic samples, it was possible to reduce the organic matter load by 86.14%, thus showing that this is a suitable technology for wastewater treatment and that it can provide relevant information for subsequent application in real large-scale domestic wastewater samples with retention time approximations for a high-flow wastewater treatment plant (WWTP).

Regarding the hydrogen produced from wastewater treatment with selective ionic flow cell technology (SIFC), a maximum production of 3.53 moles of hydrogen per hour was obtained, thus showing a high feasibility to be applied in a municipal WWTP, since at the same time that a problem of contamination of water sources is treated, an alternative fuel is produced that can be marketed or used as a source of energy.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	15
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1.	Objetivo general.....	18
2.2.	Objetivos específicos.....	18
3.	ESTADO DEL ARTE.....	19
3.1.	Marco teórico.....	19
3.1.1.	Las aguas residuales.....	19
3.1.1.1.	Aguas residuales domésticas.....	19
3.1.1.2.	Aguas residuales industriales.....	20
3.1.2.	Métodos electroquímicos de obtención de hidrogeno.....	20
3.1.3.	Tecnología de las células de flujo iónico selectivo (CFIS).....	21
3.1.4.	Parámetros de vertimientos en Colombia.....	22
3.2.	Antecedentes.....	24
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1.	Materiales, equipos y reactivos.....	27
4.2.	Construcción e implementación de PTAR piloto.....	28
4.2.1.	Construcción de la PTAR piloto.....	28
4.2.2.	Fabricación de las CFIS.....	30
4.2.3.	Preparación de muestra de agua residual sintética.....	31
4.2.4.	Puesta en marcha de la PTAR piloto.....	32
4.2.5.	Corrida de muestras de ARD sintéticas para el diseño experimental.....	33
4.2.6.	Corrida de muestra de ARD real en la PTAR piloto.....	34
4.2.7.	Recolección y cuantificación de hidrógeno.....	34
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	35
5.1.	Calibración y estandarización de condiciones de la PTAR piloto.....	35
5.1.1.	Corrección de fugas.....	35
5.1.2.	Control de flujo.....	35
5.1.3.	Potenciales eléctricos.....	37
5.1.4.	Funcionamiento de las CFIS.....	38
5.1.5.	Funcionamiento de los filtros magnéticos.....	38
5.1.6.	Trabajo de la PTAR piloto en flujo continuo.....	39
5.2.	Diseño experimental para determinar la capacidad de tratamiento de aguas residuales sintéticas de la PTAR piloto.....	39
5.2.1.	Tiempo de retención hidráulico.....	40
5.2.2.	Análisis de DQO.....	44
5.2.3.	Análisis de grasas y aceites.....	47
5.2.4.	Análisis de colores aparente y verdadero.....	49
5.2.4.1.	Color aparente.....	50
5.2.4.2.	Color verdadero.....	52
5.2.5.	Análisis de pH.....	52
5.2.6.	Análisis de conductividad.....	54
5.2.7.	Análisis de sólidos totales.....	56
5.2.8.	Análisis de producción de hidrógeno.....	58
5.2.8.1.	Producción de hidrógeno para F2.....	59

5.2.8.2.	Producción de hidrógeno para F3.....	61
5.2.8.3.	Producción de hidrógeno para F4.....	62
5.2.8.4.	Producción de hidrógeno para F5.....	62
5.3.	Tratamiento de aguas residuales reales mediante la PTAR piloto que aplica la tecnología CFIS.....	65
6.	CONCLUSIONES.....	67
7.	RECOMENDACIONES.....	68
8.	PRODUCTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	69
9.	REFERENCIAS.....	70
10.	ANEXOS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transferencia y transporte de cargas en el sistema CFIS

Figura 2: Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Piloto

Figura 3: Esquema de la CFIS construida

Figura 4: Fotografías muestras: a) Muestra cruda, b) Muestra tratada F2, c) Muestra tratada F3, d) Muestra tratada F4, e) Muestra tratada F5

LISTA DE GRÁFICAS

- Gráfica 1:** Grafica de medias para DQO por Flujo
- Gráfica 2:** Grafica de medias para Grasas y aceites por Flujo
- Gráfica 3:** Grafica de medias para Color aparente por Flujo
- Gráfica 4:** Grafica de medias para pH por Flujo
- Gráfica 5:** Grafica de medias para Conductividad por Flujo
- Gráfica 6:** Grafica de medias para Sólidos Totales por Flujo
- Gráfica 7:** Producción de hidrógeno para F2
- Gráfica 8:** Producción de hidrógeno para F3
- Gráfica 9:** Producción de hidrógeno para F4
- Gráfica 10:** Producción de hidrógeno para F5
- Gráfica 11:** Resumen de Resultados obtenidos para las variables de respuesta

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Desarrollo histórico en el tratamiento de aguas residuales

Tabla 2: Valores máximos permitidos para vertimientos de aguas residuales domesticas en Colombia

Tabla 3: Materiales, equipos y reactivos usados en el presente trabajo

Tabla 4: Materiales usados en la preparación de la muestra de agua residual sintética

Tabla 5: Flujos determinados para corridas de muestras

Tabla 6: Volumen de cada sección de la PTAR piloto

Tabla 7: Tiempo de retención hidráulico total para cada flujo

Tabla 8: Parámetros de muestras tratadas en la PTAR piloto a diferentes flujos por triplicado

Tabla 9: Comparación de los promedios de parámetros de muestras tratadas en la PTAR piloto con máximo normativo para vertimientos

Tabla 10: Tabla ANOVA para DQO por Flujo

Tabla 11: Tabla de Múltiples Rangos para DQO por Flujo

Tabla 12: Tabla ANOVA para Grasas y aceites por Flujo

Tabla 13: Tabla de Múltiples Rangos para Grasas y aceites por Flujo

Tabla 14: Tabla ANOVA para Color Aparente por Flujo

Tabla 15: Tabla de Múltiples Rangos para Color aparente por Flujo

Tabla 16: Tabla ANOVA para pH por Flujo

Tabla 17: Tabla de Múltiples Rangos para pH por Flujo

Tabla 18: Tabla ANOVA para Conductividad por Flujo

Tabla 19: Tabla de Múltiples Rangos para Conductividad por Flujo

Tabla 20: Tabla ANOVA para Sólidos Totales por Flujo

Tabla 21: Tabla de Múltiples Rangos para Sólidos Totales por Flujo

Tabla 22: Valores de Hidrógeno producido

Tabla 23: Valores de Mhydros para F2

Tabla 24: Valores de Mhydros para F3

Tabla 25: Valores de Mhydros para F4

Tabla 26: Valores de Mhydros para F5

Tabla 27: Tabla ANOVA para Producción de Hidrógeno por Flujo

Tabla 28: Tabla de Múltiples Rangos para Producción de Hidrógeno por Flujo

Tabla 29: Parámetros de muestra de ARD real tratada en la PTAR piloto con flujo F2

GLOSARIO

Ion: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro.

Electrolito: Un electrolito o electrólito es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.

Corriente Eléctrica: Es el flujo de carga eléctrica que recorre un material o sustancia. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones e iones) en el interior del mismo. Se mide en Amperios.

Potencial Eléctrico: El potencial eléctrico en un punto, es el trabajo que debe realizar un campo eléctrico para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba. Se mide en voltios.

Vatio: Es la unidad de potencia eléctrica del Sistema Internacional de Unidades.

Electrodo: Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un semiconductor, un electrolito, el vacío del grupo (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón, o Argón), etc.

Célula de Flujo Iónico Selectivo: Sistema electrolítico que permite el flujo selectivamente de iones entre dos semiceldas a través de membranas de intercambio.

Membranas de intercambio: Son membranas poliméricas que permiten el paso de sustancias por medio de poros inertes o de poros con paredes cargadas de tal manera que a través del poro se transportan sustancias interactuando químicamente con estas paredes.

Diseño Experimental: Técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental, en el cual se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés.

Factor: Condición o elemento de un tratamiento estadístico que puede afectar un proceso o producto, Estadísticamente puede alterar la variable de respuesta.

Variables Respuesta: Característica del producto cuyo valor interesa mejorar mediante el diseño de experimentos.

Valor-P: Usado en estadística para determinar si un efecto es significativo con un intervalo determinado de confianza.

ABREVIATURAS

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
CFIS: Célula de Flujo Iónico Selectivo
ARD: Agua Residual Doméstica
ARnD: Agua Residual no Doméstica
ARI: Agua Residual Industrial
OMS: Organización Mundial de la Salud
IUPAC: Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
GIESIC: Grupo de Investigación en Estudio de Sistemas Contaminantes
UDENAR: Universidad de Nariño
k: Kilo
M: Mega
m: mili
 μ : micro
S: Siemens
cm: centímetro
UPC: Unidad Platino Cobalto
J: Julio
L: Litro
M: Molaridad
g: Masa en gramos
atm: Atmosfera de presión
°C: Grado celsius
K: Kelvin
min: Minutos
I: Corriente eléctrica
A: Amperios
V: Voltio
W: Watt o Vatio
G: Grados de libertad
PV: Fotovoltaico
DQO: Demanda Química de Oxígeno
RAFA: Reactor anaerobio de flujo ascendente
TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales data de finales del 1800 donde se intensificaron los mecanismos de higiene para evitar enfermedades de origen hídrico, en 2002 el Ingeniero Ricardo Rojas de la OMS (Rojas R., 2002) presenta, en el Curso Integral de Tratamiento de Aguas Residuales, un historial de cómo se inició el tratamiento de las aguas residuales también llamadas aguas negras en diferentes lugares del mundo (Tabla 1), dando una gran relevancia al intento de los investigadores por generar nuevas tecnologías que permitan reducir contaminantes en recursos hídricos.

FECHA	DESARROLLO
A. C.	Irrigación con aguas residuales – Atenas
1550	Uso de aguas residuales en agricultura – Alemania
1700	Uso de aguas residuales en agricultura - Reino Unido
1762	Precipitación química de aguas residuales - Reino Unido
1860	Dispositivo de Mouras. Tratamiento anaerobio de sólidos de aguas residuales
1865	Experimentos sobre microbiología de digestión de lodos - Reino Unido
1868	Investigaciones sobre filtración intermitente de aguas residuales - Reino Unido
1870	Filtración en arena de aguas residuales - Reino Unido
1876	Primeras fosas sépticas – USA
1882	Experimentos sobre aeración de alcantarillas - Reino Unido
1884	Introducción de las rejillas de desbaste – USA
1887	Estación experimental de Lawrence para el estudio de agua y aguas residuales. - Massachusetts – USA
1887	Primera planta de precipitación química – USA
1889	Filtración en lechos de contacto - Massachusetts, USA
1891	Digestión de lodos – Alemania
1895	Recolección de metano de fosas sépticas y su empleo en alumbrado – Reino Unido
1898	Molinete hidráulico para filtros percoladores - Reino Unido
1904	Empleo de desarenadores – USA
1904	Fosa séptica Travis de dos pisos - Reino Unido
1904	Tanque Imhoff – Alemania
1906	Cloración de aguas residuales – USA
1908	Ley de Chick – USA
1911	Aplicación de tanques Imhoff – USA
1911	Digestión separada de lodos – USA

1914	Tratamiento de aguas residuales por lodos activados - Reino Unido
1916	Primera planta municipal de lodos activados – USA
1925	Aeración por contacto – USA

Tabla 1: Desarrollo histórico en el tratamiento de aguas residuales

En su libro (Ramalho R., 2012) menciona que para tratar aguas residuales domésticas e industriales, es muy importante el implementar nuevas tecnologías, procedimientos y líneas de tratamiento que involucren “procesos unitarios integrados” para así, eliminar la idea tradicional de que una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es una simple estructura de cemento en la cual se deposita el agua a tratar y diferentes reactivos.

Gran relevancia toma el tipo de tratamiento que se quiere aplicar al agua residual en cuanto a parámetros de vertimientos, según (Bartsch A. y Ingram W., 1966) en su estudio especializado, presentan como afecta la contaminación hídrica al medio ambiente y un ecosistema determinado, mencionando que los principales factores que se ven afectados son el oxígeno disuelto (OD), la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la cantidad de luz que pasa a través del agua puesto que se reduce la oxidación de materia orgánica, la descomposición de materia orgánica y compuestos nitrogenados y la presencia de aceites que modifiquen la densidad del recurso hídrico.

Es por lo mencionado anteriormente que el presente trabajo se fundamenta en presentar una alternativa al tratamiento de aguas residuales sintéticas y reales a escala de laboratorio, mediante una tecnología nueva y patentada (CFIS) que permite centrarse en reducir los parámetros fisicoquímicos DQO, grasas y aceites, color aparente, color verdadero, pH, entre otros y al mismo tiempo producir una energía limpia como lo es el hidrógeno verde, combustible que puede a mediano y largo plazo reemplazar a los combustibles fósiles y reducir así las emisiones de CO₂ a

la atmósfera; finalmente mediante el presente trabajo investigativo se puede identificar una posible aplicación a gran escala para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad para tratar aguas residuales en una PTAR piloto que aplica la tecnología de las células de flujo iónico selectivo (CFIS), con muestras de agua residual preparadas en el laboratorio.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar y estandarizar condiciones de la PTAR piloto.
- Desarrollar un diseño experimental para determinar la capacidad de tratamiento de aguas residuales de la PTAR piloto.
- Procesar y analizar estadísticamente los resultados del diseño experimental.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. MARCO TEÓRICO

3.1.1. *Las aguas residuales*

La producción de desechos es algo inevitable e inherente al ser humano, mientras los seres humanos requieran consumir alimentos, vestimenta, productos de aseo, tecnología, entre otros, la producción de desperdicios es permanente y continua, gran parte de estos desechos terminan, por supuesto, en los recursos hídricos del planeta. Las aguas residuales son, por consiguiente, la principal fuente de contaminación de efluentes y ecosistemas acuáticos y terrestres debido a su alto contenido de componentes variados de desperdicio, dentro de los cuales está la materia orgánica en descomposición que presenta potenciales de oxidación bajos, indicando que puede ser útil para producir energía; dentro de las soluciones intrínsecas al problema que generan las aguas residuales de diversos tipos, se tiene como principal, el tratamiento previo al vertimiento con diferentes tecnologías y procesos que disminuyan al máximo el potencial de contaminación que presentan estas aguas.

Es entonces fundamental, el conocer los tipos de aguas residuales que se generan y la composición de éstas para así poder estipular un método de tratamiento adecuado, a continuación, se presenta esta información:

3.1.1.1. *Aguas residuales domésticas*

Las aguas residuales domésticas (ARD) involucran todos los desechos que son procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas; las aguas residuales domésticas constan principalmente de papel, jabón, orina, heces y detergentes (Eduardoño, Blog Ambiental).

Debido a la composición que se presenta en las aguas residuales domésticas, se logra identificar que contiene una gran cantidad de materia orgánica, los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual domestica son las proteínas 40-60%, hidratos de carbono 25-50% y grasas y aceites 10% (Hanna Instruments, 2014).

3.1.1.2. Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales (ARI) presentan desechos variados ya que dependen de los procesos específicos de las industrias de las que proceden; en algunos casos, los residuos industriales son liberados directamente sobre los efluentes de agua más cercanos lo que se convierte en un factor contaminante mucho mayor; debido a esto, las autoridades reguladoras pertinentes, han estipulado un reglamento diferente de vertimientos para éste tipo de aguas residuales y exigen que dichas aguas, sean tratadas específicamente para cada tipo de actividad comercial a la que se dediquen las empresas; la gran mayoría de estas aguas son tratadas previamente a los vertimientos, sin embargo, algunas no lo son.

Debido a la variabilidad en la composición de las aguas residuales industriales, el tratamiento adecuado es específico para cada actividad, por lo cual, en el presente trabajo de investigación, se decidió centrarse únicamente en las aguas residuales domésticas, puesto que la composición es considerada más uniforme para un tratamiento más general.

3.1.2. Métodos electroquímicos de obtención de hidrogeno:

Teniendo en cuenta que la materia orgánica en descomposición presenta potenciales de oxidación bajos, es viable obtener hidrógeno mediante procesos electroquímicos, con el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante la tecnología CFIS, se puede obtener hidrógeno gaseoso (energía limpia), para sustituir el uso de algunos hidrocarburos como es el gas propano y parte de

la electricidad transformando el hidrogeno producido en electricidad por medio de celdas de combustible.

El hidrógeno es el combustible más limpio conocido hasta el momento, pues en su proceso de combustión produce únicamente vapor de agua, sustancia característica del aire (Peretti, H. A., y Visintin, A. 2005), cuando se produce hidrogeno a partir de los excrementos se reduce considerablemente el consumo energético, lo cual lo hace viable termodinámicamente, se pretende aplicar las CFIS para: producir hidrogeno a partir de la oxidación de la materia orgánica presente en las aguas residuales, impulsar el uso del hidrógeno como combustible para diferentes aplicaciones, generación de electricidad y producir calor con aplicaciones domesticas e industriales, con el fin de disminuir las emisiones atmosféricas y prevenir el efecto invernadero y la lluvia acida.

3.1.3. Tecnología de las Células de Flujo Iónico Selectivo (CFIS)

El grupo de investigación en Estudios de Sistemas Contaminantes (GIESIC) de la Universidad de Nariño, ha patentado el sistema de la Célula de Flujo Iónico Selectivo (CFIS) el cual es un sistema nuevo y único que aprovecha la oxidación de moléculas orgánicas en los excrementos para generar hidrógeno, la patente la realizo el Dr. Juan José Lozada Castro quien es el inventor directo de dicha tecnología (Resolución No. 17294, Expediente No. NC2017/0012602 del 16 de abril de 2020, Superintendencia de Industria y Comercio). Este sistema separa las semirreacciones de oxidación y reducción en dos compartimentos distintos mediante un sistema de membranas que permiten el flujo selectivo de corriente a través de los iones que se forman en las reacciones por el sistema electrolítico, de tal manera que la oxidación de moléculas orgánicas de las aguas residuales se realice en un compartimento anódico, generando electrones que migran hacia el cátodo, lugar donde ocurre la reducción y producción de hidrógeno. Cuando se toma como molécula orgánica

modelo la urea presente en la orina, en su reacción de oxidación en el ánodo genera iones hidronio en las placas anódicas, los iones hidronio formados son atraídos por las placas catódicas haciendo que ocurra transferencia de iones y moléculas de agua a través del sistema de membranas (Figura 1), este fenómeno hace que se establezca en el sistema un balance experimental de carga y de materia, en las placas catódicas los iones hidronio se reducen para formar hidrogeno disminuyendo su concentración, por principio de L-Chatelier (ley del equilibrio químico) el equilibrio químico del agua se desplaza al lado derecho de la reacción produciendo iones hidroxilo para compensar la pérdida de iones hidronio, parte de los iones hidroxilo por migración se transportan del cátodo hacia el ánodo pasando por el sistema de membranas (Figura 1).

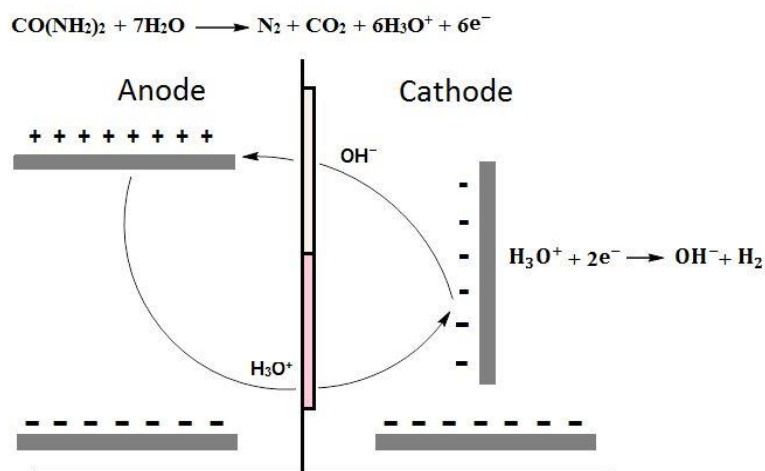


Figura 1: Transferencia y transporte de cargas en el sistema CFIS

3.1.4. Parámetros de vertimientos en Colombia

La Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 de MINAMBIENTE estipula los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua y a los sistemas de alcantarillado; dicho documento divide los valores en aguas residuales domésticas y no domésticas (Industriales), éstas últimas en diferentes categorías dependiendo de la actividad comercial a la

que se dedique quien la genera, como por ejemplo el sector agroindustrial y ganadería, minería, hidrocarburos, alimentos y bebidas, fabricación y manufactura de bienes, entre otros.

A continuación, se muestran los parámetros máximos de vertimientos para aguas residuales domesticas en Colombia (Tabla 2):

PARAMETRO	UNIDADES	ARD
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	Análisis y reporte
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,0
Solidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,0
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y reporte
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y reporte
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y reporte
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	0,50
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02
Níquel (Ni)	mg/L	0,50
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,50
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Color Real	m ⁻¹	Análisis y reporte

Tabla 2: Valores máximos permitidos para vertimientos de aguas residuales domesticas en Colombia

3.2 ANTECEDENTES

Dentro de los principales antecedentes que soportan el presente trabajo, se realizó una búsqueda sobre aportes científicos que involucren tratamiento de aguas residuales con electricidad, funcionamiento de la tecnología CFIS para producción de hidrógeno y producción de hidrógeno a partir de la electrolisis de la orina.

El uso de la electricidad para tratamiento de aguas residuales domésticas se ha implementado dependiendo de varios factores, siendo los más importantes la disponibilidad de la fuente energética en el lugar de tratamiento de AR y los recursos disponibles para dicho proceso. El proceso más utilizado en este campo, es el que involucra el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) o Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) en inglés, se trata de un sistema cilíndrico que utiliza microorganismos y electricidad para tratar las aguas residuales, en este reactor, el agua residual se desplaza en flujo ascendente y reduce la materia orgánica presente y también remueve sólidos suspendidos; se trata de un sistema adecuado para tratar las aguas residuales, sin embargo, presenta ciertas desventajas, como tratamiento adicional de los efluentes y lodos, periodo inicial largo en cuanto a tiempo, repuestos que no están disponibles con facilidad, generación de una mezcla de gases que también requieren tratamiento, entre otros.

En 2011, en un trabajo de grado de ingeniería química de la Universidad San Francisco de Quito (López, J. 2011) se evalúa la eficiencia de un RAFA en el tratamiento de aguas residuales sintéticas a escala de laboratorio mostrando un buen tratamiento mencionando que es indispensable la presencia de microorganismos activados y controlando la cantidad de materia orgánica de la muestra cruda; dicho reactor, muestra una eficiencia en la remoción de la materia orgánica del 48,28%, determinado con el DQO.

En 2016, se evaluó la eficiencia de un RAFA acoplado a una celda microbiana de combustible en el tratamiento de la materia orgánica presente en aguas residuales (Martínez, C. et al. 2016), los resultados que obtuvieron en éste trabajo muestran una mejora en el funcionamiento para tratar aguas residuales de los sistemas acoplados comparados con los sistemas separados, se menciona una reducción del DQO en un 88% y 75% en carbono orgánico total (COT) con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 12 horas para obtener dichos resultados.

La producción de Hidrógeno verde (Hidrógeno producido mediante el uso de energías renovables con bajas emisiones, Reyes L. 2020), es uno de los principales procesos en la actualidad para explorar energías alternativas; dentro de los principales medios de producción de este combustible se encuentran: la electrólisis de la orina y de la materia orgánica presente en las aguas residuales, entre otros.

En 2017, se presenta un trabajo en el cual se utiliza cloruro de sodio como catalizador para generar hidrogeno a partir de la electrolisis de la orina (Alvarez, K. y Cabezas, S. 2017); se reporta una producción máxima de 1,906 L de hidrogeno en una muestra de orina a 35°C, con una solución 0.15 M de NaCl y a un potencial de 12V durante 10 minutos.

En el 2018, dentro del Grupo de Investigación en Sistemas Contaminantes de la Universidad de Nariño se presenta un trabajo de investigación en el cual se optimizan las condiciones para producción de hidrogeno a través de una celda de cátodo y ánodo separados a partir de la electrolisis de la orina (Delacruz, C. 2018). En esta investigación se menciona el funcionamiento de las Células de Flujo Iónico Selectivo (CFIS) como una tecnología adecuada para producir hidrogeno, además, reporta una producción de hidrogeno de alrededor del 70% y planta importantes cimientos mencionando que las CFIS se podrían utilizar para tratar aguas residuales.

Saavedra, N., et al. 2020, estudiaron la generación de hidrogeno a partir de la electrolisis de la orina en una celda electrolítica, en este trabajo obtuvieron 35 ppm de H_2 en un lapso de 10 minutos con un potencial aplicado de 24V.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la presentación de los materiales y equipos utilizados en el presente trabajo, se debe aclarar que varios de los sistemas implementados se van a someter a protección intelectual, por lo cual se presentan a modo de esquema y no como fotografía.

4.1. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

En la tabla 3 se muestran los materiales, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de este trabajo de investigación:

<i>Equipos</i>			
Equipo	Marca	Modelo	Serial
Fuente de poder	Protek DC	3003B	--
Balanza analítica	Radwag	AS 220/C/2	366202
Sensor de concentración de hidrógeno	ams	HPS-100	--
Multímetro	ER MASTECH	MS8233B	OE189TB0553TSLCO
Taladro	Black & Decker	TB550B	BL036HL30CSRLACOL
Pulidora	Black & Decker	G720	BL036HL13AI62LCO
<i>Materiales</i>			
Material	Marca	Capacidad	Tipo de material
Pipetas graduadas	Selecta	10, 5 y 2 mL	Vidrio
Probetas	Selecta	50, 100 y 500 mL	Vidrio
Pera	Selecta	--	Caucho
Vidrios de reloj	Selecta	--	Vidrio
Beakers	Selecta	50, 150 y 250 mL	Vidrio
Balones aforados	Selecta	100, 50 y 25 mL	Vidrio
Erlenmeyers	Selecta	100 y 50 mL	Vidrio
Placas de Acero Inoxidable	Cima Inoxidable	--	Acero inoxidable
Membrana de Intercambio iónico	Cadpak P	--	Nafion
Membrana Fibrosa		--	Fibrosa
Tubo PVC		2, 3, 4 "	PVC
Ángulos		1 "	Hierro
<i>Reactivos</i>			
Nombre	Pureza	Marca	
Ácido Acético	99%	Panreac AppliChem	
Ácido Nítrico	99.5%	Panreac AppliChem	
Ácido Clorhídrico	37%	Panreac AppliChem	
Hidróxido de Amonio	65%	Panreac AppliChem	
Ácido Oxálico	98%	--	
Sulfato de Potasio	--	--	
Cloruro de Amonio	--	--	
Leche en Polvo	--	El Rodeo	
Azúcar	--	--	
Gelatina	--	Gel'hada	

Tabla 3: Materiales, equipos y reactivos usados en el presente trabajo

4.2. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE PTAR PILOTO

4.2.1. Construcción de la PTAR Piloto:

Se inició con la construcción de la estructura, mediante ángulo de hierro, se diseñó, se cortó y se armó una estructura que pudiera sostener las partes de la PTAR piloto; el tamaño aproximado de la estructura es de 0,4 m de ancho, 2 m de largo y presenta diferentes alturas, dependiendo de la necesidad para cada sección de la PTAR puesto que trabaja mediante gravedad, siendo la parte más baja de 0,5 m y la más alta de 1,8 m.

Posterior a la construcción de la estructura metálica, ajustada con tornillos inoxidables, se construyó con acrílico de 1 cm de espesor unas placas para las bases que sostendrían las diferentes secciones de la PTAR como lo son tubos de PVC, tanques y el sistema de electrocoagulación (una caja de acrílico). Una vez instaladas las bases en el lugar adecuado, se inició el proceso de adecuación de los tubos de PVC de 4" y los tanques que contienen y reciben la muestra, después de cortar los tubos y unirlos con las necesidades hidráulicas de la PTAR piloto se instalaron llaves y mangueras para asegurar el correcto desplazamiento del fluido en el orden planeado; después de esto se lijo y se pintó la estructura y el sistema hidráulico por cuestiones estéticas.

Una vez se instaló el sistema hidráulico en la posición deseada, se inició un proceso de adecuación del sistema de electrocoagulación, el cual es indispensable en la PTAR diseñada, para ello se fabricó una caja de acrílico, sellada con cloruro de metileno y tornillos, además de esto, se instalaron placas de acero inoxidable internas en la disposición deseada para la aplicación de campos electromagnéticos y se realizó la conexión de un circuito que intercambia el signo del potencial eléctrico aplicado a las placas mencionadas, dicho circuito estaba disponible en el grupo de investigación GIESIC.

Posteriormente se fabricó el filtro final, se ubicó un cuñete perforado en el fondo con orificios de 1 cm de diámetro dentro de otro cuñete para la recepción de la muestra tratada; se selló la unión de los 2 cuñetes con un empaque de goma y silicona líquida; sobre la superficie del cuñete perforado, se adecuó un tubo de PVC de 4" con una tela muy fina en su parte inferior, se relleno con una arcilla tipo Montmorillonita para que la muestra pase a través de ella y así finalice el proceso de tratamiento.

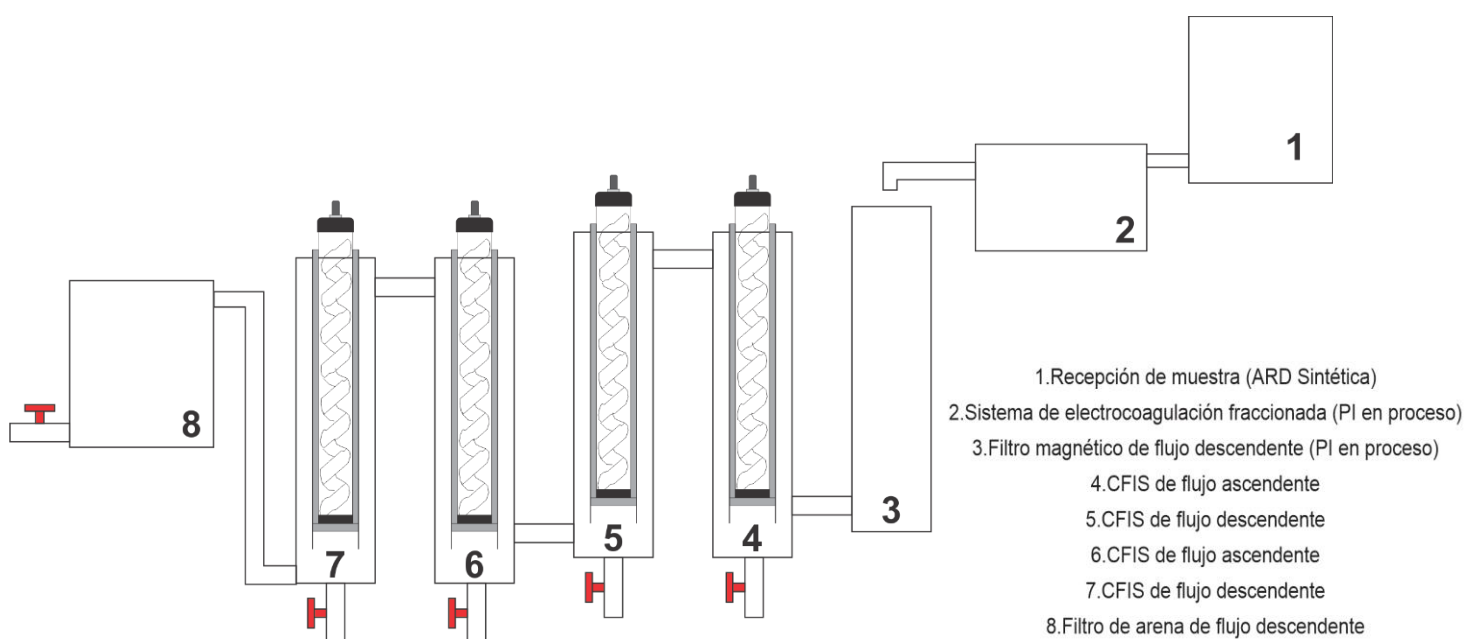


Figura 2: Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Piloto

Una vez instaladas las partes de la PTAR piloto en su lugar, se inició el proceso de fabricación del relleno de los filtros magnéticos, para ello se obtuvo los materiales planeados y se les realizó un tratamiento previo, el cual consistió en un lavado específico; después de esto se rellenaron los filtros y se realizó la conexión eléctrica.

Al tener el sistema hidráulico en su posición, los filtros magnéticos listos, el sistema de electrocoagulación en su lugar y las conexiones eléctricas, se procedió a fabricar las CFIS de

acuerdo a la dimensión requerida y las necesidades de la PTAR piloto. La PTAR piloto construida se muestra, a modo de esquema, en la Figura 2.

4.2.2. Fabricación de las CFIS:

Para este proceso se siguieron las directrices del Grupo de Investigación; se cortaron tubos de PVC de 2" de 50 cm de largo y con ayuda de una mini pulidora se realizaron cortes transversales de 0,5 cm de ancho sobre el tubo de PVC distribuidos cada 2 cm, esto para el correcto flujo de iones desde el interior hacia el exterior y viceversa a través de la membrana. En la parte inferior del tubo, se instaló un círculo de acero inoxidable perforado seguido a ello se instaló la membrana de fibrosa alrededor del tubo y se realizó el cierre de la misma, alrededor de la membrana se ubicó una malla plástica para protegerla de los cambios de presión de líquido en la parte interior y exterior, en la parte inferior se adecuo un tapón con membrana de Nafion (membrana de intercambio protónico); después de instalar el sistema de membranas se inició el proceso de adecuación del ánodo, se trata de una cobertura a modo de carcasa fabricada en acero inoxidable perforada, dicho ánodo se instala separado aproximadamente 3 mm de la membrana de fibrosa, la separación se logra gracias a resortes circulares de neumático; una vez instalado el ánodo se realizó la instalación de las patas q tienen contacto con el fondo de los tubos que contienen a las CFIS, dichas patas son 2 tiras de cinta de acero inoxidable de aproximadamente 30 cm de largo que sobre salen de la parte inferior en 2 cm; todas las partes metálicas que contiene la CFIS en su parte exterior se sujetaron con amarras plásticas. Después de esto, se procedió a la fabricación del cátodo, para esto se cortó un tubo de acero inoxidable que pudiese ingresar en el tubo de PVC de la CFIS, dicho tubo es de 15 cm de alto y se instala en la parte interna inferior de la CFIS, al interior de dicho tubo metálico, se adecua un espiral de acero inoxidable fabricado con cinta metálica de 1 cm de ancho, la altura del espiral es de 50 cm para que sobresalga de la CFIS y poder

realizar la conexión eléctrica, así finalizó el proceso de fabricación de la CFIS (Figura 3). En total se fabricaron 5 CFIS, 4 iban ubicadas en la PTAR piloto, por lo cual se tenía una de respaldo, en algunas ocasiones se observó que tras muchas pruebas era necesario cambiar la membrana de fibrosa de las CFIS debido a perforaciones o fugas, esto provocado por golpes con las paredes del tubo que contiene a cada CFIS o con diferentes implementos en el proceso de lavado de las mismas; para ello se desarmaba la CFIS, se instalaba una nueva membrana de fibrosa, se sellaba y se volvían a ubicar los electrodos en su lugar para volver a utilizar en la PTAR.

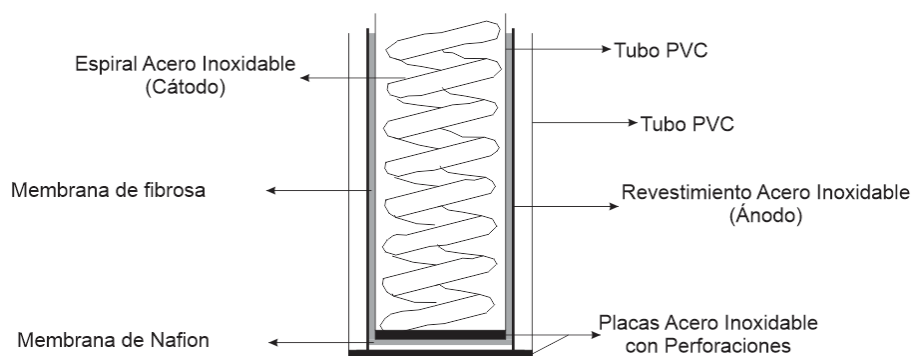


Figura 3: Esquema de la CFIS construida

4.2.3. Preparación de muestra de agua residual sintética:

Para este proceso se tuvieron en cuenta varios trabajos en los cuales se describe la preparación de aguas residuales sintéticas (Torres, et al. 1996) (Universidad de Valencia, 2000) (Norma alemana DIN 38412) (Lozano, W. y Rodríguez, I. 2012), una vez revisados dichos trabajos, la composición general de aguas residuales domésticas y los materiales disponibles, se tomó la decisión de preparar la muestra de la siguiente manera (Tabla 4):

Componente	Marca	Formula	Cantidad (mg/L)
Leche en polvo (Fuente de Materia Orgánica)	El Rodeo	--	250
Gelatina sin sabor	Gel'hada	--	250
Sulfato de potasio	--	K_2SO_4	125
Cloruro de amonio	--	NH_4Cl	125
Azúcar (Sacarosa)	--	$C_{12}H_{22}O_{11}$	250
Orina humana	--		(8,3mL/L)

Tabla 4: Materiales usados en la preparación de la muestra de agua residual sintética

La orina utilizada para la preparación de las muestras se recolectó durante varios días en un recipiente oscuro, previo a mezclar con cada muestra se ajustó el pH a 11 con Hidróxido de amonio al 30%; la leche en polvo, la gelatina y el azúcar se mezclaron juntos en un beaker con agua caliente hasta disolución completa, las sales se disolvieron en agua fría directamente en el cuñete de 20 L, una vez estaba todo en el cuñete se agregó la orina con el pH ajustado y se agregó el agua hasta completar los 20 L, después de agitar constantemente durante 10 minutos se dividió la muestra en 2 cuñetes y se agregaron 5 L de agua a cada uno para completar un total de 30 L de muestra. En el momento de agregar la orina, la muestra cambia de un color blanquecino a un color oscuro y toma un olor característico, muy similar al agua del alcantarillado. Finalmente, la muestra estaba lista para ser alimentada en la PTAR piloto.

4.2.4. Puesta en marcha de la PTAR piloto:

Se ubicó la muestra en el depósito superior de almacenamiento de muestra, se encendieron los sistemas eléctricos como lo son el puente H del sistema de electrocoagulación, la bobina del filtro magnético, la alimentación eléctrica de las CFIS a través de una celda fotovoltaica y se inició con la descarga del agua residual sintética; se abre la llave y la muestra empieza a fluir desde el almacenamiento hacia el sistema de electrocoagulación, una vez se llena, el fluido empieza a caer en el filtro magnético que es de flujo descendiente, después de pasar a través del filtro magnético, la muestra se dirige hacia la primera CFIS, la cual es de flujo ascendente; posterior a ello el flujo continúa hacia la segunda CFIS que es de flujo descendente; el siguiente paso es una CFIS de flujo ascendente para que después la muestra se dirija hacia la última CFIS que es nuevamente de flujo descendente; finalmente la muestra sube por un tubo de 1,5" y baja a través del último filtro, un filtro que contiene una arcilla tipo montmorillonita de flujo descendente para ser recogida en un recipiente terminando así su tratamiento.

4.2.5. Corrida de muestras de ARD sintéticas para el diseño experimental:

En el proyecto presentado para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se planteó realizar un diseño experimental unifactorial 1^5 por triplicado, sin embargo se tuvo que modificar a 1^4 debido a inconvenientes con el flujo menor, para ello se tomó en cuenta como único factor el tiempo de retención hidráulico (TRH), se refiere al tiempo en que la muestra de ARD sintética está en contacto con las placas del sistema de electrocoagulación y las CFIS; para controlar esto se debe manejar el flujo al que se desplaza la muestra a través del sistema hidráulico de la PTAR piloto, para ello se utilizaron 2 llaves en la salida del recipiente de almacenamiento de la muestra; para medir el flujo se usó un cronómetro y una probeta, se tomó la cantidad de muestra que salía del sistema de electrocoagulación en un minuto; cada flujo se midió tres veces antes de asumirlo como el deseado.

Todas las muestras obtenidas, en los diferentes flujos planteados se obtuvieron por triplicado, se rotularon y se almacenaron en refrigeración a 5 °C al igual que la muestra cruda para los posteriores análisis de los parámetros más relevantes en el vertimiento a recursos hídricos en Colombia; dichos análisis se realizaron en el laboratorio de aguas de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño bajo los siguientes Métodos:

- **DQO:** Estándar Métodos Edición No. 23 5220- D – Técnica: Colorim. Ref. Cerrado.
- **Grasas y aceites:** Estándar Métodos Edición No. 23 5520 – D – Técnica: Gravimétrica.
- **Colores aparente y verdadero:** Estándar Métodos Edición No. 23 2120 – C – Técnica: Colorimétrica.

4.2.6. Corrida de ARD real en la PTAR piloto:

Como valor agregado al trabajo de investigación se logró correr una muestra de agua residual doméstica real, dicha muestra fue tomada en el colector de ARD ubicado en los dos puentes de la ciudad de Pasto.

La muestra de ARD real se trató de la misma forma que las sintéticas a través de la PTAR piloto bajo el flujo que presentó los mejores resultados y se analizaron los mismos parámetros fisicoquímicos en el laboratorio de aguas de la Udenar con el fin de obtener datos que proporcionen información relevante para la posterior aplicación en una PTAR a escala real.

4.2.7. Recolección y cuantificación de hidrógeno

El gas producido en el interior de las CFIS se recolecta mediante una bomba de vacío que lo arrastra a través de unas mangueras hacia los sensores de flujo, concentración de hidrógeno y corriente para, mediante el sistema Mhydros, cuantificar solamente la cantidad de hidrógeno producido a través del tiempo y en un cilindro de hierro se conecta la salida de la bomba para almacenarlo a baja presión. El sistema Mhydros se desarrolló en conjunto con ingenieros electrónicos de la Universidad de Nariño, se trata de un sistema que involucra 3 sensores, un sensor para concentración de hidrógeno AMS HPS-100, uno de corriente ACS712 – 20A y uno de flujo AWM42150VH, los cuales mediante un circuito Raspberry y el software Mhydros muestran una señal que permite cuantificar el hidrógeno producido en las CFIS al oxidar la materia orgánica presente en las aguas residuales (Lozada J., Casanova C. y Arturo D. 2017).

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE CONDICIONES DE LA PTAR PILOTO

Para el correcto funcionamiento de la PTAR piloto se realizó un proceso de calibración de las condiciones necesarias en cuanto a corrección de fugas, control de flujo, potenciales eléctricos, funcionamiento de las CFIS, funcionamiento de los filtros magnéticos y trabajo en flujo continuo; para ello se realizaron pruebas con agua potable tomada en el laboratorio.

5.1.1. *Corrección de fugas:*

Se dejó correr agua potable alimentando el tanque de almacenamiento de muestra por toda la PTAR piloto, se observó que en varios sitios se presentaban fugas minúsculas que producían goteo lo cual se debía corregir para no perder muestra en el momento de las corridas y así tener resultados más precisos; se desocupó la PTAR y después de secar los lugares de fuga se sellaron con silicona líquida y en algunos casos con cinta de teflón o gomas de neumático con la silicona mencionada.

Una vez se corrigieron las fugas se volvió a hacer pruebas con agua potable para así observar que fueron selladas, cabe resaltar que el agua utilizada en estos procesos se reutilizó mediante una bomba de recirculación. El objetivo de no tener fugas que afecten el correcto tratamiento de las muestras planteadas y la obtención de resultados correctos se cumplió satisfactoriamente.

5.1.2. *Control de flujo:*

Para poder obtener resultados confiables dentro del presente trabajo de investigación se eligió como único factor el flujo de la muestra, inicialmente se propuso calibrar la llave que controla el flujo y realizar marcas para saber en dónde se debía ubicar para un determinado flujo medido en mL/min y utilizar agua potable; sin embargo después de hacer esto se observó que el flujo cambiaba de una forma considerable al usar la muestra de ARD sintética, esto debido a la

diferencia de densidades, por ésta razón y debido a que lo importante era usar un flujo determinado con muestra de ARD sintética, se optó por calibrar flujo con muestra; para esto se decidió utilizar un cronómetro y una probeta; después de varios intentos y mediciones de un flujo determinado (200 mL/min) se observó que era necesario esperar un tiempo aproximado de 30 segundos para que el flujo de muestra se estabilizara; es por esto que para todas las pruebas que se realizaron en éste trabajo de investigación se esperó dicho tiempo antes de medir el flujo.

También es importante mencionar que cada flujo se midió por triplicado antes de reportarlo, los flujos de ARD sintética utilizados en la presente investigación se muestran en la tabla 5. Debido a que se trata de una muestra con bastante carga en cuanto a materia orgánica, metales, macromoléculas, iones, entre otros; era necesario realizar un correcto y profundo lavado al sistema de la PTAR entre cada muestra y cada flujo, para así evitar que las mangueras, conductos y sistema hidráulico se tapen. El método de lavado fue algo en lo que también se trabajó bastante, se inició usando jabón líquido para retirar grasas, seguido de una solución de HCl diluido (0,01 M) y HNO_3 (0,015M) para retirar metales residuales y terminar con bastante agua caliente, retirando así posibles residuos de ácido o jabón.

RÓTULO	MEDICIÓN 1 (mL/min)	MEDICIÓN 2 (mL/min)	MEDICIÓN 3 (mL/min)	FLUJO (mL/min)	FLUJO (m ³ /h)
F1	23	20	20	21	$1,26 \times 10^{-3}$
F2	48	51	51	50	$3,0 \times 10^{-3}$
F3	98	103	100	100	$6,0 \times 10^{-3}$
F4	200	201	200	200	$1,2 \times 10^{-2}$
F5	298	299	302	300	$1,8 \times 10^{-2}$

Tabla 5: Flujos determinados para corridas de muestras

5.1.3. Potenciales eléctricos:

Al tratarse de sistemas complementarios que trata las aguas residuales mediante las Células de Flujo Iónico Selectivo (CFIS), las cuales funcionan con un panel solar y que además posee un Sistema de Electrocoagulación (SEC) fue necesario calibrar los potenciales eléctricos que se iban a utilizar en cada sección. El sistema eléctrico de la PTAR piloto se dividió en 2 partes, la primera era la que alimentaba el SEC a través del circuito de cambio de signo, en una investigación de 2011, Piña, M. et al. presentan una interesante revisión sobre diferentes condiciones para la electrocoagulación, en este trabajo se recopilan 46 trabajos relacionados con el tema en los cuales se muestra relación entre potenciales, densidades de corriente, material de electrodos, pH, contaminantes a tratar, entre otros; se observó que los potenciales para electrodos de acero inoxidable varían entre 1,5 y 50 V para eliminación de metales pesados, aceites, DQO y color, residuos mineros y fosfatos. La decisión para usar un determinado potencial en el SEC se tomó mediante el esquema de uso de la tecnología para tratar ARD en una PTAR autosustentable, esto se logra mediante el uso de paneles solares, es por esto que se decidió usar un potencial eléctrico de 9 V para el SEC, además de lo mencionado, se observó que a mayores potenciales se producía un exceso de espuma en la parte superior del SEC, esto debido a que la producción de gases sobre los electrodos aumentaba, por lo que se formaba una emulsión que podía taponar conductos de la PTAR piloto. En (Xiong, Y. et al. 2001) se observó que la electro coagulación es un método bastante eficiente para la disminución en el DQO y el color en aguas residuales sintéticas reduciéndolos en 99% y 87% respectivamente.

Para las CFIS se aplicó un potencial de 12V a través de una celda fotovoltaica, al tratarse de un sistema que se espera sea autosustentable en aplicación a gran escala se espera utilizar paneles solares para el correcto funcionamiento de la PTAR; a través de estos paneles se aplica un potencial

suficiente a cada sección y además se logra conservar la energía en baterías de 12V para la alimentación nocturna.

5.1.4. Funcionamiento de las CFIS:

Las células de flujo iónico selectivo CFIS requieren de una construcción minuciosa, cuidado de fugas, de membranas y conexiones eléctricas, mediante este trabajo se logró estandarizar una construcción adecuada de dichas CFIS y además se hicieron varias pruebas de funcionamiento, tomando como base los estudios previos y la experiencia del grupo de investigación GIESIC en esta tecnología. Las CFIS construidas para la PTAR piloto se trabajaron a 12V, con una solución catódica de ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) al 2% v/v ($K_{a1} = 5.60 \times 10^{-2}$, $K_{a2} = 5.42 \times 10^{-5}$) y ácido acético ($C_2H_4O_2$) al 4% v/v ($K_a = 1.75 \times 10^{-5}$) lo cual obedece al principio de la tecnología; estos ácidos débiles, proporcionan un ambiente electrolítico y un ambiente ácido adecuado para el correcto transporte de electrones e iones al interior de la CFIS mediante la presencia de potencial eléctrico y las membranas de fibrosa y Nafion® presentes entre los electrodos.

5.1.5. Funcionamiento de los filtros magnéticos:

Los filtros utilizados en la PTAR piloto implementada se desarrollaron en el GIESIC como una idea basada en el uso de campos magnéticos para retención de metales y cationes alcalinotérreos que pueden dañar la membrana de intercambio protónico de las CFIS, dichos filtros se van a someter a un proceso de protección intelectual; estos filtros utilizan una mezcla viruta metálica y un mineral que presenta una permeabilidad magnética alta, dicho material permite el paso de agua y materia orgánica mientras atrapa iones, al usar este material y realizando un tratamiento previo al relleno, se observó que la conductividad de la muestra disminuía paulatinamente con el paso del tiempo en contacto; la presencia de un metal en el interior del filtro magnético permitió que, al aplicar un potencial en el embobinado exterior proveniente de un panel solar, se generen campos

magnéticos que permiten retener iones, específicamente metales como el Calcio, Magnesio, Zinc, entre otros presentes en la muestra de ARD sintética.

Tras cada corrida, era muy necesario realizar un lavado especial a los filtros magnéticos, además de ello, se hizo muy necesario el dejar sumergido en ácido diluido el relleno del filtro cuando la PTAR no estaba en uso, se observó que, sin este proceso, se formaba una leve cantidad de óxido sobre la viruta, lo que reducía su capacidad de tratar el agua residual.

5.1.6. Trabajo de la PTAR piloto en flujo continuo:

Tras determinar y ajustar todas las condiciones mencionadas anteriormente minuciosamente, se puso en marcha la PTAR piloto, al inicio se realizaron pruebas con agua potable del laboratorio, al verificar que ya no existían fugas del sistema hidráulico, de las CFIS y los filtros magnéticos, además de una correcta conexión eléctrica, se observó que tras varias horas de flujo continuo utilizando la misma agua en recirculación la PTAR piloto estaba lista para trabajar con las muestras deseadas.

5.2. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SINTÉTICAS DE LA PTAR PILOTO

El diseño experimental para tratar las aguas residuales sintéticas se planteó como un diseño unifactorial tipo 1⁵. Se consideró que los resultados aportados por el diseño experimental de este trabajo, junto con los trabajos realizados dentro del grupo de investigación GIESIC en cuanto al funcionamiento de la tecnología CFIS aplicada al tratamiento de aguas residuales, permiten obtener datos relevantes para la aplicación de dicha tecnología en una PTAR a mayor escala con ARD reales.

5.2.1. *Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):*

5.2.2. El factor elegido para el presente diseño experimental fue el tiempo de retención hidráulico (TRH) el cual depende directamente del flujo al que se desplace el fluido, es decir, se trata de determinar el tiempo necesario en que la muestra de agua residual debe estar en contacto con los sistemas de tratamiento de la PTAR piloto para lograr los mejores resultados de tratamiento de ARD sintéticas antes de un vertimiento a los afluentes de agua, cumpliendo con los requisitos presentes en la Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 de MINAMBIENTE. Por otro lado, los niveles fueron implementados mediante el control de flujo de la muestra de ARD, los niveles seleccionados fueron los mostrados en la tabla 5, siendo 21, 50, 100, 200 y 300 mL/min; cabe destacar que en un principio se planeaba usar un flujo de 500 mL/min como máximo nivel, sin embargo al realizar las pruebas de flujo a través de la PTAR piloto, se observó que el flujo era muy elevado para el sistema hidráulico, por lo cual en ciertas ocasiones la muestra se rebosaba, debido a esto se modificó el ultimo nivel a 300 mL/min; por otra parte, el primer flujo, 21 mL/min, presentó un comportamiento irregular, debido a que al ser tan bajo se observaba como un goteo, lo cual dificultó el desplazamiento de la muestra de ARD a través de la PTAR piloto; por ésta razón dicho flujo no se trabajó con las muestras, la decisión anterior condujo a la modificación del diseño experimental de 1⁵ a 1⁴.

Los tiempos de retención hidráulica fueron:

$$TRH = \frac{V(m^3)}{Q(m^3/h)} \quad (1)$$

Donde:

TRH: Tiempo de retención en horas

V: Volumen en metros cúbicos

Q: Flujo en metros cúbicos sobre hora

Para determinar los TRH de cada sección de la PTAR piloto con los diferentes flujos, se midió el volumen de ARD en cada sistema, los resultados se muestran en la tabla 6. Seguido a esto se calculó el TRH.

SECCIÓN PTAR	VOLUMEN (mL)	VOLUMEN (L)	VOLUMEN (m ³)
SECF	3800	3,8	0,0038
Filtro Magnético	3600	3,6	0,0036
CFIS 1	2700	2,7	0,0027
CFIS 2	2200	2,2	0,0022
CFIS 3	2400	2,4	0,0024
CFIS 4	2700	2,7	0,0027
Filtro Final	2200	2,2	0,0022

Tabla 6: Volumen de cada sección de la PTAR piloto

A partir los volúmenes de la tabla 5 y de los flujos de la tabla 6 se tiene, para F2:

$$TRH_{2SECF} = \frac{0,0038m^3}{0,00300m^3/h} = 1,27h \quad (2)$$

$$TRH_{2CFIS1} = \frac{0,0027m^3}{0,00300m^3/h} = 0,90h \quad (3)$$

$$TRH_{2CFIS2} = \frac{0,0022m^3}{0,00300m^3/h} = 0,73h \quad (4)$$

$$TRH_{2CFIS3} = \frac{0,0024m^3}{0,00300m^3/h} = 0,80h \quad (5)$$

$$TRH_{2CFIS4} = \frac{0,0027m^3}{0,00300m^3/h} = 0,90h \quad (6)$$

$$TRH_{2FF} = \frac{0,0022m^3}{0,00300m^3/h} = 0,73h \quad (7)$$

$$TRH_{2TOTAL} = 5,33h \quad (8)$$

De la misma manera se realizó el cálculo de TRH para cada flujo, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

FLUJO mL/min	TRH TOTAL (h)
50	5,33
100	2,67
200	1,34
300	0,88

Tabla 7: Tiempo de retención hidráulico total para cada flujo

Mediante estos datos se logró obtener un estimado del tiempo de retención hidráulica que debe tener una PTAR a gran escala, en su totalidad y en cada sección, para poder lograr resultados aproximados a los que se presentan en el presente trabajo con aguas residuales domesticas sintéticas.

Las variables de respuesta que se utilizaron para determinar la capacidad de tratamiento de la PTAR piloto para ARD sintéticas fueron:

- DQO
- Grasas y aceites
- Color aparente
- Color verdadero
- pH
- Conductividad
- Solidos totales
- Hidrogeno producido

Una vez se recolecto cada muestra después del tratamiento a los diferentes niveles, se almacenaron en recipientes tapados y se llevaron a refrigeración, las muestras se llevaron a análisis de los parámetros planeados (Tabla 8) al laboratorio de aguas de la sección de laboratorios especializados de la Universidad de Nariño; cabe resaltar que cada flujo se trabajó por triplicado, es decir, se

obtuvieron 3 muestras de cada flujo (F2, F3, F4, F5) además de las 3 muestras iniciales de ARD sintética cruda.

Rótulo	DQO (mg O₂/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Color aparente (UPC)	Color verdadero (UPC)	pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)
CRUDA	955,33	162,4	287,5	54,5	8,5	1676	824
CRUDA	962,07	159,2	288,1	56,0	8,5	1712	833
CRUDA	958,62	163,4	287,7	54,6	8,5	1684	831
F2	92,00	<10	28,4	<8	7,3	321	121
F2	89,21	<10	25,2	<8	7,4	311	147
F2	90,78	<10	26,9	<8	7,3	335	138
F3	292,00	<10	28,6	<8	7,1	445	343
F3	315,56	<10	30,8	<8	7,4	421	334
F3	303,99	<10	31,3	<8	7,1	457	345
F4	338,67	<10	58,1	<8	7,7	387	354
F4	317,44	<10	55,0	<8	7,5	391	374
F4	343,80	<10	62,8	<8	7,5	373	360
F5	453,50	93,1	83,4	<8	8,2	865	550
F5	447,55	66,8	88,1	<8	8,0	844	513
F5	423,14	56,7	75,5	<8	8,0	868	541

Tabla 8: Parámetros de muestras tratadas en la PTAR piloto a diferentes flujos por triplicado

A partir de los datos obtenidos después de tratar la muestra de agua residual domestica sintética con la tecnología de las Células de Flujo Iónico Selectivo y los demás sistemas como los filtros magnéticos y el Sistema de Electrocoagulación Fraccionada, a través de la PTAR piloto, se logró determinar que la muestra F2 cumple con los requisitos de vertimientos estipulados en la Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 de MINAMBIENTE.

La comparación de los promedios de los parámetros fisicoquímicos medidos y la exigencia de la norma se muestra en la tabla 9.

RÓTULO	DQO (mg O ₂ /L)	Grasas y aceites (mg/L)	Color aparente (UPC)	Color Verdadero (UPC)	pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)
MAXIMO NORMA	200,00	20,00	NR	NR	6,00 a 9,00	NR	100,00
PROMEDIO CRUDA	958,67	161,67	287,8	55	8,5	1690,7	829,33
PROMEDIO F2	90,66	<10	26,8	<8	7,3	322,3	135,33
PROMEDIO F3	303,85	<10	30,2	<8	7,2	441	340,67
PROMEDIO F4	333,30	<10	58,6	<8	7,6	383,7	362,67
PROMEDIO F5	441,39	72,2	82,3	<8	8,1	859	534,67

Tabla 9: Comparación de los promedios de parámetros de muestras tratadas en la PTAR piloto con máximo normativo para vertimientos

5.2.3. Análisis de DQO:

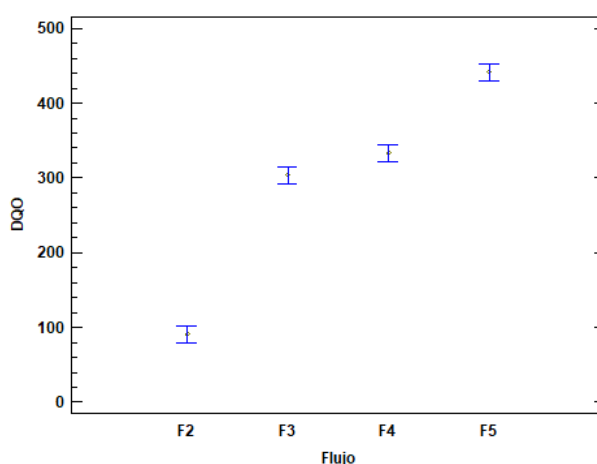
A partir de los datos obtenidos experimentalmente se realizó el tratamiento en el software Statgraphics Centurion 19; con esto se determinó que el flujo aplicado influye directamente en la disminución del DQO de las muestras tratadas (Tabla 8). Dentro de los flujos trabajados en el presente trabajo de investigación se logra observar que a menor flujo mejor tratamiento de la muestra de ARD y más disminución de los contaminantes, en este caso materia orgánica; el flujo F2 (50mL/min) mostró el mejor tratamiento de la muestra de ARD, cumpliendo con casi todos los parámetro de vertimientos, el único parámetro que no cumple es el de Sólidos Totales, el cual se puede atribuir a el tamaño de la PTAR piloto que al ser relativamente pequeña no da el recorrido necesario para que los lodos se precipiten completamente.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	194106,	3	64701,8	435,06	0,0000
Intra grupos	1189,77	8	148,721		
Total (Corr.)	195295,	11			

Tabla 10: Tabla ANOVA para DQO por Flujo

El análisis de varianza de los valores de DQO muestran que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los diferentes flujos aplicados, esto debido a que el valor P es menor que 0,05 lo cual se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% (Tabla 10).

En cuanto a las medias se puede afirmar que el tiempo en el que la muestra este en contacto con los sistemas de tratamiento de la PTAR, el cual depende directamente del flujo al que se desplace la muestra influye directamente en la degradación de materia orgánica (grafica 1).



Gráfica 1: Gráfica de medias para DQO por Flujo

Fuente: Todas las gráficas son producto de esta investigación

Se logra observar que existen diferencias significativas en la degradación de materia orgánica a diferentes flujos, sin embargo, para determinar la correlación existente entre las medias de los flujos se aplicó la prueba de múltiples rangos, dichos datos se muestran a continuación (Tabla 11):

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
F2 - F3	*	-213,187	22,9615
F2 - F4	*	-242,64	22,9615
F2 - F5	*	-350,733	22,9615
F3 - F4	*	-29,4533	22,9615
F3 - F5	*	-137,547	22,9615
F4 - F5	*	-108,093	22,9615

* indica una diferencia significativa.

Tabla 11: Tabla de Múltiples Rangos para DQO por Flujo

Esta prueba aplica un procedimiento estadístico para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, al observar la tabla se deduce que existen diferencias significativas entre las medias de los 4 flujos aplicados con un 95% de nivel de confianza, esto quiere decir que el flujo de la muestra en la PTAR piloto influye directamente en la cantidad de materia orgánica que se puede degradar, lo cual se expresa en el valor de DQO.

Para determinar la eficiencia de la PTAR piloto en la degradación de materia orgánica se calcula la degradación porcentual teniendo en cuenta la disminución del valor del DQO, basada en el valor promedio inicial DQO_{cruda} y los DQO de los diferentes flujos: $DQO_{F2} - DQO_{F3} - DQO_{F4} - DQO_{F5}$.

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F2} = \frac{DQO_{cruda} - DQO_{F2}}{DQO_{cruda}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F2} = \frac{958,67 - 90,66}{958,67} \times 100\% \quad (10)$$

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F2} = \mathbf{90,54\%}$$

De igual forma se calculó para los demás flujos:

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F3} = \mathbf{68,3\%}$$

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F4} = \mathbf{65,2\%}$$

$$\% \text{ Degradacion materia orgánica}_{F5} = \mathbf{53,9\%}$$

En otros estudios, se ha implementado un sistema electroquímico que involucra tratamientos de electrocoagulación empleando electrodos de hierro y oxidación anódica directa (OAD) y electrodos de diamante dopados con boro (DDB) han logrado una degradación de la materia orgánica del 99% en un tiempo de 2 horas (Linares, I., Martínez, V., Barrera, C., Pavón, S., Bernal, L. y Lugo, V. 2011), sin embargo, a pesar de que se obtienen buenos resultados, la desventaja de

utilizar a escala industrial estas técnicas es el costo de la implementación puesto que no son técnicas económicamente rentables.

Otros autores reportan un tratamiento combinado electroquímico y de irradiación para la degradación de materia orgánica de las aguas residuales, en dicho estudio afirman que las mejores eficiencias de remoción se obtienen empleando técnicas electroquímicas, removiendo 78% de DQO (Barrera, C., Urena, F., Campos, E., Palomar, M., y Romero, M. 2003), siendo menos eficientes que la tecnología aplicada en el presente trabajo investigativo; cabe resaltar que la PTAR piloto combina las CFIS que realizan los procesos de electrolisis, el Sistema de Electrocoagulación y los filtros para el tratamiento de matrices más complejas como son las aguas residuales.

5.2.4. Análisis de Grasas y aceites:

Al igual que en el análisis de DQO, se realizó el tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente en el software Statgraphics Centurion 19; los datos de análisis de varianza para esta variable de respuesta se muestran a continuación (Tabla 12):

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	8704,89	3	2901,63	32,87	0,0001
Intra grupos	706,22	8	88,2775		
Total (Corr.)	9411,11	11			

Tabla 12: Tabla ANOVA para Grasas y aceites por Flujo

Se observa que existen diferencias significativas entre las medias de los resultados obtenidos en el tratamiento de la ARD sintética respecto a la variable de respuesta grasas y aceites; sin embargo, al evaluar la prueba de múltiples rangos se observa que las diferencias significativas se dan entre el flujo mayor F5 y los demás (Tabla 13), lo cual se debe a que las grasas y los aceites presentan

cadena carbonada mucho más largas y para ser degradadas en moléculas más pequeñas requieren de mucha más energía, lo que se traduce en un mayor TRH.

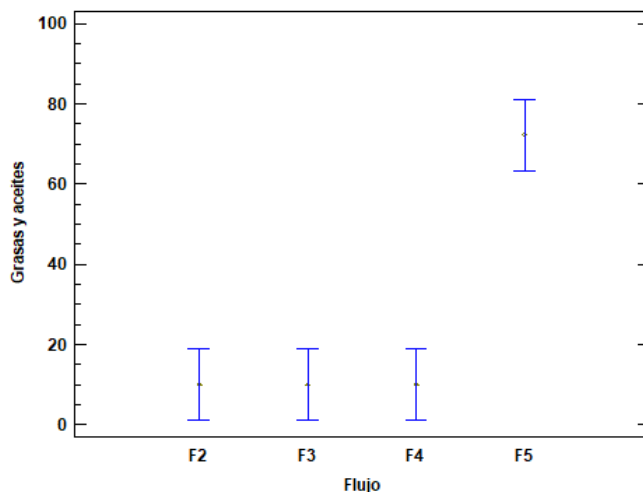
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
F2 - F3		0	17,6905
F2 - F4		0	17,6905
F2 - F5	*	-62,2	17,6905
F3 - F4		0	17,6905
F3 - F5	*	-62,2	17,6905
F4 - F5	*	-62,2	17,6905

* indica una diferencia significativa.

Tabla 13: Tabla de Múltiples Rangos para Grasas y aceites por Flujo

Cabe resaltar que al observar las diferencias significativas entre flujos en la tabla 13, los flujos F2, F3 y F4 no se diferencian entre sí, con una variación relativamente baja.

Mediante la gráfica de medias (Grafica 2) se logra observar más claramente que el único flujo que se diferencia de los demás en cuanto a los resultados experimentales para grasas y aceites de las muestras de ARD sintética, es el flujo F5, inclusive en la tabla de datos (Tabla 8) se muestra que en todos los casos la lectura de grasas y aceites fue menor a 10 ppm exceptuando los de un flujo a 300 mL/min; no obstante, al tratar grasas y aceites mediante la PTAR piloto, entre flujos bajos y TRH más elevados las diferencias no son muy relevantes.



Gráfica 2: Gráfica de medias para Grasas y aceites por Flujo

Al igual que en el caso de la materia orgánica, para las grasas y aceites se determinó la eficiencia de la PTAR piloto en su degradación para ello se tomó en cuenta la disminución del valor de grasas y aceites, basada en el valor promedio inicial $Grasas\ y\ aceites_{cruda}$ y los de los diferentes flujos:

$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F2}$

$$= \frac{Grasas\ y\ aceites_{cruda} - Grasas\ y\ aceites_{F2}}{Grasas\ y\ aceites_{cruda}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F2} = \frac{161,67 - 10}{161,67} \times 100\% \quad (12)$$

$$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F2} = 93,8\%$$

$$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F3} = 93,8\%$$

$$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F4} = 93,8\%$$

$$\% Degradacion\ grasas\ y\ aceites_{F5} = 55,34\%$$

Para los flujos F2, F3 y F4 se tomó el máximo valor detectado experimentalmente para grasas y aceites que fue de 10.

5.2.5. Análisis de Colores aparente y verdadero:

En cuanto al color de la muestra se puede aclarar que se lograba diferenciar a simple vista, la muestra cruda presentaba un color amarillo turbio y a medida que se trataba se iba aclarando hasta llegar a ser traslúcida, similar al agua potable (Figura 4).

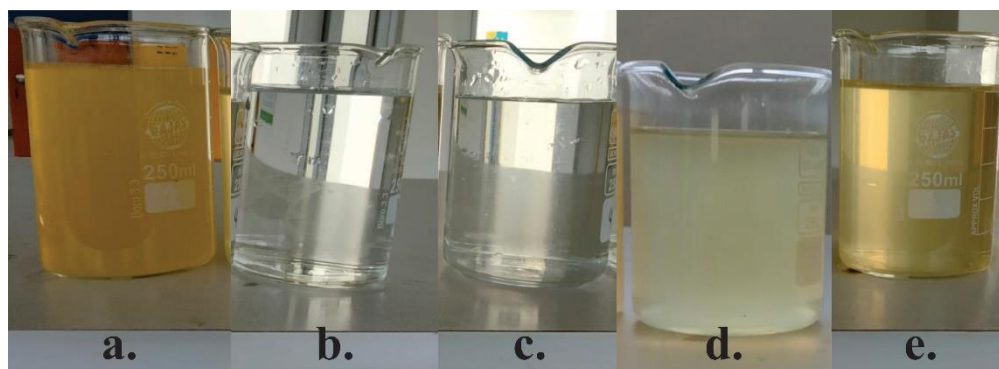


Figura 4: Fotografías muestras: a) Muestra cruda, b) Muestra tratada F2, c) Muestra tratada F3, d) Muestra tratada F4, e) Muestra tratada F5

Fuente: esta investigación

Actualmente uno de los métodos más utilizados para medir el color es el método de platino-cobalto UPC (Apha, Awwa y Wef, 2012), este método se aplica muy bien al perfil de aguas residuales domesticas ARD ya que es producto de una coloración por la presencia de sustancias orgánicas, húmicas y fúlvicas (Kao et al., 2001).

5.2.5.1. *Color Aparente:*

El análisis de varianza para los datos del Color aparente muestra que existe una diferencia significativa entre los diferentes flujos aplicados con un nivel de confianza del 95% debido a que el valor-P es menor a 0,05 (Tabla 14).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	6139,28	3	2046,43	135,09	0,0000
Intra grupos	121,187	8	15,1483		
Total (Corr.)	6260,47	11			

Tabla 14: Tabla ANOVA para Color Aparente por Flujo

Dentro de la prueba de múltiples rangos se observa que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de color aparente para los flujos F2 y F3 (Tabla 15), esto demuestra que a menor flujo mejor tratamiento para eliminación del color de la muestra ARD sintética.

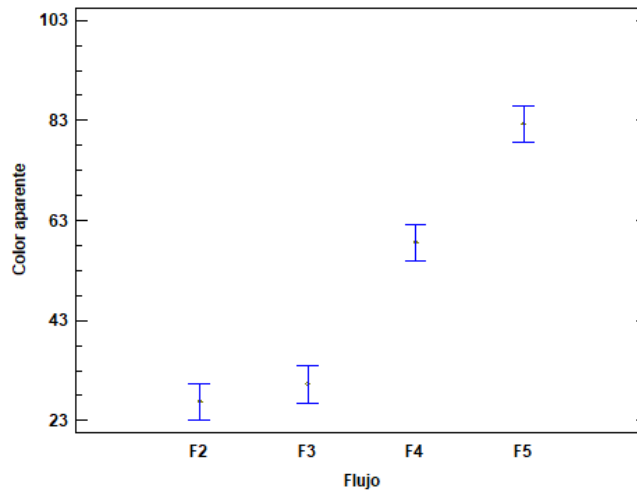
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
F2 - F3		-3,4	7,32821
F2 - F4	*	-31,8	7,32821
F2 - F5	*	-55,5	7,32821
F3 - F4	*	-28,4	7,32821
F3 - F5	*	-52,1	7,32821
F4 - F5	*	-23,7	7,32821

* indica una diferencia significativa.

Tabla 15: Tabla de Múltiples Rangos para Color aparente por Flujo

En la gráfica de medias para color aparente (Grafica 3) se logra observar que los valores de las medias para las muestras ARD sintéticas tratadas con los flujos F2 y F3 no muestran diferencias

significativas, lo contrario ocurre con los flujos F4 y F5, los cuales no fueron muy efectivos para la eliminación del color de las muestras, se debe a que el TRH en dichos flujos es menor y el contacto de la muestra con las CFIS y los filtros magnéticos no fue el suficiente, sin embargo a pesar de esto si se disminuye la coloración de las muestras; la parte de la PTAR piloto más importante en la eliminación del color es el filtro que contiene arcillas tipo Montmorillonitas, éste mineral permite la eliminación del color mediante adsorción, esto se logró observar durante el proceso experimental al tomar muestras en las diferentes etapas de tratamiento.



Gráfica 3: Grafica de medias para Color aparente por Flujo

La eficiencia de la PTAR piloto en su degradación se determinó teniendo en cuenta la disminución del valor de color aparente, basada en el valor promedio inicial $Color\ aparente_{cruda}$ y los de los diferentes flujos:

$$\begin{aligned} \% \text{ Degradacion color aparente}_{F2} \\ = \frac{color\ aparente_{cruda} - color\ aparente_{F2}}{color\ aparente_{cruda}} \times 100\% \end{aligned} \quad (13)$$

$$\% \text{ Degradacion color aparente}_{F2} = \frac{287,8 - 26,8}{287,8} \times 100\% \quad (14)$$

$$\% \text{ Degradacion color aparente}_{F_2} = 90,7\%$$

$$\% \text{ Degradacion color aparente}_{F_3} = 89,5\%$$

$$\% \text{ Degradacion color aparente}_{F_4} = 79,6\%$$

$$\% \text{ Degradacion color aparente}_{F_5} = 71,4\%$$

5.2.5.2. **Color Verdadero:**

La diferencia que existe entre color aparente y color verdadero se da por las partículas suspendidas en el agua y las sustancias disueltas en ella; mientras que el color aparente incluye ambas, el color verdadero es el que depende solamente de las sustancias disueltas, por esta razón, al analizar los datos experimentales se observa que en todas las muestras el Color Verdadero arrojó un valor inferior a 8 UPC, por lo cual:

$$\% \text{ Degradacion color verdadero}$$

$$= \frac{\text{color verdadero}_{\text{cruda}} - \text{color verdadero}}{\text{color verdadero}_{\text{cruda}}} \times 100\% \quad (15)$$

$$\% \text{ Degradacion color verdadero} = \frac{55 - 8}{55} \times 100\% = 85,4\% \quad (16)$$

Este valor de degradación de color verdadero se presenta para todos los flujos, por lo cual se determina que no existen diferencias significativas entre los diferentes flujos.

5.2.6. **Análisis de pH:**

El análisis de varianza para los valores de pH obtenidos experimentalmente mediante los diferentes flujos muestra una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% (Tabla 16).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,30917	3	0,436389	29,09	0,0001
Intra grupos	0,12	8	0,015		
Total (Corr.)	1,42917	11			

Tabla 16: Tabla ANOVA para pH por Flujo

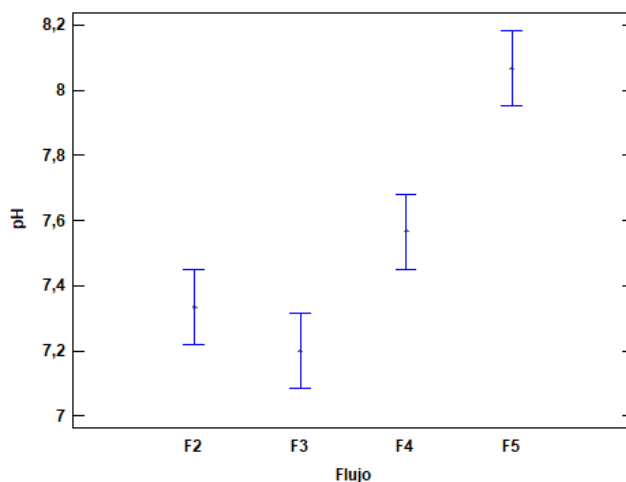
Respecto a la prueba de múltiples rangos se logra determinar que los flujos F2 y F3 no presentan diferencias significativas para los valores de pH (Tabla 17), sin embargo, los demás valores de pH también cumplen con la Resolución No. 0631 de 2015 para vertimientos, donde el rango de pH es de 6,00 a 9,00.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
F2 - F3		0,133333	0,230601
F2 - F4	*	-0,233333	0,230601
F2 - F5	*	-0,733333	0,230601
F3 - F4	*	-0,366667	0,230601
F3 - F5	*	-0,866667	0,230601
F4 - F5	*	-0,5	0,230601

* indica una diferencia significativa.

Tabla 17: Tabla de Múltiples Rangos para pH por Flujo

En la gráfica 4 se observa las medias de los valores de pH con los diferentes flujos, claramente se determina que los valores de pH para los flujos F2 y F3 se cruzan y son cercanos, evidencia de que no existen diferencias significativas.



Gráfica 4: Gráfica de medias para pH por Flujo

5.2.7. Análisis de Conductividad:

La conductividad es un parámetro fisicoquímico que muestra la capacidad de una muestra de agua para conducir la electricidad, las sales disueltas en agua se descomponen en iones cargados positiva y negativamente por lo cual, la conductividad se puede definir como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos (Water Boards, 2021).

Mediante el análisis de varianza, se logró determinar que existen diferencias significativas con los diferentes tratamientos, al observar el P-valor de la tabla ANOVA se observa que es menor a 0,05 por lo cual esta afirmación se presenta con un 95% de nivel de confianza (Tabla 18).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	532356,	3	177452,	957,04	0,0000
Intra grupos	1483,33	8	185,417		
Total (Corr.)	533839,	11			

Tabla 18: Tabla ANOVA para Conductividad por Flujo

Al realizar la comparación mediante la prueba de múltiples rangos, se observa que todos los valores de conductividad presentan diferencias significativas entre sí (Tabla 19).

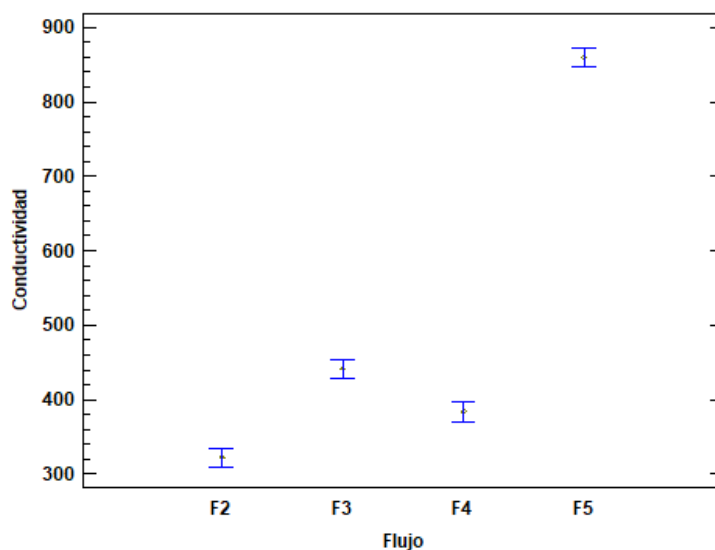
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
F2 - F3	*	-118,667	25,6383
F2 - F4	*	-61,3333	25,6383
F2 - F5	*	-536,667	25,6383
F3 - F4	*	57,3333	25,6383
F3 - F5	*	-418,0	25,6383
F4 - F5	*	-475,333	25,6383

* indica una diferencia significativa.

Tabla 19: Tabla de Múltiples Rangos para Conductividad por Flujo

Finalmente, en la gráfica 5 se puede observar que las medias de los valores de conductividad obtenidos experimentalmente no se cruzan entre sí, demostrando que todos los flujos arrojan diferentes valores de disminución de iones en las muestras siendo el mejor flujo F2.

Al observar la gráfica de medias para los valores experimentales de Conductividad también se logra observar que el flujo F5 no es muy eficiente en la eliminación de iones presentes en la muestra de ARD sintética, esto debido a que al tener un TRH bajo la muestra no está en contacto el tiempo suficiente con los electrodos de las CFIS y los filtros magnéticos al pasar rápidamente por el sistema hidráulico de la PTAR piloto.



Gráfica 5: Gráfica de medias para Conductividad por Flujo

En cuanto a la eficiencia de la PTAR piloto en la disminución de la conductividad se determinó teniendo en cuenta la disminución del valor de conductividad, basada en el valor promedio inicial $Conductividad_{cruda}$ y los de los diferentes flujos:

% Disminución conductividad_{F2}

$$= \frac{\text{conductividad}_{\text{cruda}} - \text{conductividad}_{F2}}{\text{conductividad}_{\text{cruda}}} \times 100\% \quad (17)$$

$$\% \text{ Disminución conductividad}_{F2} = \frac{1690,7 - 322,3}{1690,7} \times 100\% \quad (18)$$

$$\% \text{ Disminución conductividad}_{F2} = \mathbf{80,9\%}$$

$$\% \text{ Disminución conductividad}_{F3} = \mathbf{73,9\%}$$

$$\% \text{ Disminución conductividad}_{F4} = \mathbf{77,3\%}$$

$$\% \text{ Disminución conductividad}_{F5} = \mathbf{49,2\%}$$

5.2.8. Análisis de Sólidos Totales:

Mediante el análisis de varianza se puede observar que existen diferencias significativas entre los valores de sólidos totales obtenidos experimentalmente para los diferentes flujos, en la tabla 20 se puede observar que el valor-P es menor a 0,05, lo anterior se puede afirmar con 95% de nivel de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	240760,	3	80253,3	467,72	0,0000
Intra grupos	1372,67	8	171,583		
Total (Corr.)	242133,	11			

Tabla 20: Tabla ANOVA para Sólidos Totales por Flujo

Mediante la prueba de múltiples rangos se logra observar que existen diferencias significativas entre los diferentes flujos para los valores de sólidos totales, no obstante, entre los valores obtenidos para F3 y F4 no se presentan diferencias estadísticas significativas (Tabla 21).

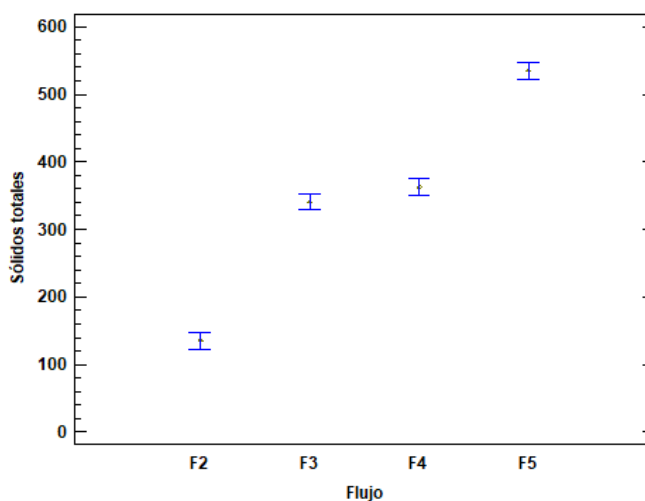
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
F2 - F3	*	-205,333	24,6634
F2 - F4	*	-227,333	24,6634
F2 - F5	*	-399,333	24,6634
F3 - F4		-22,0	24,6634
F3 - F5	*	-194,0	24,6634
F4 - F5	*	-172,0	24,6634

* indica una diferencia significativa.

Tabla 21: Tabla de Múltiples Rangos para Sólidos Totales por Flujo

Con la gráfica de medias se logra determinar que se presenta un cruce entre los valores de sólidos totales para los flujos F3 y F4 (Gráfica 6).

Las determinaciones de sólidos totales muestran que ninguno de los tratamientos cumple con los valores para vertimientos de la Resolución No. 0631 de 2015, esto debido a que al ser una PTAR piloto con no más de 2 metros de longitud el tiempo para precipitación de sólidos no es el suficiente, sin embargo, se cree que en una PTAR de alto flujo esto no sucedería.



Gráfica 6: Gráfica de medias para Sólidos Totales por Flujo

En cuanto a la eficiencia de la PTAR piloto en la eliminación de sólidos se observa a través del valor promedio inicial *Sólidos totales_{cruda}* y los de los diferentes flujos:

% Eliminación Sólidos Totales_{F2}

$$= \frac{\text{sólidos totales}_{cruda} - \text{sólidos totales}_{F2}}{\text{sólidos totales}_{cruda}} \times 100\% \quad (19)$$

$$\% \text{ Eliminación Sólidos Totales}_{F2} = \frac{829,33 - 135,33}{829,33} \times 100\% \quad (20)$$

$$\% \text{ Eliminación Sólidos Totales}_{F2} = \mathbf{83,7\%}$$

$$\% \text{ Eliminación Sólidos Totales}_{F3} = \mathbf{58,9\%}$$

$$\% \text{ Eliminación Sólidos Totales}_{F4} = \mathbf{56,3\%}$$

$$\% \text{ Eliminación Sólidos Totales}_{F5} = \mathbf{35,5\%}$$

5.2.9. Análisis de producción de hidrógeno

El hidrógeno producido por las Células de Flujo Iónico Selectivo (CFIS) fue cuantificado midiendo el porcentaje de hidrógeno en línea de manera continua por el sistema Mhydros, el cual utiliza un sensor de concentración HPS-AMS-100 que mide el porcentaje de hidrógeno, un sensor de corriente ACS712 – 20A y un flujómetro AWM42150VH que mide la totalidad del flujo de los gases producidos por las CFIS (Lozada, J., Casanova, C. y Arturo, D. 2017). Los diferentes sensores se conectan a una interfaz tipo circuito (Raspberry) y posteriormente al computador que mediante el software Mhydros muestra los valores en pantalla; dicho sistema fue desarrollado por ingenieros electrónicos de la Universidad de Nariño como un trabajo de grado colaborativo con el GIESIC.

Los datos de producción de hidrógeno se muestran a continuación:

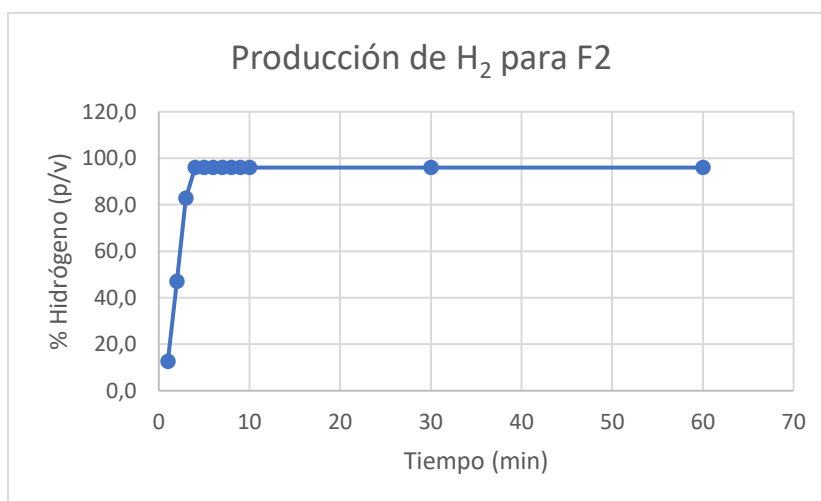
Muestra	% H ₂ p/v Promedio	Flujo L/h	Moles de H ₂ /h
F2	96	120	3,53
F3	92	120	3,38
F4	90	120	3,32
F5	88	120	3,28

Tabla 22: Valores de Hidrógeno producido

5.2.9.1. Producción de hidrógeno para F2:

Se observó que para el Flujo F2 el máximo de concentración porcentual de hidrógeno se alcanza alrededor de los 4 minutos y se mantiene constante hasta el final; la producción de hidrógeno está representada en la Gráfica 7, la cual muestra la concentración porcentual (p/v) de hidrógeno durante todo el experimento.

Para calcular la cantidad de hidrógeno producido en moles por hora se utiliza la ecuación de gases ideales con los valores que presenta el sistema Mhydros, para ello se tienen en cuenta los valores presentes en la tabla 23.



Gráfica 7: Producción de hidrógeno para F2

Porcentaje de H ₂ (%)	Flujo de hidrógeno (L/h)	Presión atmosférica (atm)	Temperatura ambiente (K)
96	120	0,74	294,7

Tabla 23: Valores de Mhydros para F2

$$\%H_2 = 96 \frac{g}{L} \rightarrow 0,96$$

$$Flujo: 120 \frac{L}{h}$$

$$\left(120 \frac{L}{h}\right)(0,96) = 115,2 \frac{L}{h} \quad (21)$$

Conociendo el flujo de hidrógeno calculado anteriormente se aplica la ecuación de los gases ideales para calcular las moles producidas por hora:

$$PV = nRT \quad (22)$$

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (23)$$

$$n = \frac{(0,74 atm) \left(115,2 \frac{L}{h}\right)}{\left(0,082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K}\right)(294,7 K)} \quad (24)$$

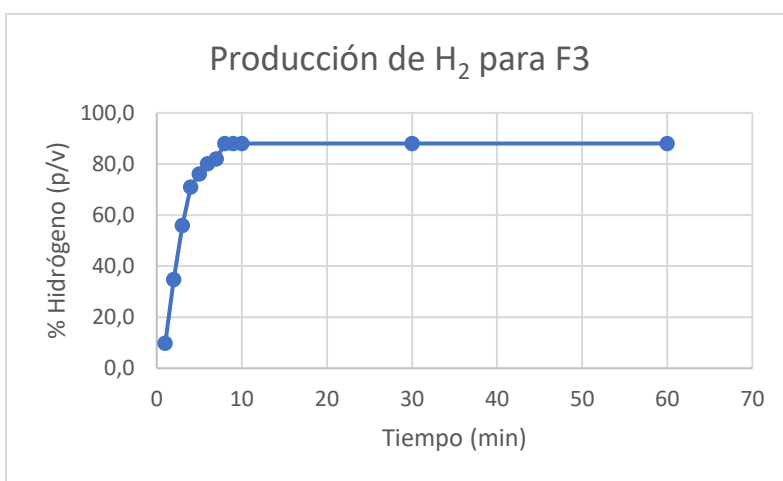
$$n = 3,53 \frac{mol H_2}{h} \quad (25)$$

Se logró así determinar que mediante un flujo de 50 mL/min, la PTAR piloto produce 3,53 molH₂/hora a través de las 4 CFIS que se encargan de tratar las aguas residuales sintéticas, junto con el Sistema de electrocoagulación y los filtros, oxidando la materia orgánica presente y generando un combustible limpio; además de esto se infiere que no todo el gas producido por las CFIS es hidrógeno sino que existen otros gases, se cree que cuando se produce una disminución en la detección de hidrogeno por parte del sensor, se está generando vapor de agua debido a que como la bomba de vacío trabaja de manera continua, aparece un cambio de presión que extrae agua en forma de gas; sin embargo, este tema puede ser estudiado posteriormente en un trabajo

investigativo de post grado, junto con procesos termodinámicos específicos que se presentan en el tratamiento de ARD mediante esta tecnología.

5.2.9.2. **Producción de hidrógeno para F3:**

La producción de hidrógeno para F3 está representada en la Gráfica 8, la cual muestra la concentración porcentual (p/v) de hidrógeno durante todo el experimento.



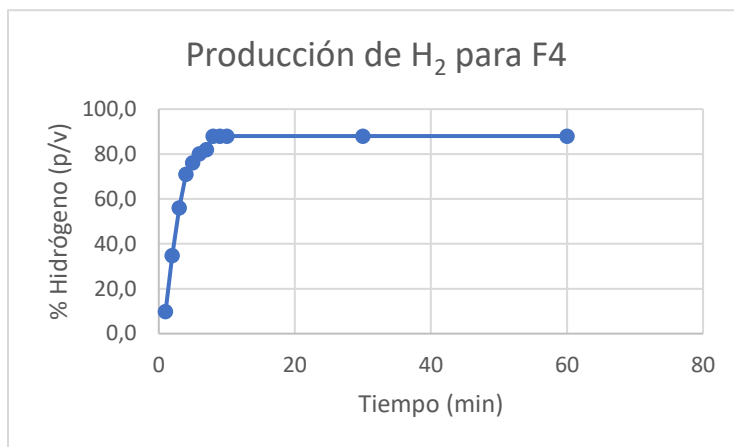
Gráfica 8: Producción de hidrógeno para F3

Aplicando los mismos cálculos que para F2 se logró obtener la cantidad de moles de hidrogeno por hora, para ello se determinó un flujo de 110,4 L/h y se tuvieron en cuenta los valores expuestos por el sistema Mhydros (Tabla 24) para un total de 3,38 molH₂/L.

Porcentaje de H ₂ (%)	Flujo de gas (L/h)	Presión atmosférica (atm)	Temperatura ambiente (K)
92	120	0,74	294,7

Tabla 24: Valores de Mhydros para F3

5.2.9.3. Producción de Hidrógeno para F4:



Gráfica 9: Producción de hidrógeno para F4

La producción de hidrógeno para F4 está representada en la Gráfica 9, la cual muestra la concentración porcentual (p/v) de hidrógeno.

Las moles se calcularon de la misma forma que para F2 y F3, mostrando una producción de 3,32 molH₂/h.

Porcentaje de H ₂ (%)	Flujo de hidrógeno (L/h)	Presión atmosférica (atm)	Temperatura ambiente (K)
90	120	0,74	293,4

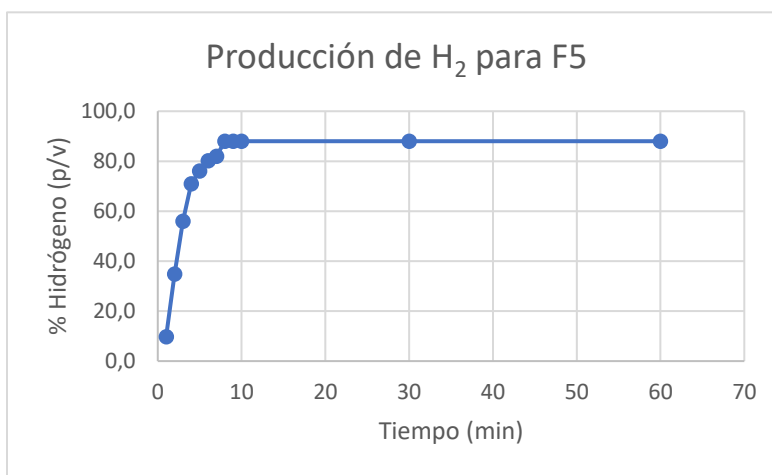
Tabla 25: Valores de Mhydros para F4

5.2.9.4. Producción de Hidrógeno para F5:

La producción de hidrógeno para F5 está representada en la Gráfica 10, la cual muestra la concentración porcentual (p/v) de hidrógeno durante el experimento, los datos de Mhydros se muestran en la tabla 26.

Porcentaje de H ₂ (%)	Flujo de hidrógeno (L/h)	Presión atmosférica (atm)	Temperatura ambiente (K)
88	120	0,74	290,3

Tabla 26: Valores de Mhydros para F5



Gráfica 10: Producción de hidrógeno para F5

Se logro determinar que con el flujo F5 se producen 3,28 molH₂/h en el tratamiento de las ARD sintéticas mediante la aplicación de la tecnología CFIS en una PTAR piloto que utiliza 4 CFIS.

A continuación, se muestra la tabla de ANOVA para la producción de hidrógeno:

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	105,0	3	35,0	20,00	0,0004
Intra grupos	14,0	8	1,75		
Total (Corr.)	119,0	11			

Tabla 27: Tabla ANOVA para Producción de Hidrógeno por Flujo

En la Tabla 27 se logra observar que existen diferencias significativas entre las medias de la cantidad de hidrogeno producido en los diferentes flujos; para determinar entre cuales flujos existe o no diferencias se acude a la prueba de Múltiples Rangos.

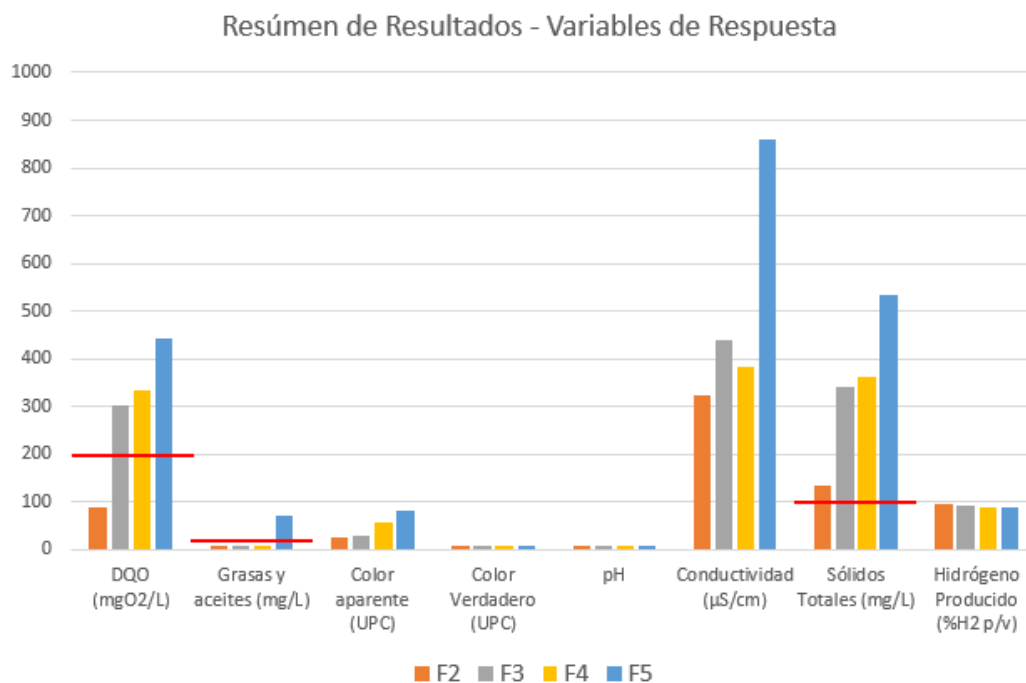
Al analizar la prueba de múltiples rangos se pudo determinar que existen diferencias significativas entre los diferentes flujos para los valores de hidrógeno producido, sin embargo, entre los valores obtenidos para F3 – F4 y F4 – F5 no se presentan diferencias estadísticamente significativas.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
F2 - F3	*	4,0	2,49078
F2 - F4	*	6,0	2,49078
F2 - F5	*	8,0	2,49078
F3 - F4		2,0	2,49078
F3 - F5	*	4,0	2,49078
F4 - F5		2,0	2,49078

* indica una diferencia significativa.

Tabla 28: Tabla de Múltiples Rangos para Hidrógeno Producido por Flujo

Finalmente se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las diferentes variables de respuesta:



Gráfica 11: Resumen de Resultados obtenidos para las variables de respuesta

5.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES REALES MEDIANTE LA PTAR

PILOTO QUE APLICA TECNOLOGÍA CFIS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se decidió correr una muestra de agua residual real con el flujo que produjo los mejores resultados, para determinar la capacidad de tratamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Piloto con una muestra de agua residual doméstica real, dicha muestra se tomó en el colector ubicado en el sector de los dos puentes de la Ciudad de Pasto.

Para esta muestra se analizaron los mismos parámetros fisicoquímicos que se analizaron en las muestras sintéticas, sin embargo, solamente se corrió la muestra a través de la PTAR piloto con el flujo F2 (50 mL/min), puesto que dicho valor fue el que arrojó los mejores resultados de tratamiento. Los datos obtenidos se muestran a continuación (Tabla 29):

Rótulo	DQO (mg O ₂ /L)	Grasas y aceites (mg/L)	Color aparente (UPC)	Color verdadero (UPC)	pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)
CRUDA	712,00	96,9	462,9	81	7,5	1232	663
F2	98,67	20,0	8,6	<8	7,3	244	112
MAXIMO NORMA	200,00	20,00	NR	NR	6,00 a 9,00	NR	100,00

Tabla 29: Parámetros de muestra de ARD real tratada en la PTAR piloto con flujo F2

Se logró determinar que la muestra de ARD real cumple con la mayoría de los requisitos que exige la Resolución No. 0631 de 2015 para vertimientos en afluentes naturales; al igual que con las muestras de ARD sintética el único parámetro que no cumple la norma máxima es el de Sólidos Totales, se recomienda realizar estudios posteriores al respecto.

En cuanto a la producción de hidrógeno se realizó la misma determinación que en las muestras sintéticas; se logró observar que, aunque la producción porcentual de H_2 es menor, la degradación de la materia orgánica, indicada por la disminución del DQO, es del 86,14%, mostrando un excelente tratamiento.

6. CONCLUSIONES

- Se logró tratar muestras de Agua Residual Doméstica sintética mediante una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales piloto que utiliza la tecnología de las Células de Flujo Iónico Selectivo y disminuir su carga contaminante.
- Se determinó que el mejor flujo para tratar las muestras de ARD en la PTAR piloto es 50 mL/min, con un Tiempo de Retención Hidráulico de 5,33 horas.
- Se logró reducir el DQO en un 90,54%, Grasas y aceites en 93,8%, Color aparente en 90,7%, Color verdadero en 85,4%, Conductividad en 80,9% y los Sólidos totales en 83,7% cumpliendo con la normativa para vertimientos relacionada con los parámetros medidos, dicha normativa expuesta en la Resolución No. 0631 de 2015.
- La máxima producción de hidrógeno se presentó con un flujo de 50 mL/min con 3,53 moles de hidrogeno por hora.
- Se logró reducir la carga contaminante de materia orgánica en un 86,14% mediante un tiempo aproximado de 5,33 horas de tratamiento para una muestra de ARD real a través de la PTAR piloto.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio específico acerca de la capacidad de la PTAR piloto para tratar Aguas Residuales Domésticas reales, diferenciando cada sección.
- Realizar un estudio para el tratamiento de Aguas Residuales Industriales a través de la aplicación de la tecnología de las Células de Flujo Iónico Selectivo.
- Analizar la concentración de diferentes metales, en especial el Cromo, puesto que se trata de un metal presente en los electrodos de acero inoxidable.
- Realizar estudios de procesos que se puedan generar alternos al objeto del presente trabajo de investigación como la composición de los gases producidos por las CFIS y los procesos termodinámicos involucrados en cada sección de la PTAR piloto.

8. PRODUCTOS DE LA INVESTIGACIÓN

- Se realizó una ponencia tipo poster en el V Congreso Colombiano de Electroquímica en la ciudad de Florencia Caquetá comprendido entre el 4 y el 7 de octubre de 2022, con un trabajo titulado “TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA Y REAL EN UNA PTAR PILOTO QUE APLICA LA TECNOLOGÍA DE LAS CÉLULAS DE FLUJO IÓNICO SELECTIVO (CFIS)”.
- Se está redactando un artículo científico para enviar a una revista científica para someter a evaluación.

9. REFERENCIAS

- Alvarez Huari, K. F., & Cabezas Sánchez, S. (2017). Optimización de la electrólisis de la orina humana para obtener hidrógeno como combustible usando como catalizador cloruro de sodio. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo. Perú.
- APHA, A. WEF (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22. Washington, American Public Health Association, USA.
- Barrera-Díaz, C., Urena-Nunez, F., Campos, E., Palomar-Pardavé, M., & Romero-Romo, M. (2003). A combined electrochemical-irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater. *Radiation physics and chemistry*, 67(5), 657-663.
- Bartsch, A. F., & Ingram, W. M. (1966). Biological analysis of water pollution in North America: With 1 table in the text. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 16(2), 786-800.
- Delacruz, C. (2018). Optimización de las condiciones para la generación de hidrógeno para aplicaciones vehiculares a partir de la electrólisis de la orina humana usando una celda electroquímica de cátodo y ánodo separados. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad de Nariño. Pasto. Colombia.
- Eduardoño, Blog Ambiental (<https://www.eduardono.com/ambiental/blog/blog-detalles/tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas-e-industriales-2#:~:text=Las%20aguas%20residuales%20dom%C3%A9sticas%20constan,las%20que%20proceden%20en%20origen>). Fecha de Consulta: 4 de mayo de 2022.

Hanna Instruments, Blog (hannaarg.com/blog/demanda-quimica-de-oxigeno-y-materia-organica/#:~:text=Los%20principales%20grupos%20de%20sustancias,residuales%2C%20se%20emplean%20diversas%20técnicas.)

Higiene Ambiental - Hanna Instruments. Blog. <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/color-del-agua-parametro-indicador-de-calidad/#:~:text=El%20color%20verdadero%20es%20el,de%20la%20turbidez%20del%20agua.>

Kao, C. M., Chou, M. S., Fang, W. L., Liu, B. W., & Huang, B. R. (2001). Regulating colored textile wastewater by 3/31 wavelength ADMI methods in Taiwan. *Chemosphere*, 44(5), 1055-1063.

Linares-Hernández, I., Miranda, V. M., Díaz, C. B., Pavón-Romero, S., Bernal-Martínez, L., & Lugo, V. L. (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. *Avances en ciencias e ingeniería*, 2(1), 21-36.

López, J. (2011). Evaluación de la eficiencia de un reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos UASB para el tratamiento de aguas residuales-escala laboratorio (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2011).

Lozada-Castro, J. J., Casanova-Vasco, C., & Arturo-Perdomo, D. (2017). Electronic Monitoring System for Hydrogen Produced from the Oxidation of Human Urine (Mhydros). *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(2), 52-57.

Lozano, W., & Rodríguez, I. (2012). Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio. *Revista de didáctica ambiental*, 11, 57.

- Martínez-Santacruz, C. Y., Herrera-López, D., Gutiérrez-Hernández, R. F., & Bello-Mendoza, R. (2016). Tratamiento de agua residual doméstica mediante un reactor RAFA y una celda microbiana de combustible. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 267-279.
- Peretti, H. A., & Visintin, A. (2005). Hidrógeno, combustible del futuro: ¿Por qué, cómo y dónde?. *Carbón*, 8, 15-20.
- Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A., & García-Espinoza, J. E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2), 257-271.
- Ramalho, R. (2012). *Introduction to wastewater treatment processes*. Elsevier.
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Reyes-Bozo, L. (2020). *Hidrógeno verde piedra angular del futuro energético*.
- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15.
- Saavedra Ruiz, N. S., Tacanga Flores, L. J., Vega Palomino, C. D., & Verde Mendieta, L. (2020). Obtención del hidrógeno de la orina para la generación de energías limpias mediante la electrólisis.
- Torres, P. T. (1996). Composición y uso de agua residual doméstica em reactores a escala de laboratório. In *Proceedings of XXV Congreso Interamericano-AIDIS Consolidacion para el desarrollo*.
- Water Boards California, State Water Resources Control Board. 2021. Disponible en; <https://www.waterboards.ca.gov/>.

Xiong, Y. A., Strunk, P. J., Xia, H., Zhu, X., & Karlsson, H. T. (2001). Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell with three-phase three-dimensional electrode. *Water research*, 35(17), 4226-4230.

10. ANEXOS

Certificado de Participación en el V Congreso Colombiano de Electroquímica

