



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tratamiento de aguas residuales mediante bio-electro-fenton  
impulsado por celda de combustible microbiana: Revisión  
sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

**AUTORES:**

Ayala Hinojosa, Yudith Marelin (ORCID: 0000-0002-2049-6416)

Chávez Loo, Angie Carolina (ORCID: 0000-0002-0573-1297)

**ASESOR:**

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (ORCID: 0000-0002-8200-4640)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA - PERÚ

2021

### **Dedicatoria**

Queremos dedicar el presente trabajo de investigación a los integrantes de nuestra familia, ya que, gracias al cariño, la confianza y el apoyo que nos brindan en cada paso que decidimos dar, nos alientan a lograr nuestras metas.

### **Agradecimiento**

A Dios, porque sin él nada de esto sería posible, a nuestros padres por darnos la vida y ayudarnos en el crecimiento personal de cada una de nosotras, al docente por brindarnos su apoyo con paciencia y dedicación en el logro de la realización del presente trabajo de investigación, a nuestra casa de estudios por abrirnos las puertas a mayores oportunidades de salir adelante.

## ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA .....	12
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	12
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística .....	12
3.3. Escenario de estudio .....	12
3.4. Participantes.....	12
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	13
3.6. Procedimientos.....	13
3.7. Rigor científico.....	16
3.8. Método de análisis de la información .....	16
3.9. Aspectos éticos .....	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	17
V. CONCLUSIONES .....	28
VI. RECOMENDACIONES .....	29
REFERENCIAS	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales investigaciones del sistema BEF.....	4
Tabla 2: Información relevante de los artículos seleccionados.....	15
Tabla 3: Principales parámetros de operación del método BEF en función del área del electrodo .....	20
Tabla 4: Principales parámetros de operación del método BEF en función del volumen del reactor .....	20

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principio de funcionamiento del sistema bio-electro-fenton.....	6
Figura 2: Diferentes modos de transferencia de electrones de los microbios al ánodo .....	7
Figura 3: Diagrama de búsqueda .....	14
Figura 4: Tipos de inóculos reportados en las investigaciones.....	17
Figura 5: Tipos de sustratos reportados en las investigaciones .....	18
Figura 6: Membranas separadoras de la cámara anódica y catódica .....	19
Figura 7: Principales aplicaciones del sistema BEF en la remoción de contaminantes. ....	22
Figura 8: Eficiencia de remoción de DQO en aguas residuales industriales .....	24
Figura 9: Eficiencia de remoción de colorantes .....	25
Figura 10: Eficiencia de remoción de medicamentos y compuestos endocrinos..	26
Figura 11: Eficiencia de remoción de pesticidas.....	27

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar los aspectos más relevantes del Bio-electro-fenton (BEF) en la remoción de contaminantes en las aguas residuales, se hizo una revisión en las bases académicas EBSCO y SCOPUS, se inició la búsqueda utilizando las palabras “bio-electro-fenton” and “wastewater” y “microbial fuel cell” and “electro fenton”, obteniendo 406 documentos los cuales se filtraron teniendo como resultado 17 documentos. Los principales parámetros que controlan el proceso BEF son el inóculo, sustrato, membrana, material de los electrodos, densidad de poder, densidad de corriente, resistencia externa, pH y flujo de aire. Las principales aplicaciones se dan en el campo de los medicamentos y compuestos endocrinos, seguidos por los colorantes, pesticidas y aguas residuales industriales. Se reportan eficiencias de hasta 100% en medicamentos y compuestos endocrinos, 95% en los colorantes, 100% en pesticidas y 93% en aguas residuales industriales. Es necesario realizar investigaciones respecto al uso de membranas de menor costo, así como buscar establecer parámetros a un grupo específico de contaminantes para ser tratados de manera óptima según las características que posee el efluente.

Palabras clave: Aguas residuales, Bio-electro-fenton, Celda de combustible microbiana, revisión sistemática.

## **ABSTRACT**

The objective of this research was to determine the most relevant aspects of the Bio-electro-fenton (BEF) in the removal of pollutants in wastewater, this review was made in the academic basics EBSCO and SCOPUS by initiating with the words "bio-electro-fenton" and "wastewater" and "microbial fuel cell" and "electro fenton", obtaining 406 documents which were filtered, resulting in 17 documents. The main parameters controlling the BEF process are inoculum, substrate, membrane, electrode material, power density, current density, external resistance, pH and air flow. The main applications are in the field of drugs and endocrine compounds, followed by dyes, pesticides and industrial wastewater. Efficiencies of up to 100% in drugs and endocrine compounds, 95% in dyes, 100% in pesticides and 93% in industrial wastewater were reported. It is necessary to carry out research on the use of lower cost membranes as well as to establish parameters for a specific group of pollutants to be optimally treated according to the characteristics of the effluent.

Keywords: Wastewater, Bio-electro-Fenton, Microbial fuel cell, systematic review.



## I. INTRODUCCIÓN

El rápido avance de la industrialización da como resultado el vertimiento de contaminantes recalcitrantes al ecosistema, los cuales degradan la calidad del agua. Las formas de tratamiento convencionales, como la adsorción, filtración, biológico, coagulación, etc., son poco útiles para eliminar estos contaminantes (Khare et al. 2021). Los tratamientos biológicos para contaminantes orgánicos en aguas residuales son muy empleados, sin embargo, consumen tiempo, requieren de grandes áreas y no son efectivos para eliminar contaminantes tóxicos y no biodegradables (Martínez-Huitle et al. 2015).

El proceso Fenton, perteneciente a los procesos de oxidación avanzada (POA), es una opción atractiva y eficiente para tratar contaminantes orgánicos recalcitrantes (Asghar, Abdul Raman y Wan Daud 2015), debido al alto poder oxidativo de los radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ) formados por la reacción del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) con los iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (Gligorovski et al. 2015). Aun así, este proceso tiene ciertas deficiencias: el bajo rango de pH, elevado costo y riesgos asociados con el manejo, transporte y almacenamiento de reactivos ( $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$ ), y la contaminación secundaria por los lodos de hierro (Zhang et al. 2019).

El Electro Fenton (EF) comprende la electro generación in situ y continua de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en el cátodo alimentado con oxígeno, la adición del catalizador de  $\text{Fe}^{2+}$  a la solución y la reducción catódica de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  con la producción continua del reactivo fenton (Brillas, Sirés y Oturan 2009). Aunque el EF ofrece ventajas significativas sobre el fenton convencional, este se ve limitado por la lenta producción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  debido a la baja solubilidad del oxígeno, la baja eficiencia de corriente a un pH elevado y los altos costos operacionales (He y Zhou 2017)

Es por ello, que el proceso EF en combinación con los métodos biológicos, llamado proceso bio-electro-fenton (BEF), brinda en conjunto un alto poder oxidativo del EF y la rentabilidad del método biológico (Li, Hua, Li, et al. 2020).

Además, el sistema BEF al ser impulsado por la celda de combustible microbiana (CCM), una tecnología de producción de energía y tratamiento de aguas residuales (Flimban et al. 2018) hace que este proceso sea superior a otros en cuanto a su elevada eficacia, baja toxicidad, condiciones de operación moderada, sin generación de lodos y ahorro energético (Li et al. 2018). El factor clave que hace a este proceso diferente y más económico es que la energía eléctrica utilizada en el BEF es proporcionado por la materia orgánica, en vez de las tradicionales fuentes de electricidad (Zou et al. 2020).

Bajo este entorno se propuso como **problema general** ¿Cuáles son los aspectos más relevantes del BEF en la remoción de contaminantes en aguas residuales? Considerando como **problemas específicos**: ¿Cuáles son los principales parámetros de operación y su influencia en el proceso BEF para la remoción de contaminantes en aguas residuales?, ¿Cuáles son las aplicaciones del proceso BEF en la remoción de contaminantes en aguas residuales? y ¿Cuáles son las eficiencias de la tecnología BEF?

Este estudio se justificó debido a que la tecnología BEF al ser un tema novedoso aún tiene pocas investigaciones al respecto, por lo que esta revisión sistemática proporciona una visión general de los estudios en este campo, los principales hallazgos y métodos utilizados en las investigaciones, y así brindar información a futuros investigadores.

Por ello, el **objetivo general** fue determinar los aspectos más relevantes del BEF en la remoción de contaminantes en aguas residuales. Teniendo como **objetivos específicos**: Determinar los principales parámetros de operación y su influencia en el proceso BEF para la remoción de contaminantes en aguas residuales, identificar las aplicaciones del proceso BEF en la remoción de contaminantes en aguas residuales y determinar las eficiencias de la tecnología BEF.

## II. MARCO TEÓRICO

Como antecedentes se recopilaron diferentes fuentes bibliográficas indexadas del 2013 al 2020, donde se manifiestan las condiciones de operación aplicadas en la remoción de contaminantes en diferentes tipos de efluentes. Estas investigaciones se presentan en la tabla 1.

El sistema BEF utiliza la Celda de Combustible Microbiana (CCM) para proporcionar energía al proceso electro fenton y tratar las aguas residuales recalitrantes (Li, Hua, Yuan, et al. 2020). Esto debido a que el CCM es un dispositivo electroquímico que puede convertir la energía química de la materia orgánica en energía eléctrica (Abourached, Catal y Liu 2014). Este proceso se lleva a cabo en el ánodo por microorganismos electrogénicos, los cuales al descomponer la materia orgánica liberan electrones y protones (Zhang y Tao 2018), tal como se muestra en la figura 1.

Los electrones ( $e^-$ ) pasan hacia el cátodo mediante un conductor externo, mientras que los protones lo hacen a través de la membrana (Javed et al. 2016), la cual impide que el aire que fluye en el cátodo pase hacia el ánodo, por lo que la electricidad generada por los microorganismos no se ve afectada (Wang y Wang 2017).

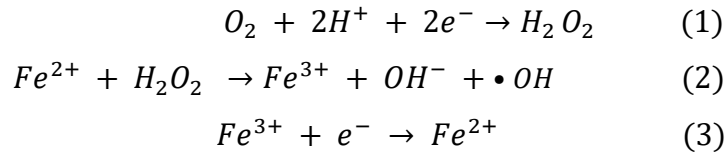
En el cátodo, se genera in situ el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) debido a la reducción de 2 electrones de oxígeno (Ec.1) (Kahoush et al. 2017). Luego, el  $H_2O_2$  reacciona con los iones ferrosos ( $Fe^{2+}$ ) que son añadidos externamente o desprendidos por ciertos materiales del cátodo (Zhu y Logan 2013), para producir radicales hidroxilo ( $\bullet OH$ ) (Ec.2) mediante la reacción fenton (Lin et al. 2017), el cual es un poderoso oxidante  $E= 2.80 V/SHE$ ) capaz de reaccionar de forma no selectiva con la mayoría de compuestos orgánicos mediante hidroxilación o deshidrogenación hasta su total mineralización (Sirés y Brillas 2012), después el  $Fe^{2+}$  son generados in situ (Ec.3) (Birjandi et al. 2020).

**Tabla 1: Principales investigaciones del sistema BEF**

Autores	Contaminante	Volumen de trabajo	Condiciones de operación		Resultados
			Tratamiento biológico	EF	
Birjandi et al. 2016	Efluente de la fábrica de hierbas medicinales	450 mL en cada cámara	A: placa de grafito I: lodos anaeróbicos S: hierbas medicinales puras	C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / grafito pH: 3 Flujo de aire: 300 mL/min	DQO: 84.02%
Birjandi et al. 2020	Efluente de la fábrica de hierbas medicinales	A:400 mL C:350 mL	A: placa de grafito I: lodos anaeróbicos S: hierbas medicinales puras	C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / grafito pH:3 Flujo de aire: 300 mL/min	DQO: 93%
Xu et al. 2020	Aguas residuales porcinas y Rodamina B (RhB)	100 mL en cada cámara	A: ACF I: lodos anaeróbicos S: aguas residuales porcinas	C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ACF pH: 3 Flujo de aire: 0.3 L/min	RhB: 95%
Ling et al. 2016	Naranja de metilo (NM)	550 mL	A: cepillo de fibra de grafito I: lodos anaeróbicos	C: Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ACF pH: 2 Flujo de aire: 750 mL/min	NM: varia de 73.9 – 86.7%
Wang y Wang 2017	Colorante Negro Reactivo 5 (RB5)	130 mL	A: Filtro de carbono I: Agua productos lácteos	C: FePc/CNT/SS316	RB5: 84.6%
Wang et al. 2020	Colorante Negro Reactivo 5 (RB5)	448 mL	A: Filtro de carbono I: Agua de productos lácteos	C: FePc/CNT/C	RB5: 61.79%
Zhang, Yin y Li 2015	Paracetamol (PAM)	A:108 mL C: 216 mL	A: Filtro de grafito I: Cultivo mixto S: 50 mM PBS	C: Placa de grafito pH: 2 Flujo de aire: 16.7 mL/min	PAM: 70%
Wang et al. 2016	Bisfenol A (BPA), estrona (E1), sulfametazona (SM2), triclocarbán (TCC)	64 mL en cada cámara	A: barra de grafito I: lodos anaeróbicos S: glucosa	C: barra de grafito pH: 3	BPA: 73% E1 y SM2: 100% TCC: 99%
Li, Hua, Yuan, et al. 2020	Sulfametoxazol (SMX)	28 mL	A: Tela de carbono I: 50 mM PBS	C: CNT/ γ - FeOOH Flujo de aire: 20 mL/min	SMX: 94.66%

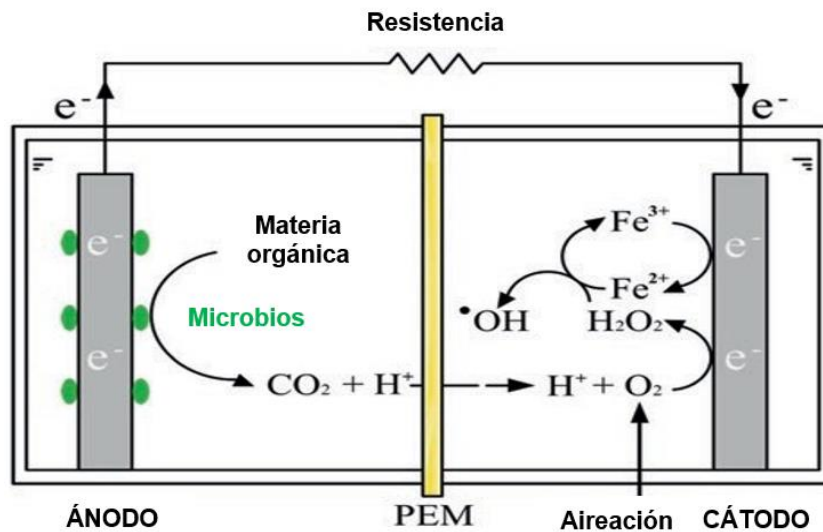
Xu et al. 2015	17 $\beta$ estradiol (E2)	75 mL	S: SMX A: FC/grafito granular I: lodos anaeróbicos S: acetato de sodio	t: 24h C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NCF pH:3, t: 6h	E2: 96.4%
Xu et al. 2013	17 $\beta$ estradiol (E2) y 17 $\alpha$ - etinilestradiol (EE2)	75 mL	A: FC/grafito granular I: lodos anaeróbicos S: glucosa	C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NCF pH:3; t: 10h Flujo de aire: 100 mL/min	E2: 81% EE2: 56%
Tao et al. 2013	<i>p</i> -nitrofenol	A:120 mL C: 50 mL	A: Filtro de carbono I: lodos anaeróbicos S: acetato de sodio	C: Filtro de carbono pH: 2; t: 6h Flujo de aire: 100 mL/min	PNP: 96%
Li et al. 2019	Compuestos fenólicos: ácido siríngico (SA), ácido vanílico (VA) y 4-hidroxibenzoico (HBA)	70 mL	A: filtro de grafito I: Aguas de alcantarillado municipal S: glucosa	C: Fe-Mn/ filtro de grafito pH: 3 Flujo de aire:500 mL/min	SA, VA, HBA: 100%
Xu, Xu y Shi 2018	Fenoles	100 mL	A: Filtro de carbono I: Consorcio microbiano S: glucosa	C: FeVO <sub>4</sub> /CF pH: 7 Flujo de aire: 100 mL/min	Fenoles: 85.7%
Yong et al. 2017	Cloruro de trifenilestaño (TPTC)	30 mL	A: Tela de carbono I: <i>S. oneidensis</i> S: Lactato de sodio	C: Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / filtro de grafito pH: 3 Flujo de aire: 100 mL/min	TPTC: 78.32%
Wang et al. 2014	Arsenito As(III)	75mL	A: Filtro de carbono I: <i>Shewanella putrefaciens</i> S: Lactato de sodio	C: $\gamma$ - FeOOH pH: 7 Flujo de aire: 100 mL/min	As(III): 98.5%
Zhao y Kong 2018	Piraclostrobina (PYR)	120 mL	A: Filtro de carbono I: Lodos activos S: acetato de sodio	C: Filtro de carbono	PYR: 100%

A: ánodo; I: inóculo; S: sustrato; C: cátodo



En la figura 1 se observan dos cámaras (ánodo y cátodo), en el ánodo los microbios se encargan de descomponer la materia orgánica para liberar electrones ( $e^-$ ) y protones ( $H^+$ ). Los ( $e^-$ ) ingresan al cátodo a través de una resistencia externa, mientras que los ( $H^+$ ) lo hacen a través de la membrana (PEM). Esta última impide que el aire que fluye en el cátodo ingrese en el ánodo. Luego, en el cátodo se genera in situ el  $H_2O_2$  por la reducción de 2 electrones de oxígeno (Ec.1). Este reacciona con  $Fe^{2+}$  para producir  $\bullet OH$  (Ec.2), un poderoso oxidante capaz de eliminar contaminantes recalcitrantes.

**Figura 1: Principio de funcionamiento del sistema bio-electro-fenton**



PEM: Membrana intercambiadora de protones.

Fuente: Zhang y Tao, 2018.

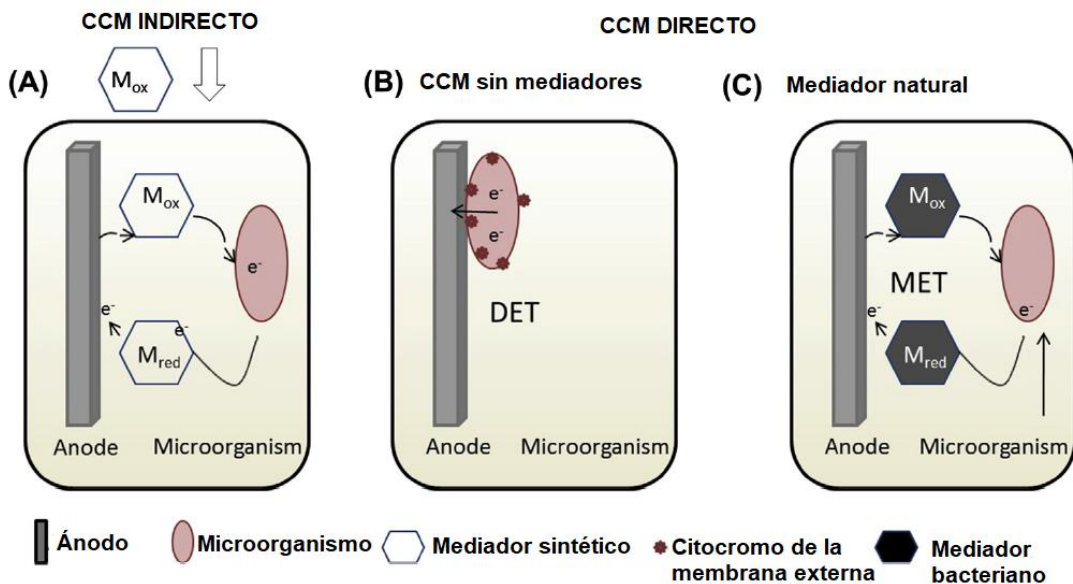
Para que se lleve a cabo el proceso bio electro fenton de manera satisfactoria se debe considerar lo siguiente:

Los microorganismos presentes en el inóculo se encuentran adheridos a la superficie del ánodo en donde producen enzimas que sirven como

biocatalizadores para la oxidación de compuestos orgánicos (Shestakova y Sillanpää 2017), lo cual genera electrones que son desprendidos hacia el exterior y capturados por el electrodo, para posteriormente pasar a la cámara del cátodo (Fernández De Dios et al. 2014). Generalmente, los electrones pueden ser transportados hacia el ánodo por medio de mediadores artificiales, como mediador el propio microorganismo y por transferencia directa de electrones (Selvaraj et al. 2020).

En la figura 2, se muestra los tres mecanismos en los que los microorganismos transfieren los electrones hacia el ánodo.

**Figura 2: Diferentes modos de transferencia de electrones de los microbios al ánodo**



Fuente: Roy y Pandit, 2019.

Como se observa en la figura 2, en el CCM indirecto (A) los microorganismos no electrogénicos al ser incapaces de donar electrones directamente son utilizados como catalizadores, pero complementados con mediadores redox. En el CCM directo, el CCM sin mediadores (B) es donde la bacteria forma una biopelícula conductora mediante DET (modo de transferencia directa de electrones). En (C) los microbios producen mediadores para donar electrones

al ánodo directamente. *MET* (*mediador de transferencia de electrones*).

El sustrato es sumamente importante ya que no solo influye en la comunidad bacteriana sino que también en el rendimiento del reactor, la densidad de poder y la producción de peróxido (Zhao et al. 2021). Los investigadores de los estudios analizados utilizan distintos sustratos como a las hierbas medicinales puras (Birjandi et al. 2016; Birjandi et al. 2020), aguas residuales porcinas (Xu et al. 2020), glucosa (Wang et al.; Xu et al. 2013), acetato (Xu et al. 2015; Zhao y Zhang 2021), lactato de sodio (Yong et al. 2017), entre otros.

Los electrodos a utilizar en la cámara del ánodo y del cátodo deben presentar las siguientes características: en el ánodo, poseer estabilidad, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad para lograr una buena adherencia con las sociedades microbianas, y proporcionar una gran superficie que permita más contacto con los microbios en crecimiento (Kahoush et al. 2017). Los más utilizados son a base de carbono como el fieltro de carbono (Wang et al. 2020), fieltro de grafito (Li et al. 2019), tela de carbono (Yong et al. 2017), etc. En el cátodo, debe poseer buena conductividad eléctrica, estabilidad y resistencia a la corrosión en medio ácido y permitir la producción efectiva de peróxido (Yu et al. 2018). Generalmente, estos también son a base de carbono como el carbón activado granular (Santoro et al. 2017), fieltro de carbono/grafito granular (Xu et al. 2015), placa de grafito (Zhang, Yin y Li 2015), entre otros. Sin embargo, hay investigadores que utilizan compuestos de hierro en el electrodo como Fe@Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NCF (Xu et al. 2013),  $\gamma$  - FeOOH (Wang et al. 2014), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ACF (Ling et al. 2016), etc. Para evitar la adición de hierro en la cámara del cátodo.

La membrana tiene como función mantener en condiciones estables el lugar donde las bacterias están en crecimiento y prevenir que el •OH y los contaminantes se transfieran del cátodo al ánodo (Li et al. 2018). La más utilizada en el sistema BEF es la membrana de intercambio protónico, cuya función es separar la cámara del ánodo y del cátodo mientras permite el



transporte de protones desde el ánodo hacia el cátodo, con la finalidad de mantener la corriente eléctrica generada (Chae et al. 2008).

La resistencia externa regula tanto la disponibilidad del ánodo como aceptor de electrones como el flujo de electrones a través del circuito, también influye en la generación de energía, la remoción del DQO y la producción de biomasa (Jung y Pandit 2019). Katuri et al. (2011) nos dice que una baja resistencia provoca el enriquecimiento de bacterias electrogénicas y mejora la densidad de corriente de salida. Además, la producción de  $H_2O_2$  en la cámara catódica está en relación directa con la densidad de corriente la cual a su vez está ligada a la resistencia externa aplicada.

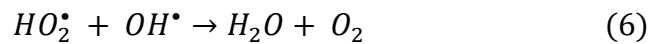
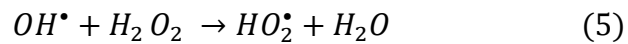
La generación de la densidad de corriente está ligada directamente con la habilidad de los microorganismos para oxidar un sustrato y transferir los electrones producto de esa oxidación hacia el ánodo (Pant et al. 2010). Por otro lado, afecta la eficiencia del proceso electro fenton ya que este regula la cantidad de  $\bullet OH$  a través de la electrogeneración de peróxido (Ec.1) y la continua regeneración de  $Fe^{2+}$  a partir del  $Fe^{3+}$  (Ec.3) (Dominguez et al. 2017).

La fuente de los iones de hierro se añaden a la cámara catódica de dos maneras, a través de la adición directa de sales de hierro como el  $FeSO_4$ ,  $FeCl_3$ , entre otros, cuya dosificación se encuentra en el rango de 0.1 y 0.5 mM (Hassan et al. 2019) a escala de laboratorio cuyo volumen se encuentra ente 5 y 500 mL, o por medio de la corrosión de compuestos de hierro que se encuentran en el electrodo del cátodo (Zhao et al. 2021). La aplicación de cátodos híbridos de carbono/hierro evita el exceso de hierro en el catolito, lo que reduce el costo y el esfuerzo de recuperación del hierro en el cátodo cuando se acaba la reacción (Kahoush et al. 2017).

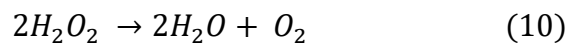
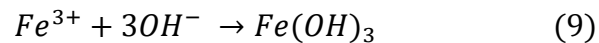
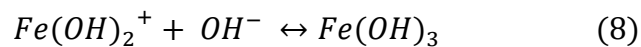
El peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), puede reaccionar con  $Fe^{2+}$  para formar  $\bullet OH$  (Ec.2) el cual se encargará de oxidar los contaminantes inorgánicos presentes en las aguas residuales y eliminarlos (Kahoush et al. 2017). El peróxido de hidrógeno se produce electroquímicamente en el cátodo mediante una

reacción de reducción de oxígeno que involucra 2 electrones (Ec.1) (Nadais et al. 2018).

Generalmente el aumento de la concentración de  $H_2O_2$  incrementa la eficiencia de remoción de contaminantes (Rivas et al. 2001; Li et al. 2018), sin embargo, su producción excesiva no solo podría generar un mayor gasto económico, sino que también reduce la eficiencia de remoción del contaminante al perderse los radicales hidroxilo ( $\bullet OH$ ) (Ec.5 y 6) o la recombinación del  $\bullet OH$  (Ec.7) y esto da lugar a la formación de otras reacciones químicas (He y Zhou 2017).



La producción de peróxido requiere de un medio ácido, pues a  $pH > 5$  los iones de hierro pueden precipitar a  $Fe(OH)_3$  (Ec.8 y 9) lo cual disminuye la cantidad del catalizador en la solución y se descompone el  $H_2O_2$  en  $O_2$  y  $H_2O$  (Ec.10) (Sirés y Brillas 2012; Fu et al. 2010). Mientras que a un  $pH < 2$  el  $H_2O_2$  se transforma en peroxonio ( $H_2O_3^+$ ) el cual es menos reactivo con el  $Fe^{2+}$  en la formación de  $\bullet OH$  (Feng, Hu y Yue 2003). Por ello, el rango de pH óptimo de la reacción Fenton es de 2.5 a 3.5 (Li et al. 2017).



El flujo de aire influye en la transferencia de oxígeno y en las condiciones hidrodinámicas de los reactores. Para el caso de un tasa de flujo muy baja, no se puede saturar la solución correctamente y esta transferencia se convierte en un limitante, afectando la producción de  $H_2O_2$  (Ec.1) y en consecuencia la generación de  $\bullet OH$  (Ec.2) (Monteil et al. 2019). Por otro lado, una tasa de flujo de aire elevada aumenta el oxígeno disuelto en la solución, lo que es

beneficioso para la producción y acumulación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Sin embargo, tasas de flujo de aire extremadamente altas causa una disminución en la acumulación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Ling et al. 2016).

Las variaciones de temperatura afecta la dinámica del sistema, la transferencia de masa, la termodinámica y la diversidad de la comunidad microbiana (Oliveira et al. 2013). En la cámara anódica, se sugiere que el sistema sea llevado en su mayoría a un intervalo de 25-35°C (Hassan et al. 2019). Aunque investigaciones realizadas nos dan a conocer que la actividad electroquímica de los microorganismos llega a ser optima a 30°C de temperatura (Kyazze et al. 2010; Omid y Sathasivan 2013).

La cámara catódica utiliza temperatura ambiente (20-25°C) para la producción de peróxido. Esto debido a que a altas temperaturas la solubilidad del O<sub>2</sub> en el agua decrece lo que produce una reducción de la producción de peróxido (Asghar, Abdul Raman y Daud 2014).

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

El tipo de investigación fue de tipo aplicada, también conocida como práctica o empírica, ya que tiene la finalidad de aplicar los conocimientos adquiridos, Lester menciona que estos posteriormente pasan a ser evaluados, comparados, interpretados, se establecen precedentes, se determina la causa y el efecto (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014). La investigación de tipo aplicada y teórica son necesarias ya que se realimentan y se corrigen mutuamente (Muñoz Rocha 2015).

El diseño de investigación fue no experimental, ya que en este tipo de investigación observa situaciones previamente existentes para posteriormente analizarlos (Cortés Cortés y Iglesias León 2004), estos estudios se hacen sin manipular las variables (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014).

#### **3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística**

La tabla 2 de categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística se encuentra en el Anexo 1.

#### **3.3. Escenario de estudio**

La presente investigación no contó con un escenario de estudio específico, ya que se trató de una investigación de revisión sistemática.

#### **3.4. Participantes**

El trabajo de investigación tuvo como participantes a artículos de revistas indexadas extraídas de las siguientes bases de datos: EBSCO y

SCOPUS; de los cuales se pudo reunir la información necesaria para cumplir con los objetivos planteados.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Recolectar datos es primordial, ya que en un enfoque cualitativo se busca obtener los datos que se convertirán en información. Se reunieron estos datos con la finalidad de comprenderlos y analizarlos para así contestar las interrogantes de investigación y crear conocimiento para futuros investigadores (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado y Baptista Lucio 2010).

En esta etapa se emplean fichas bibliográficas que contengan ideas, cifras, citas, resúmenes, etc., pues es muy importante que esta ficha tenga información sobre el texto analizado (Reyes y Boente 2019).

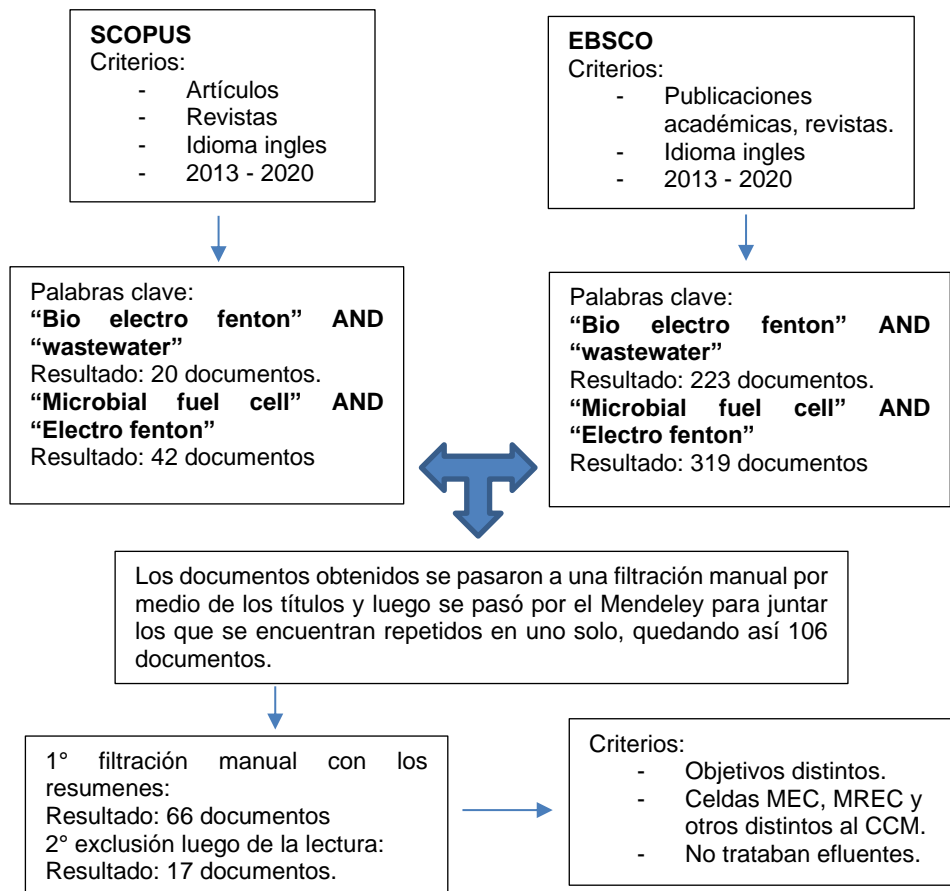
Se realizó una ficha para recolectar y extraer datos la cual se encuentra en el Anexo 2, donde se incluyó el tipo de efluente, tipo de proceso, condiciones de operación, equipo, autores, objetivo, metodología, resultados, conclusiones.

### **3.6. Procedimientos**

Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación se realizó la búsqueda de artículos indexados de dos bases de datos muy reconocidas a nivel mundial: SCOPUS Y EBSCO. Con la finalidad de que la información obtenida para el desarrollo de los objetivos sea confiable y verídica.

En la siguiente figura número 3 se muestra el diagrama de criterio de búsqueda que fue utilizada para la investigación utilizando las bases académicas EBSCO y SCOPUS.

**Figura 3: Diagrama de búsqueda**



Como se puede observar en el diagrama, en la primera etapa se realizó la búsqueda de información en las bases académicas SCOPUS y EBSCO con las palabras claves. En SCOPUS se tuvo como resultado 62 documentos y en EBSCO se obtuvieron 542 documentos, los cuales fueron de publicaciones académicas y revistas por lo que se tuvo que quitar los libros y noticias que salieron en los resultados. En la segunda etapa pasaron a filtrarse por medio de los títulos y luego por el Mendeley para juntar en uno solo los artículos repetidos, en la tercera etapa se pasaron a filtrar manualmente los artículos por los resúmenes que tenían estos teniendo como resultado 66 documentos, en la última etapa se pasó a revisar los 66 documentos para luego obtener como resultado final 17 documentos que formaron parte de la investigación.

### **Criterios de inclusión:**

- Publicaciones académicas de revistas indexadas.
- Publicaciones académicas del 2013 al 2020.
- Publicaciones que contengan los tratamientos CCM.
- Publicaciones académicas que traten aguas residuales.

### **Criterios de exclusión:**

- Publicaciones académicas con objetivos distintos.
- Publicaciones que utilicen las celdas CEM, MREC y otros distintos al CCM.
- Publicaciones académicas que no trataban efluentes.

En la siguiente tabla número 2 se observa los artículos seleccionados previamente codificados por el autor y el tipo de contaminante que trata.

***Tabla 2: Artículos incluidos en la revisión del presente estudio***

<b>Código</b>	<b>Autores</b>	<b>Contaminante</b>
<b>A1</b>	Birjandi et al. 2016	Efluente de la fábrica de hierbas medicinales
<b>A2</b>	Birjandi et al. 2020	Efluente de la fábrica de hierbas medicinales
<b>A3</b>	Xu et al. 2020	Rodamina B
<b>A4</b>	Ling et al. 2016	Naranja de metilo
<b>A5</b>	Wang y Wang 2017	Colorante Negro Reactivo 5 (RB5)
<b>A6</b>	Wang et al. 2020	Colorante Negro Reactivo 5 (RB5)
<b>A7</b>	Zhang, Yin y Li 2015	Paracetamol
<b>A8</b>	Wang et al. 2016	Bisfenol A, estrona, sulfametazona, triclocarbán
<b>A9</b>	Li, Hu, Yuan et al. 2020	Sulfametoxazol
<b>A10</b>	Xu et al. 2015	17 $\beta$ estradiol (E2)
<b>A11</b>	Xu et al. 2013	17 $\beta$ estradiol (E2) y 17 $\alpha$ -etinilestradiol (EE2)

<b>A12</b>	Tao et al. 2013	p-nitrofenol
<b>A13</b>	Li et al. 2019	Compuestos fenólicos
<b>A14</b>	Xu, Xu y Shi 2018	Fenoles
<b>A15</b>	Yong et al. 2017	Cloruro de trifenilestaño
<b>A16</b>	Wang et al. 2014	Arsenito
<b>A17</b>	Zhao y Kong 2018	Piraclostrobina

### **3.7. Rigor científico**

El presente trabajo de investigación posee criterios que establecen tanto su validez como la credibilidad, ya que se ha captado a profundidad el significado de las experiencias de los participantes y se tiene la capacidad de expresar los puntos de vista de estos; la confirmación, que está de la mano con la credibilidad, implica revisar las fuentes de los datos obtenidos (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado y Baptista Lucio 2010).

### **3.8. Método de análisis de la información**

El análisis de la información que se escogió y se organizó fue mediante categorías y subcategorías que surgieron a partir de la formulación de los objetivos (Cisterna C. 2005), lo cual nos ayudó a manejar de manera correcta la información recopilada para la investigación con la finalidad del cumplimiento de los objetivos.

### **3.9. Aspectos éticos**

La investigación fue elaborada con información de documentos verídicos y contrastables, la información obtenida que fue plasmada en el trabajo de investigación fue tomada de fuentes confiables como revistas indexadas, la información tomada fue citada de manera correcta respetando la autoría de cada uno de los autores.

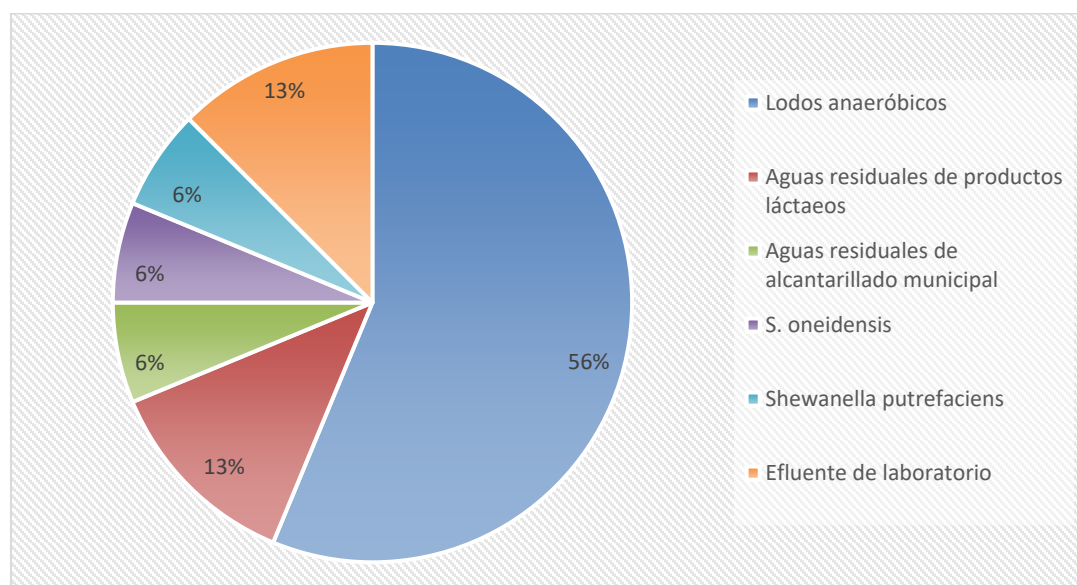


#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostrados en el presente trabajo de investigación provienen de los datos obtenidos de las 17 investigaciones presentadas en los antecedentes.

Los principales parámetros de operación del BEF reportadas en las investigaciones son: el inóculo, sustrato, membrana, material de los electrodos, densidad de poder, densidad de corriente, resistencia externa, pH y flujo de aire. Respecto al primer parámetro mencionado, en la figura 4 se muestra el tipo y porcentaje de cada inóculo utilizado en la cámara anódica en cada una de las investigaciones.

**Figura 4: Tipos de inóculos reportados en las investigaciones**

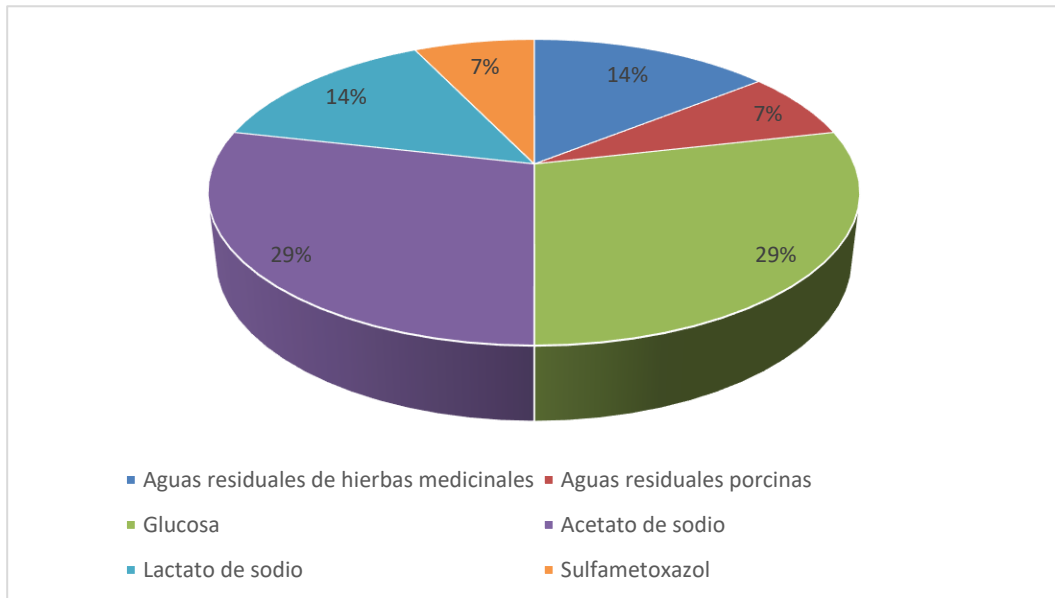


La elección de la fuente de inóculo es un parámetro clave en el proceso BEF puesto que estos generan electrones que son desprendidos hacia el exterior y capturados por el electrodo, para posteriormente pasar a la cámara del cátodo (Fernández De Dios et al. 2014). Los cultivos puros (*S. oneidensis*, *Shewanella putrefaciens*) o mixtos (combinación de diferentes tipos de microorganismos) son frecuentemente usados como inóculos. Como se observa en la figura 4, el inóculo más utilizado por los investigadores con un

56% del total son los lodos anaeróbicos, que contienen microorganismos electrogénicos activos capaces de transferir electrones (Schaeztle, Barrière y Baronian 2008). Ya que a mayor número de especies electroactivas mayor degradación de sustrato y por ende un mayor flujo de protones y electrones son generados (Veerubhotla, Varanasi y Das 2018).

En la figura 5, se muestra el tipo y porcentaje de cada sustrato reportado por las investigaciones.

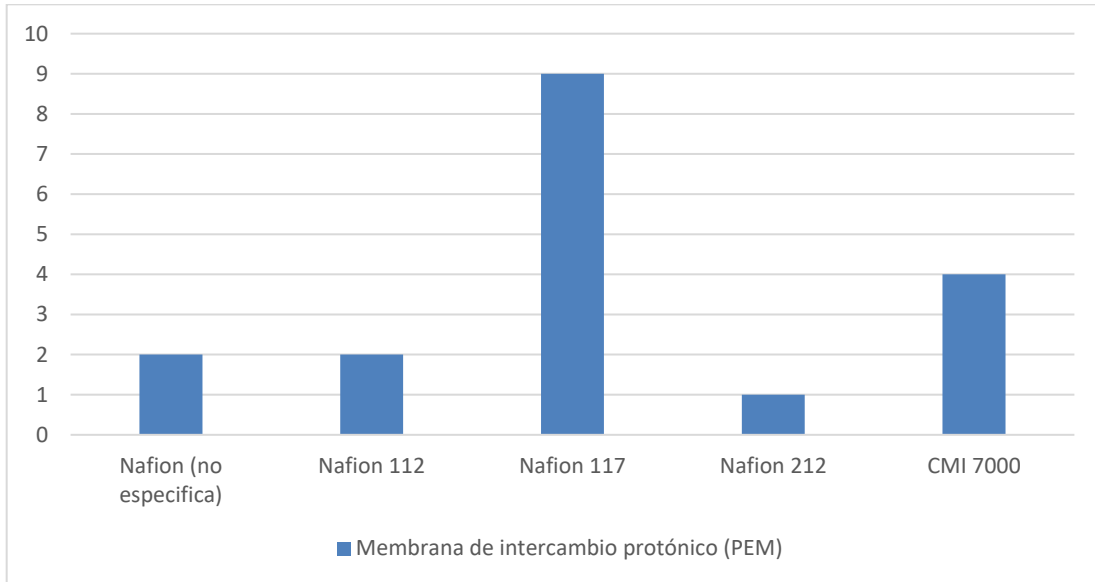
**Figura 5: Tipos de sustratos reportados en las investigaciones**



La aplicación del sustrato es importante ya que este influye en la comunidad bacteriana, el rendimiento del reactor, la densidad de poder y la producción de peróxido (Zhao et al. 2021). Pues la generación de energía depende en gran medida de la naturaleza del sustrato. Como se muestra en la figura 5, la glucosa y el acetato representan entre los dos el 58% del total, esto debido a su forma simple y por ser fáciles de degradar para producir mayor cantidad de energía en comparación con los sustratos orgánicos complejos, por ejemplo, las aguas residuales (Jung y Pandit 2019).

En la figura 6, se señala el tipo de membranas reportadas por los diferentes autores en sus investigaciones y cuales ha sido los más empleados.

**Figura 6: Membranas separadoras de la cámara anódica y catódica**



El material de las membranas separadoras deben poseer un alto coeficiente de transferencia de protones al cátodo, y una baja transferencia de oxígeno hacia el ánodo para una buena eficacia del BEF (Flimban et al. 2018). Por ello, el PEM es muy utilizado por su alta conductividad de cationes y su baja resistencia interna comparada con otras membranas (Zhang et al. 2009). Como se aprecia en la figura 6, La membrana empleada con mayor frecuencia en las investigaciones es el nafion 117 debido a su conducción específica de cationes, durabilidad e hidratación. Sin embargo, es costosa, inestable a altas temperaturas y transmisor de otros cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  aparte de los protones (Subha et al. 2020). Por otro lado, la membrana CMI 7000, es mucho más gruesa y rígida que la Nafion 117 y estructuralmente parece ser más resistente. En cuanto a los costos el Nafion puede llegar a costar entre los  $1,400 \text{ \$/m}^2$  en comparación con el CMI-7000 que cuesta alrededor de los  $80 \text{ \$/m}^2$  (Logan y Wiley 2007) lo que demuestra que el nafion generaría un mayor costo si se generara el proceso BEF a gran escala.

En las tablas 3 y 4, se presentan los parámetros de operación que permiten que se lleve a cabo la generación de energía para que funcione el proceso BEF.

**Tabla 3: Principales parámetros de operación del método BEF en función del área del electrodo**

Material del ánodo	Material del cátodo	Max. Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Max. Densidad de poder (W/m <sup>2</sup> )	Resistencia Externa (Ω)	pH	Flujo de aire (mL/min)	Remoción del contaminante (%)	Ref.
Filtro de carbono	FePc/CNT/SS316	3.21	0.73	-----	-----	-----	RB5: 84.6	A5
	FePc/CNT/C	2.11	0.21	-----	-----	-----	RB5: 61.79	A6
	Filtro de carbono	0.24	-----	20	2	100	PNP: 96	A12
	γ-FeOOH	0.56	0.14	1000	7	100	As(III): 98.5	A16
	Filtro de carbono	0.79	-----	1000	1.21	27.31	PYR: 100	A17
Placa de grafito	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / grafito	0.55	0.06	100	3	300	DQO: 84.02	A1
	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / grafito	0.60	0.18	100	3	300	DQO: 93	A2
Filtro de grafito	Placa de grafito	2.38	-----	20	2	16.7	PAM: 70	A7
	Fe-Mn/ filtro de grafito	1.16	0.43	10	3	500	SA, VA y HBA: 100	A13
Tela de carbono	CNT/ γ-FeOOH	-----	0.28	1000	-----	20	SMX: 94.66	A9
	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / filtro de grafito	0.25	0.06	2000	3	100	TPTC: 78.32	A15

**Tabla 4: Principales parámetros de operación del método BEF en función del volumen del reactor**

Material del ánodo	Material del cátodo	Max. Densidad de corriente (A/m <sup>3</sup> )	Max. Densidad de poder (W/m <sup>3</sup> )	Resistencia Externa (Ω)	pH	Flujo de aire (mL/min)	Remoción del contaminante (%)	Ref.
ACF	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ACF	37.5	16.7	120	3	300	RhB: 95	A3
Filtro de carbono	FeVO <sub>4</sub> /CF	2.6	0.85	-----	7	100	Fenoles: 85.7	A14
Filtro de carbono/grafito granular	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NCF	-----	4.35	150	3	1.0	E2: 96.4	A10
	Fe@Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NCF	-----	4.35	1000	3	100	E2: 81 EE2: 56	A11
Cepillo de fibra de grafito	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ACF	0.70	0.27	100	2	750	NM: 86.7	A4
Barra de grafito	Barra de grafito	31	0.63	1000	3	-----	E1 y SM2: 100 BPA: 73 TCC: 99	A8

En las tablas 3 y 4 se muestran los parámetros de operación utilizados en el proceso BEF de acuerdo al área del electrodo y del volumen del reactor respectivamente. La primera mide la densidad de potencia superficial para comparar las características de los electrodos mientras que la segunda mide la densidad de potencia volumétrica para evaluar el rendimiento de toda la celda (Fan, Hu y Liu 2007).

Se puede observar en ambas tablas que los materiales utilizados como electrodos en la cámara anódica son principalmente a base de carbono, como fieltro de carbono (Xu et al. 2020; Wang et al. 2020; Xu, Xu y Shi 2018), placa de grafito (Birjandi et al. 2016), tela de carbono (Li, Hua, Yuan, et al. 2020), barra de grafito (Wang et al. 2016), etc. Esto debido a su alta conductividad eléctrica, estabilidad, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad y dureza para la formación de biopartículas (Kahoush et al. 2017). En la cámara catódica también se utilizan materiales de carbono sin embargo muchos autores consideran utilizar compuestos de hierro como electrodos para evitar añadir el Fe externamente y así ahorrar costos de operación, ya que mediante la corrosión del compuesto se produce  $\text{Fe}^{2+}$  para reaccionar con el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , algunos de estos compuestos son:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Ling et al. 2016),  $\text{Fe}@\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Birjandi et al. 2016; Xu et al. 2015; Yong et al. 2017),  $\gamma\text{-FeOOH}$  (Wang et al. 2014), entre otros.

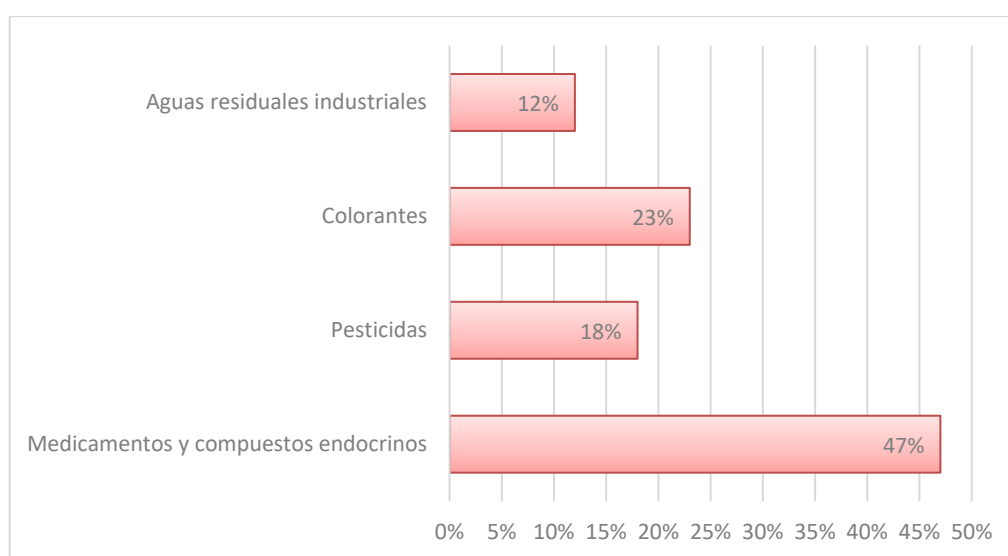
Se puede destacar también de ambas tablas que con la máxima densidad de poder se genera mayor eficiencia de transferencia externa de electrones y por ende una mayor tasa de remoción del contaminante. Esto se comprueba con la remoción de  $17\beta$  estradiol=96.4% cuando la densidad de poder máxima fue de  $4.35 \text{ W/m}^3$  y a una resistencia externa (R) de  $150 \Omega$  (Xu et al. 2015). Además, la mayor remoción de Rodamina B= 95% fue obtenida a una máxima densidad de poder igual a  $16.7 \text{ W/m}^3$  y a una  $R=120 \Omega$  (Xu et al. 2020).

El pH del catolito y el flujo de aire influyen en la generación de peróxido y por lo tanto en la disminución y/o eliminación del contaminante, así lo demuestra (Ling et al. 2016), donde nos dice que se alcanza una alta concentración de

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>= 88.63 μmol/L a un pH=2 y flujo de aire=750 mL/min. Siendo respaldada con el mismo pH por los investigadores (Tao et al. 2013; Zhang, Yin y Li 2015). Por otro lado, la remoción de RhB decrece del 95% a un pH=3 a 74.2% a un pH=2 (Xu et al. 2020). Asimismo, Birjandi et al. 2016, Wang et al. 2016, entre otros demuestran que el pH óptimo es 3. Lo que indica que el pH pertenece al rango de pH óptimo de operación (2-3) del Electro fenton. Por el contrario, cuando el pH se incrementa a 4 o 5 la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decrece, reduciendo la cantidad de protones y la lixiviación del hierro (Tao et al. 2013). Aunque (Xu, Xu y Shi 2018; Wang et al. 2014) demostraron en sus investigaciones que puede haber gran cantidad de remoción de contaminante 85.7% y 98.5% respectivamente a un pH neutro.

Con respecto al objetivo 2, en la figura 7 se muestra los campos de aplicación del sistema BEF reportados en las investigaciones.

**Figura 7: Principales aplicaciones del sistema BEF en la remoción de contaminantes.**



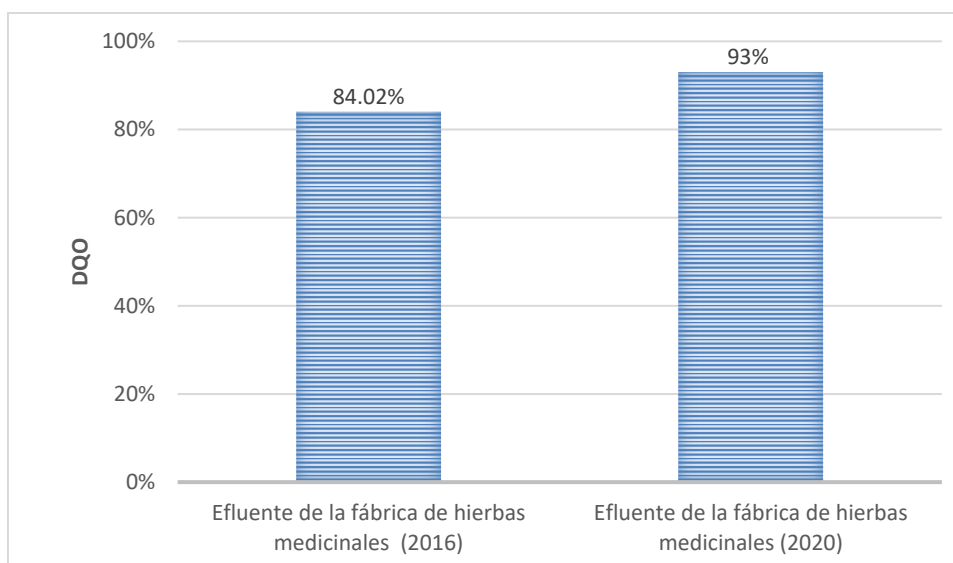
Como se observa en la figura 7, el campo más estudiado en el sistema BEF es el de medicamentos y compuestos endocrinos con un 47% del total de contaminantes reportados. Esto se debe a que el sistema desempeña un papel muy importante en la degradación (Xu et al. 2015) ya que estos poseen

alentadores resultados de remoción con un rango del 56% al 100%. Seguido por los colorantes con un 23% del total de investigaciones que utilizan el sistema BEF para la decoloración de estas aguas residuales (Wang y Wang 2017), estas poseen un rango de remoción del 61% al 95%. Ya que este sistema puede degradar de manera significativa los contaminantes refractarios sin la necesidad de contar con fuentes de alimentación externa, lo que conlleva a un ahorro energético (Xu et al. 2020). De igual manera, los pesticidas son mayormente utilizados en el sector agricultura y debido a su estructura química son de difícil degradación en condiciones naturales por lo tanto tienden a bioacumularse, el sistema BEF posee un enfoque eficiente y prometedor en este campo (Zhao y Kong 2018), con un rango de remoción del 78% al 100%, según el 18% del total de investigaciones reportadas. Estos tres campos de aplicación forman parte de los contaminantes emergentes lo cual significa que son una constante preocupación para la salud debido a que están presentes en los recursos hídricos y además el sistema actual de tratamiento de aguas residuales no es eficaz para la eliminación de estos contaminantes (Bolong et al. 2009).

El 12% representa al campo de aplicación de aguas residuales, en este caso a los efluentes provenientes de la fábrica de hierbas medicinales, los cuales contienen aceite, alcohol, propilenglicol y celulosa. Estos pueden llegar a ser perjudiciales para los cuerpos de agua, por ello el uso del sistema BEF permite su degradación en un rango del 84% al 93% (Birjandi et al. 2016; Birjandi et al. 2020).

Para determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes reportados en las investigaciones, se realizaron 4 figuras tomando en cuenta su campo de aplicación. En la figura 8, se muestra la eficiencia de remoción en porcentaje de DQO en las aguas residuales industriales.

**Figura 8: Eficiencia de remoción de DQO en aguas residuales industriales**

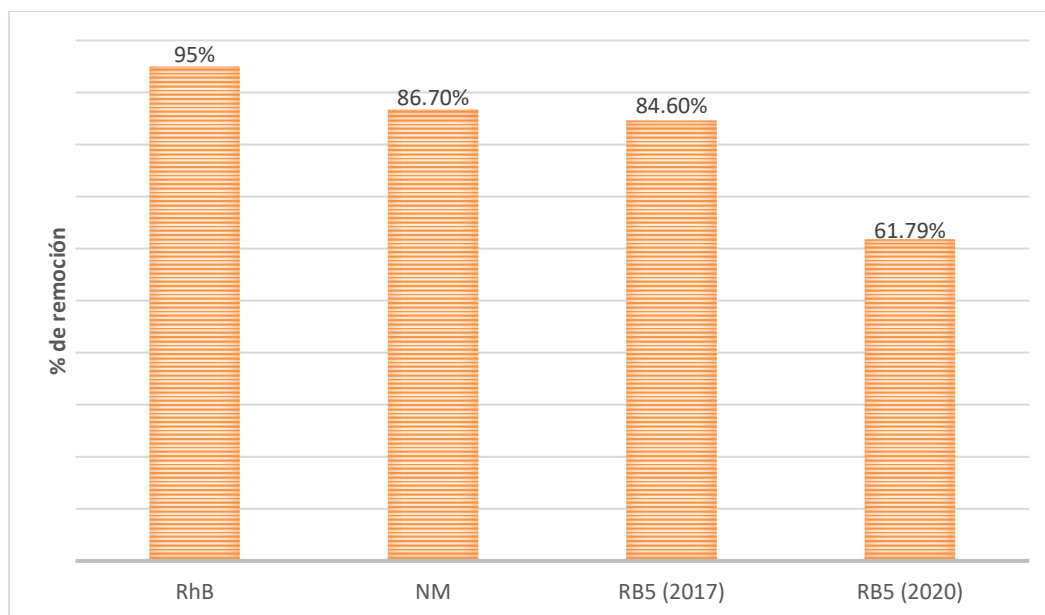


Como se aprecia en la figura 8, en el estudio de remoción de aguas residuales de hierbas medicinales se obtuvo una disminución de la cantidad de DQO del 84,02 % (Birjandi et al. 2016), mientras que en la otra investigación se tuvo un 93% (Birjandi et al. 2020). Ambas investigaciones poseen el mismo material del electrodo anódico y catódico, flujo de aire, pH y resistencia externa. Sin embargo, presentan una variación en la densidad de corriente la cual está relacionada con la producción de peróxido (Katuri et al. 2011),  $0.55 \text{ A/m}^2$  (Birjandi 2016) y  $0.60 \text{ A/m}^2$  (Birjandi 2020). Por otro lado, una mayor densidad de poder genera una mayor tasa de remoción de contaminantes,  $0.06 \text{ W/m}^2 = 84.02\%$  (Birjandi 2016) y  $0.18 \text{ W/m}^2 = 93\%$  (Birjandi 2020).

En la figura 9, se observa el porcentaje de degradación de 3 colorantes (Rodamina B, Naranja de metilo y Colorante Negro Reactivo 5 (RB5)) registrados en las investigaciones.



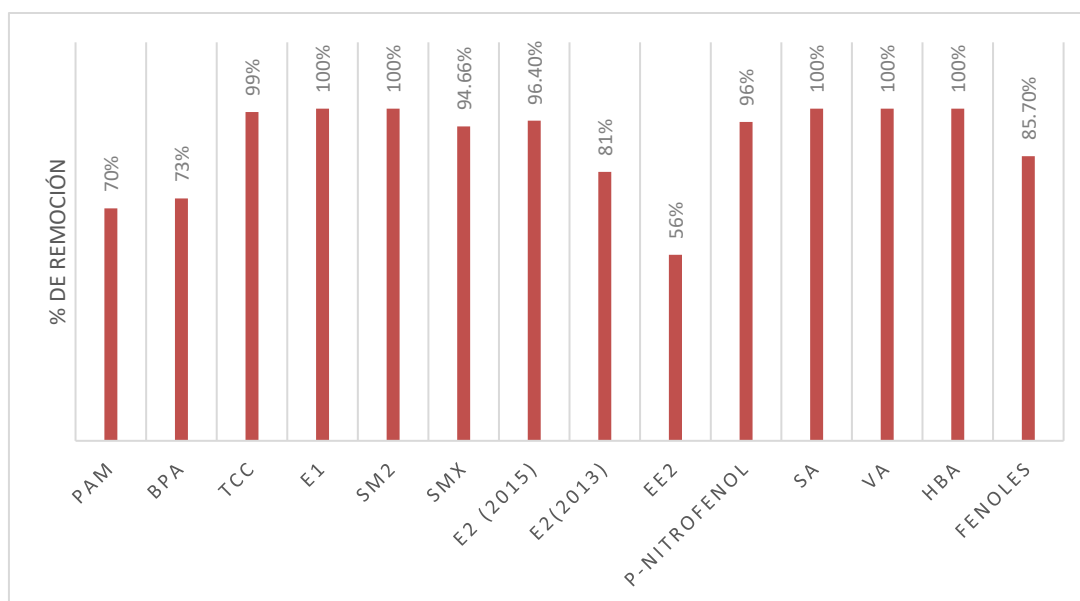
**Figura 9: Eficiencia de remoción de colorantes**



De acuerdo con la figura 9, el colorante que presenta mayor remoción con un 95%, es la Rodamina B (RhB) (Xu et al. 2020), seguido por la Naranja de metilo (NM) con un 86.70% de remoción (Ling et al. 2016). En el caso del Colorante Negro Reactivo 5 (RB5) tenemos 2 investigaciones, la primera con un 84.60% de remoción (Wang y Wang 2017) y la segunda con un 61.79% (Wang et al. 2020), ambas investigaciones no presentan información respecto al flujo de aire, pH y resistencia externa, pero ambos poseen el mismo material anódico. Sin embargo, el material del electrodo catódico en la primera investigación se usa FePc/CNT/SS316, cuya densidad de corriente  $3.21 \text{ A/m}^2$  y su densidad de poder  $0.73 \text{ W/m}^2$  (Wang y Wang 2017) y en la segunda el FePc/CNT/C, con densidad de corriente y de poder de  $2.11 \text{ A/m}^2$  y  $0.21 \text{ W/m}^2$  respectivamente (Wang et al. 2020). Es así que una mayor densidad de poder genera una mayor eficiencia de remoción de contaminantes. Así como la producción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en la cámara catódica está en relación directa con la densidad de corriente (Katuri et al. 2011).

En la figura 10, se encuentra el porcentaje de remoción de medicamentos y compuestos endocrinos utilizados en las investigaciones.

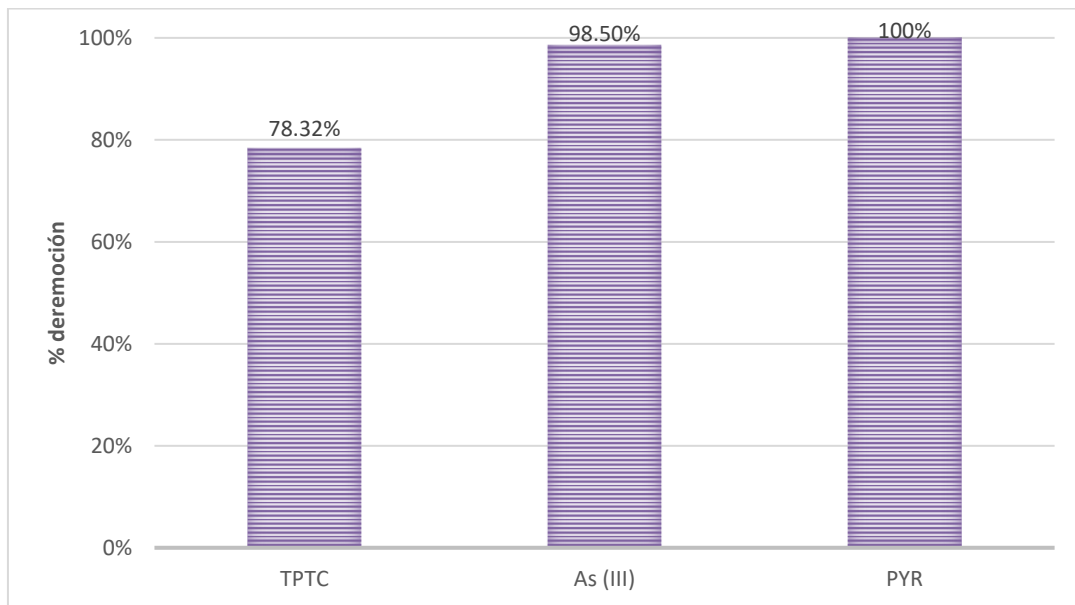
**Figura 10: Eficiencia de remoción de medicamentos y compuestos endocrinos**



Como se muestra en la figura 10, los contaminantes (estrona y sulfametazona) así como los compuestos fenólicos (ácido siríngico (SA), ácido vanílico (VA) y 4-hidroxibenzoico (HBA)) fueron removidos al 100% a un pH óptimo de 3, utilizando como electrodo del cátodo Fe-Mn/ fieltro de grafito y barra de grafito respectivamente (Wang et al. 2016; Li, Biao et al. 2019). Para el  $17\beta$  estradiol (E2) (2015),  $17\beta$  estradiol (E2) (2013) y el  $17\alpha$ -etinilestradiol (EE2) que tienen un porcentaje de remoción del 96.4%, 81% y 56% respectivamente, tienen en común el mismo pH=3 y la densidad de poder de  $4.35 \text{ W/m}^3$ . Sin embargo, se diferencia el E2 (2015) y el E2 (2013) en la resistencia externa (R) pues en la primera es de  $150\Omega$  mientras que en la segunda es de  $1\text{k}\Omega$  (Xu et al. 2015; 2013). Lo que demuestra que a menor R habrá mayor corriente y por ende mayor producción de peróxido que generará  $\bullet\text{OH}$  para lograr una gran cantidad de remoción. Por otro lado, el p-nitrofenol y el paracetamol obtuvieron el 96% y 73% respectivamente a un pH=2 y a una resistencia de  $20\Omega$  pero a diferentes densidades de corriente y tipo de material del cátodo, como son  $0.24 \text{ A/m}^2$ , fieltro de carbono y  $2.38 \text{ A/m}^2$ , placa de grafito con respecto a ambos contaminantes (Tao et al. 2013; Zhang, Yin y Li 2015). Lo que demuestra que el material del electrodo y la densidad son determinantes en la remoción del contaminante.

El porcentaje de eficiencia de remoción de pesticidas cloruro de trifenilestaño (TPTC), arsenito (As (III)) y piraclostrobina (PYR) se encuentra en la siguiente figura 11.

**Figura 11: Eficiencia de remoción de pesticidas**



En cuanto a la figura 11, la remoción de pesticidas es elevada con porcentajes mayores del 70%, usando el mismo flujo de aire de 100 mL/min y una resistencia externa de 1k $\Omega$ , aunque el TPTC varía con 2k $\Omega$ . Otra diferencia entre los tres, es la densidad de corriente las cuales son 0.25 A/m<sup>2</sup> (TPTC) (Yong et al. 2017), 0.56 A/m<sup>2</sup> (As III) (Wang et al. 2014) y 0.79 A/m<sup>2</sup> (PYR) (Zhao y Kong 2018). Lo que demuestra que a mayor cantidad de corriente y a menor resistencia externa, mayor el porcentaje de degradación del contaminante.

## V. CONCLUSIONES

1. Los principales parámetros de operación reportados en las investigaciones respecto al BEF son: el inóculo, sustrato, membrana, material de los electrodos, densidad de poder, densidad de corriente, resistencia externa, pH y flujo de aire. El inóculo más utilizado fueron los lodos anaeróbicos ya que contienen microorganismos electrogénicos activos capaces de transferir electrones. Así mismo, los sustratos más utilizados fueron la glucosa y el acetato por su forma simple y fáciles de degradar. El nafion 117 fue la membrana empleada con mayor frecuencia, mientras que los electrodos reportados con mayor frecuencia fueron a base de carbono. El pH óptimo registrado en las investigaciones se encontró entre 2 y 3.
2. Respecto a los efluentes/contaminantes tratados por el BEF se encontró que el campo más estudiado es el de medicamentos y compuestos endocrinos, seguido por los colorantes, pesticidas y aguas residuales industriales. Los medicamentos y compuestos endocrinos al igual que los colorantes y pesticidas forman parte de los contaminantes emergentes que son una constante preocupación para la salud por estar presentes en los recursos hídricos y su difícil eliminación con otros tratamientos.
3. Las eficiencias reportadas en los estudios revisados presentan valores del 84,02 % y 93% para la remoción de DQO en aguas residuales de hierbas medicinales. El colorante con mayor remoción fue la Rodamina B con un 95%, seguido por la naranja de metilo con un 86.7%. Además, los contaminantes estrona y sulfametazona así como los compuestos fenólicos (ácido siríngico, ácido vanílico y 4-hidroxibenzoico) fueron removidos al 100% a un pH óptimo de 3, utilizando como electrodo del cátodo Fe-Mn/fieltro de grafito y barra de grafito respectivamente. En cuanto a los pesticidas, con densidades de corriente distintas 0.25 A/m<sup>2</sup> (TPTC), 0.56 A/m<sup>2</sup> (As III) y 0.79 A/m<sup>2</sup> (PYR) presentan porcentajes de 78, 98 y 100%. Lo que demuestra que a mayor cantidad de corriente mayor el porcentaje de degradación del contaminante.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda que las futuras investigaciones establezcan parámetros designados para un grupo específico de contaminantes, y así poder ser tratado de manera óptima según las características que posee el efluente.
2. Utilizar el sistema BEF para el tratamiento de aguas residuales con disruptores químicos endocrinos, como los utilizados en el cuidado personal, tensoactivos, ya que no se encontraron investigaciones sobre estos contaminantes.
3. Se recomienda profundizar en investigaciones respecto a membranas de bajo costo y de fácil elaboración y alta eficiencia.

## REFERENCIAS

- ABOURACHED, C., CATAL, T. y LIU, H., 2014. Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production. *Water Research* [en línea], vol. 51, pp. 228-233. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2013.10.062. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.062>.
- ASGHAR, A., ABDUL RAMAN, A.A. y DAUD, W.M.A.W., 2014. *Recent advances, challenges and prospects of in situ production of hydrogen peroxide for textile wastewater treatment in microbial fuel cells*. 1 octubre 2014. S.I.: John Wiley and Sons Ltd.
- ASGHAR, A., ABDUL RAMAN, A.A. y WAN DAUD, W.M.A., 2015. Challenges and recommendations for using membranes in wastewater-based microbial fuel cells for in situ Fenton oxidation for textile wastewater treatment. *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 45-67. ISSN 01678299. DOI 10.1515/revce-2014-0030.
- BIRJANDI, N., YOUNESI, H., GHOREYSHI, A.A. y RAHIMNEJAD, M., 2016. Electricity generation through degradation of organic matters in medicinal herbs wastewater using bio-electro-Fenton system. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 180, pp. 390-400. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2016.05.073. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.073>.
- BIRJANDI, N., YOUNESI, H., GHOREYSHI, A.A. y RAHIMNEJAD, M., 2020. Enhanced medicinal herbs wastewater treatment in continuous flow bio-electro-Fenton operations along with power generation. *Renewable Energy* [en línea], vol. 155, pp. 1079-1090. [Consulta: 16 abril 2021]. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2020.04.013. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.013>.
- BOLONG, N., ISMAIL, A.F., SALIM, M.R. y MATSUURA, T., 2009. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *DES*, vol. 239, no. 1-3, pp. 229-246. ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2008.03.020.
- BRILLAS, E., SIRÉS, I. y OTURAN, M.A., 2009. Electro-fenton process and related

- electrochemical technologies based on fenton's reaction chemistry. *Chemical Reviews*, vol. 109, no. 12, pp. 6570-6631. ISSN 00092665. DOI 10.1021/cr900136g.
- CHAE, K.J., CHOI, M., AJAYI, F.F., PARK, W., CHANG, I.S. y KIM, I.S., 2008. Mass transport through a proton exchange membrane (Nafion) in microbial fuel cells. *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 1, pp. 169-176. ISSN 08870624. DOI 10.1021/ef700308u.
- CISTERNA C., F., 2005. Categorization and Triangulation As Processes of Validation of Knowledge in Qualitative Investigations. *Theoria*, vol. 14, no. 1, pp. 61-71.
- CORTÉS CORTÉS, M.; y IGLESIAS LEÓN, M., 2004. Diseño y Desarrollo del Proceso de Investigación. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN*, vol. 10.
- DOMINGUEZ, C.M., OTURAN, N., ROMERO, A., SANTOS, A. y OTURAN, M.A., 2017. Optimization of electro-Fenton process for effective degradation of organochlorine pesticide lindane. *Catalysis Today* [en línea], vol. 313, no. August, pp. 196-202. ISSN 09205861. DOI 10.1016/j.cattod.2017.10.028. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2017.10.028>.
- FAN, Y., HU, H. y LIU, H., 2007. Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *Journal of Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 348-354. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2007.06.220.
- FENG, J., HU, X. y YUE, P.L., 2003. Degradation of Azo-dye Orange II by a Photoassisted Fenton Reaction Using a Novel Composite of Iron Oxide and Silicate Nanoparticles as a Catalyst. , pp. 2058-2066.
- FERNÁNDEZ DE DIOS, M.Á., IGLESIAS, O., PAZOS, M. y SANROMÁN, M.Á., 2014. Application of electro-fenton technology to remediation of polluted effluents by self-sustaining process. *The Scientific World Journal*, vol. 2014. ISSN 1537744X. DOI 10.1155/2014/801870.
- FLIMBAN, S.G.A., HASSAN, S.H.A., RAHMAN, M.M. y OH, S.E., 2018. The effect of Nafion membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 45, no. 25, pp. 13643-13651. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2018.02.097. Disponible en:

- <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.097>.
- FU, L., YOU, S.J., ZHANG, G. quan, YANG, F.L. y FANG, X. hong, 2010. Degradation of azo dyes using in-situ Fenton reaction incorporated into H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-producing microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 160, no. 1, pp. 164-169. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2010.03.032. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.032>.
- GLIGOROVSKI, S., STREKOWSKI, R., BARBATI, S. y VIONE, D., 2015. Environmental Implications of Hydroxyl Radicals ( $\bullet$ OH). *Chemical Reviews*, vol. 115, no. 24, pp. 13051-13092. ISSN 15206890. DOI 10.1021/cr500310b.
- HASSAN, M., OLVERA-VARGAS, H., ZHU, X., ZHANG, B. y HE, Y., 2019. Microbial electro-Fenton: An emerging and energy-efficient platform for environmental remediation. *Journal of Power Sources*, vol. 424, no. December 2018, pp. 220-244. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2019.03.112.
- HE, H. y ZHOU, Z., 2017. Electro-fenton process for water and wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 47, no. 21, pp. 2100-2131. [Consulta: 18 abril 2021]. ISSN 15476537. DOI 10.1080/10643389.2017.1405673. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1405673>.
- HERNANDEZ SAMPIERI, R., FERNANDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2010. *Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa*. S.l.: s.n. ISBN 9786071502919.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2014. *Metodología de la investigación*. sexta edic. S.l.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. ISBN 978-1-4562-2396-0.
- JAVED, K., GOURIVEAU, R., ZERHOUNI, N. y HISSEL, D., 2016. Prognostics of Proton Exchange Membrane Fuel Cells stack using an ensemble of constraints based connectionist networks. *Journal of Power Sources*, vol. 324, no. November 2017, pp. 745-757. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2016.05.092.
- JUNG, S.P. y PANDIT, S., 2019. *Important factors influencing microbial fuel cell performance* [en línea]. S.l.: Elsevier B.V. ISBN 9780444640529. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00015-7>.
- KAHOUSH, M., BEHARY, N., CAYLA, A. y NIERSTRASZ, V., 2017. Bio-Fenton and



- Bio-electro-Fenton as sustainable methods for degrading organic pollutants in wastewater. *Process Biochemistry* [en línea], vol. 64, pp. 237-247. [Consulta: 16 abril 2021]. ISSN 1359-5113. DOI 10.1016/j.procbio.2017.10.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2017.10.003>.
- KATURI, K.P., SCOTT, K., HEAD, I.M., PICIOREANU, C. y CURTIS, T.P., 2011. Microbial fuel cells meet with external resistance. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 102, no. 3, pp. 2758-2766. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2010.10.147. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.147>.
- KHARE, P., PATEL, R.K., SHARAN, S. y SHANKAR, R., 2021. *Recent trends in advanced oxidation process for treatment of recalcitrant industrial effluents*. S.I.: Elsevier Inc. ISBN 9780128210116.
- KYAZZE, G., POPOV, A., DINSDALE, R., ESTEVES, S., HAWKES, F., PREMIER, G. y GUWY, A., 2010. Influence of catholyte pH and temperature on hydrogen production from acetate using a two chamber concentric tubular microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 15, pp. 7716-7722. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2010.05.036.
- LI, Biao, YAN, Z.Y., LIU, X.N., TANG, C., ZHOU, J., WU, X.Y., WEI, P., JIA, H.H. y YONG, X.Y., 2019. Enhanced Bio-Electro-Fenton degradation of phenolic compounds based on a novel Fe–Mn/Graphite felt composite cathode. *Chemosphere* [en línea], vol. 234, pp. 260-268. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.06.054. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.054>.
- LI, S., HUA, T., LI, F. y ZHOU, Q., 2020. *Bio-electro-Fenton systems for sustainable wastewater treatment: mechanisms, novel configurations, recent advances, LCA and challenges. An updated review*. 1 agosto 2020. S.I.: John Wiley and Sons Ltd.
- LI, Sheng-nan, HUA, T., YUAN, C.S., LI, B., ZHU, X. y LI, F., 2019. Degradation pathways , microbial community and electricity properties analysis of antibiotic sulfamethoxazole by bio-electro- Fenton system. *Bioresource Technology*, pp. 122501. ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/j.biortech.2019.122501.
- LI, S., HUA, T., YUAN, C.S., LI, B., ZHU, X. y LI, F., 2020. Degradation pathways, microbial community and electricity properties analysis of antibiotic

- sulfamethoxazole by bio-electro-Fenton system. *Bioresource Technology*, vol. 298. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2019.122501.
- LI, X., CHEN, S., ANGELIDAKI, I. y ZHANG, Y., 2018. Bio-electro-Fenton processes for wastewater treatment: Advances and prospects. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 354, no. February, pp. 492-506. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2018.08.052. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.052>.
- LI, X., JIN, X., ZHAO, N., ANGELIDAKI, I. y ZHANG, Y., 2017. Efficient treatment of aniline containing wastewater in bipolar membrane microbial electrolysis cell-Fenton system. *Water Research* [en línea], vol. 119, pp. 67-72. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2017.04.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.047>.
- LIN, H., OTURAN, N., WU, J., SHARMA, V.K., ZHANG, H. y OTURAN, M.A., 2017. Removal of artificial sweetener aspartame from aqueous media by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere* [en línea], vol. 167, pp. 220-227. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2016.09.143. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.143>.
- LING, T., HUANG, B., ZHAO, M., YAN, Q. y SHEN, W., 2016. Repeated oxidative degradation of methyl orange through bio-electro-Fenton in bioelectrochemical system (BES). *Bioresource Technology* [en línea], vol. 203, pp. 89-95. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2015.12.031. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.031>.
- LOGAN, B.B.E. y WILEY, J., 2007. *Microbial Fuel Cells*. , pp. 61-84.
- MARTÍNEZ-HUITLE, C.A., RODRIGO, M.A., SIRÉS, I. y SCIALDONE, O., 2015. Single and Coupled Electrochemical Processes and Reactors for the Abatement of Organic Water Pollutants: A Critical Review. *Chemical Reviews*, vol. 115, no. 24, pp. 13362-13407. ISSN 15206890. DOI 10.1021/acs.chemrev.5b00361.
- MONTEIL, H., PÉCHAUD, Y., OTURAN, N. y OTURAN, M.A., 2019. A review on efficiency and cost effectiveness of electro- and bio-electro-Fenton processes: Application to the treatment of pharmaceutical pollutants in water. *Chemical Engineering Journal*, vol. 376. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2018.07.179.
- MUÑOZ ROCHA, C.I., 2015. *Metodología de la investigación*. S.l.: s.n. ISBN

9786074265422.

- NADAIS, H., LI, X., ALVES, N., COURAS, C., ANDERSEN, H.R., ANGELIDAKI, I. y ZHANG, Y., 2018. Bio-electro-Fenton process for the degradation of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in wastewater. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 338, no. December 2017, pp. 401-410. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2018.01.014. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.014>.
- OLIVEIRA, V.B., SIMÕES, M., MELO, L.F. y PINTO, A.M.F.R., 2013. Overview on the developments of microbial fuel cells. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 73, pp. 53-64. ISSN 1369703X. DOI 10.1016/j.bej.2013.01.012.
- OMIDI, H. y SATHASIVAN, A., 2013. Optimal temperature for microbes in an acetate fed microbial electrolysis cell (MEC). *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 85, pp. 688-692. ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2013.05.026.
- PANT, D., VAN BOGAERT, G., DIELS, L. y VANBROEKHOVEN, K., 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 101, no. 6, pp. 1533-1543. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2009.10.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>.
- REYES, N. y BOENTE, A., 2019. Metodología de la Investigación Compilación Total. *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9, pp. 1689-1699. ISSN 1098-6596.
- RIVAS, F.J., BELTRÁN, F.J., FRADES, J. y BUXEDA, P., 2001. Oxidation of p-hydroxybenzoic acid by Fenton's reagent. *Water Research*, vol. 35, no. 2, pp. 387-396. ISSN 00431354. DOI 10.1016/S0043-1354(00)00285-2.
- SANTORO, C., ARBIZZANI, C., ERABLE, B. y IEROPOULOS, I., 2017. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources* [en línea], vol. 356, pp. 225-244. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>.
- SCHAETZLE, O., BARRIÈRE, F. y BARONIAN, K., 2008. Bacteria and yeasts as catalysts in microbial fuel cells: Electron transfer from micro-organisms to electrodes for green electricity. *Energy and Environmental Science*, vol. 1, no.

- 6, pp. 607-620. ISSN 17545692. DOI 10.1039/b810642h.
- SELVARAJ, D., SOMANATHAN, A., JEYAKUMAR, R.B. y KUMAR, G., 2020. Generation of electricity by the degradation of electro-Fenton pretreated latex wastewater using double chamber microbial fuel cell. *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 15, pp. 12496-12505. ISSN 1099114X. DOI 10.1002/er.5503.
- SHESTAKOVA, M. y SILLANPÄÄ, M., 2017. *Electrode materials used for electrochemical oxidation of organic compounds in wastewater*. 1 junio 2017. S.I.: Springer Netherlands.
- SIRÉS, I. y BRILLAS, E., 2012. Remediation of water pollution caused by pharmaceutical residues based on electrochemical separation and degradation technologies: A review. *Environment International* [en línea], vol. 40, no. 1, pp. 212-229. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2011.07.012. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2011.07.012>.
- SUBHA, C., DINESH KUMAR, M., YUKESH KANNAH, R., KAVITHA, S., GUNASEKARAN, M. y RAJESH BANU, J., 2020. Bioenergy recovery from food processing wastewater—Microbial fuel cell. *Food Waste to Valuable Resources*, pp. 251-274. DOI 10.1016/b978-0-12-818353-3.00012-2.
- TAO, H.C., WEI, X.Y., ZHANG, L.J., LEI, T. y XU, N., 2013. Degradation of p-nitrophenol in a BES-Fenton system based on limonite. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 254-255, no. 1, pp. 236-241. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2013.03.061. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.061>.
- VEERUBHOTLA, R., VARANASI, J.L. y DAS, D., 2018. Biofilm formation within microbial fuel cells. *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells*, pp. 231-242. DOI 10.1016/B978-0-444-64017-8.00012-9.
- WANG, W., LU, Y., LUO, H., LIU, G., ZHANG, R. y JIN, S., 2018. A microbial electro-fenton cell for removing carbamazepine in wastewater with electricity output. *Water Research*, vol. 139, pp. 58-65. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2018.03.066.
- WANG, X.Q., LIU, C.P., YUAN, Y. y LI, F. bai, 2014. Arsenite oxidation and removal driven by a bio-electro-Fenton process under neutral pH conditions. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 275, pp. 200-209. ISSN 18733336. DOI

10.1016/j.jhazmat.2014.05.003.

- WANG, Y.-T., CHIOU, C.-S., CHANG, S.-Y. y CHEN, H.-W., 2020a. Enhancement of Electrical Properties by a Composite FePc/CNT/C Cathode in a Bio-Electro-Fenton Microbial Fuel Cell System. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 20, no. 5, pp. 3252-3257. ISSN 1533-4880. DOI 10.1166/jnn.2020.17372.
- WANG, Y., FENG, C., LI, Y., GAO, J. y YU, C.P., 2016. Enhancement of emerging contaminants removal using Fenton reaction driven by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-producing microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 307, pp. 679-686. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2016.08.094. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.094>.
- WANG, Y.T. y WANG, R.S., 2017. A bio-electro-fenton system employing the composite FePc/CNT/SS316 cathode. *Materials*, vol. 10, no. 2. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma10020169.
- XU, N., ZENG, Y., LI, J., ZHANG, Y. y SUN, W., 2015. Removal of 17 $\beta$ -estrodial in a bio-electro-Fenton system: Contribution of oxidation and generation of hydroxyl radicals with the Fenton reaction and carbon felt cathode. *RSC Advances* [en línea], vol. 5, no. 70, pp. 56832-56840. ISSN 20462069. DOI 10.1039/c5ra08053c. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA08053C>.
- XU, N., ZHANG, Y., TAO, H., ZHOU, S. y ZENG, Y., 2013. Bio-electro-Fenton system for enhanced estrogens degradation. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 138, pp. 136-140. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2013.03.157. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.157>.
- XU, P., XU, H. y SHI, Z., 2018a. A novel bio-electro-Fenton process with FeVO<sub>4</sub>/CF cathode on advanced treatment of coal gasification wastewater. *Separation and Purification Technology*, vol. 194, no. November 2017, pp. 457-461. ISSN 1383-5866. DOI 10.1016/j.seppur.2017.11.073.
- XU, P., XU, H. y SHI, Z., 2018b. A novel bio-electro-Fenton process with FeVO<sub>4</sub>/CF cathode on advanced treatment of coal gasification wastewater. *Separation and Purification Technology* [en línea], vol. 194, no. November 2017, pp. 457-461. [Consulta: 16 abril 2021]. ISSN 18733794. DOI 10.1016/j.seppur.2017.11.073. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.073>.

- XU, P., ZHENG, D., XIE, Z., MA, J., YU, J. y HOU, B., 2020. Separation and Purification Technology The mechanism and oxidation efficiency of bio-electro-Fenton system with Fe @ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ACF composite cathode. *Separation and Purification Technology*, vol. 234, no. September 2019, pp. 116103. ISSN 1383-5866. DOI 10.1016/j.seppur.2019.116103.
- YONG, X., GU, D., WU, Y., YAN, Z. y ZHOU, J., 2017. Bio-Electron-Fenton (BEF) process driven by microbial fuel cells for triphenyltin chloride (TPTC) degradation. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 324, pp. 178-183. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2016.10.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.047>.
- YU, F., WANG, Y., MA, H. y DONG, G., 2018. Enhancing the yield of hydrogen peroxide and phenol degradation via a synergistic effect of photoelectrocatalysis using a g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ACF electrode. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 43, no. 42, pp. 19500-19509. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2018.08.217. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.217>.
- ZHANG, L.-J. y TAO, H.-C., 2018. Bioelectro-Fenton System for Environmental Pollutant Degradation. *Bioelectrochemistry Stimulated Environmental Remediation*. S.l.: s.n., pp. 245-267. ISBN 9789811085420.
- ZHANG, L., YIN, X. y LI, S.F.Y., 2015. Bio-electrochemical degradation of paracetamol in a microbial fuel cell-Fenton system. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 276, pp. 185-192. [Consulta: 17 abril 2021]. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2015.04.065. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.065>.
- ZHANG, M. hui, DONG, H., ZHAO, L., WANG, D. xi y MENG, D., 2019. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 670, pp. 110-121. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.03.180. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>.
- ZHANG, X., CHENG, S., WANG, X., HUANG, X. y LOGAN, B.E., 2009. Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 21, pp. 8456-8461. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es901631p.

- ZHAO, H. y KONG, C.H., 2018. Elimination of pyraclostrobin by simultaneous microbial degradation coupled with the Fenton process in microbial fuel cells and the microbial community. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 258, no. February, pp. 227-233. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2018.03.012. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.012>.
- ZHAO, H. y ZHANG, Q., 2021. Performance of electro-Fenton process coupling with microbial fuel cell for simultaneous removal of herbicide mesotrione. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 319, no. October 2020, pp. 124244. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2020.124244. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124244>.
- ZHAO, Q., AN, J., WANG, X. y LI, N., 2021. In-situ hydrogen peroxide synthesis with environmental applications in bioelectrochemical systems: A state-of-the-art review. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 46, no. 4, pp. 3204-3219. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.05.227. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.227>.
- ZHU, X. y LOGAN, B.E., 2013. Using single-chamber microbial fuel cells as renewable power sources of electro-Fenton reactors for organic pollutant treatment. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252-253, pp. 198-203. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2013.02.051.
- ZOU, R., ANGELIDAKI, I., JIN, B. y ZHANG, Y., 2020. Feasibility and applicability of the scaling-up of bio-electro-Fenton system for textile wastewater treatment. *Environment International* [en línea], vol. 134, no. November 2019, pp. 105352. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2019.105352. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105352>.

### ANEXO 1: Matriz de categorías y subcategorías

Objetivos Específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
<p>Determinar los principales parámetros de operación y su influencia en el proceso Bio-electro-fenton para la remoción de contaminantes en el efluente.</p>	<p>¿Cuáles son los principales parámetros de operación y su influencia en el proceso BEF para la remoción de contaminantes en aguas residuales?</p>	<p>Parámetros de operación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material del electrodo</li> <li>• Inóculo</li> <li>• Sustrato</li> <li>• Membrana</li> <li>• Densidad de poder</li> <li>• Densidad de corriente</li> <li>• Resistencia externa</li> <li>• pH</li> <li>• Flujo de aire</li> </ul>	<p>(Birjandi et al. 2020; Xu, Xu y Shi 2018; Xu et al. 2020; Ling et al. 2016; Wang y Wang 2017; Wang et al. 2020; 2014; Li, Sheng-nan et al. 2019; Birjandi et al. 2016; Wang et al. 2016; Tao et al. 2013; Li, Biao et al. 2019; Xu et al. 2015; 2013; Yong et al. 2017; Zhao y Kong 2018; Zhang, Yin y Li 2015)</p>
<p>Identificar las aplicaciones del proceso Bio-electro fenton en la remoción de contaminantes en el efluente.</p>	<p>¿Cuáles son las aplicaciones del proceso BEF en la remoción de contaminantes en aguas residuales?</p>	<p>Aplicaciones del proceso BEF.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas residuales industriales</li> <li>• Colorantes</li> <li>• Medicamentos y compuestos endocrinos</li> </ul>	<p>(Birjandi et al. 2016; 2020)</p> <p>(Wang y Wang 2017; Ling et al. 2016; Xu et al. 2020; Wang et al. 2020)</p> <p>(Zhang, Yin y Li 2015; Xu et al. 2013; 2015; Li, Biao et al. 2019; Tao et al. 2013; Wang et al. 2016; Xu, Xu y Shi 2018; Li, Sheng-nan et al. 2019)</p>



			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesticidas</li> </ul>	(Wang et al. 2014; Yong et al. 2017; Zhao y Kong 2018)
Determinar la eficiencia de la tecnología bio-electro-fenton.	¿Cuáles son las eficiencias de la tecnología BEF?	Eficiencia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de remoción de aguas residuales industriales</li> <li>• Porcentaje de remoción de colorantes</li> <li>• Porcentaje de remoción de medicamentos y compuestos endocrinos</li> <li>• Porcentaje de remoción de pesticidas</li> </ul>	<p>(Birjandi et al. 2016; 2020)</p> <p>(Wang y Wang 2017; Ling et al. 2016; Xu et al. 2020; Wang et al. 2020)</p> <p>(Wang et al. 2018; Li, Sheng-nan et al. 2019; Xu, Xu y Shi 2018; Xu et al. 2015; 2013; Zhang, Yin y Li 2015; Li, Biao et al. 2019; Tao et al. 2013)</p> <p>(Wang et al. 2014; Yong et al. 2017; Zhao y Kong 2018)</p>

## ANEXO 2

<b>FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	
<b>Título:</b>	
<b>Autores</b>	
<b>Año de publicación y revista</b>	
<b>Contaminante</b>	
<b>Tipo de proceso</b>	
<b>Condiciones de operación BEF</b>	<b>Ánodo:</b>  <b>Cátodo:</b>  <b>Resistencia externa:</b>  <b>Membrana:</b>
<b>Equipo</b>	<b>Cámara ánodo y cátodo</b>  <b>Dimensión:</b>  <b>Volumen total/trabajo:</b>  <b>Conexión entre ambas cámaras:</b>
<b>Resultados</b>	