



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

***“SIMULACIÓN MACROSCÓPICA DE LA REMOCIÓN DE
ARSÉNICO POR ELECTROCOAGULACIÓN”***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**P R E S E N T A :
NOEMI CORTÉS GARCÍA**

**DIRECTOR DE TESIS :
DR. JOSÉ ANTONIO BARRERA GODÍNEZ**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2017.



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: JOSÉ ANTONIO BARRERA GODÍNEZ**
VOCAL: **Profesor: FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ**
SECRETARIO: **Profesor: BENJAMÍN BELTRÁN FRAGOSO**
1er. SUPLENTE: **Profesor: JUAN CARLOS CONTRERAS GUZMÁN**
2° SUPLENTE: **Profesor: BLANCA PAZ DÍAZ**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO D, FACULTAD DE QUIMICA

ASESOR DEL TEMA:

DR. JOSÉ ANTONIO BARRERA GODÍNEZ

SUSTENTANTE:

NOEMI CORTÉS GARCÍA

Índice

Resumen	7
Introducción.....	8
1. El agua.....	8
1.1 Disponibilidad del agua.....	8
1.2 Tratamientos de aguas residuales	11
2. Arsénico	15
2.1 Toxicidad del arsénico	16
2.2 El arsénico en las aguas mexicanas.....	17
2.3 Técnicas de eliminación del arsénico	18
3. Electrocoagulación.....	19
Revisión de la literatura	21
1. Orígenes de la Electrocoagulación	21
1.1 Resurgimiento de la Electrocoagulación.....	22
2. Fundamentos de la Electrocoagulación	22
2.1 Electroodos de Al.....	23
2.2 Electroodos de Fe.....	24
3. La remoción del Arsénico mediante la EC	25
3.1 Mecanismo de la EC.....	25
4. La simulación	27
Planteamiento del problema.....	29
Hipótesis.....	31
Objetivos	32
Metodología.....	33
1. Simulación con MetSim.....	33
1.1 Datos de entrada	35
2. Otras consideraciones para la simulación.....	36
2.1 Electrocoagulación.....	37
2.2 Aireación.....	38
2.3 Desinfección	39

Resultados y Discusión de resultados.....	40
Parte I: Diagrama de flujo	40
Parte II: Cuantificación de Fe y Comparación de Productos.....	44
Cuantificación de Fe consumido por As.....	44
Insumos.	48
Productos.....	49
Conclusiones.....	50
Anexo I	51
Cálculo del pH del agua residual industrial	51
Anexo II	52
Diagramas.....	52
Bibliografía	58

Índice de Tablas

Tabla I. Principales Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales en México (Ducci, 2013).....	12
Tabla II. Temperatura y concentración de los componentes principales del agua proveniente de la presa de jales (González, 2008).....	35
Tabla III. Comparación de valores de consumo de Fe con respecto al As....	46
Tabla IV. Flujos de materias primas para el Proceso.....	48
Tabla V. Flujos de salida del Proceso.....	49

Índice de Figuras

Figura I. Disponibilidad promedio de agua en diversos países (m ³ /habitante/año) (Informe de la Situación del Medio Ambiente., 2012).....	9
Figura II. Disponibilidad promedio de agua en diversos países (m ³ /habitante/año) (Programa Nacional Hídrico., 2007-2012).....	10
Figura III. Plantas de tratamiento de aguas residuales de origen industrial por nivel de tratamiento, 2011 (Conagua, 2012).....	13
Figura IV. Límites permisibles de metales en la descarga de aguas residuales (Comisión Estatal del Agua., 2013).....	15
Figura V. Ilustración de los mecanismos de EC.....	26
Figura VI. Diagrama que muestra los procesos y corrientes de la planta tratadora de agua.....	41
Figura VII. Diagrama que muestra los flujos másicos totales (kg/hr).....	42
Figura VIII. Diagrama que muestra las concentraciones de arsénico (ppm).....	45
Figura IX. Diagrama que muestra los flujos másicos de líquido (kg/hr).....	54
Figura X. Diagrama que muestra los flujos másicos de sólidos (kg/hr).....	55
Figura XI. Diagrama que muestra los flujos másicos de H ₂ SO ₄ (kg/hr).....	56
Figura XII. Diagrama que muestra las concentraciones de hierro (ppm).....	57

Resumen

En este trabajo se simuló la eliminación del Arsénico presente en una corriente acuosa industrial para poder aprovecharla de manera amigable con el medio ambiente. Para lo cual se llevó a cabo una simulación de tipo macroscópica con ayuda de un programa denominado MetSim, dicha simulación consistió en diseñar una Planta Tratadora de Agua incluyendo el proceso de Electrocoagulación, los datos de la corriente acuosa corresponden con los reportados en la literatura para el agua recuperada de una presa de jales y que presenta un contenido de arsénico elevado, el cual es tóxico y cancerígeno.

Para diseñar la planta se seleccionaron aquellos procesos que cumplían con las necesidades para cada etapa y se determinaron los parámetros de cada uno. Las reacciones en los procesos necesarios se definieron a partir de la bibliografía consultada. Se fijó la composición de la corriente acuosa, las condiciones de las diferentes corrientes, los elementos y compuestos presentes en el proceso. Se inició con la simulación de las diferentes operaciones, cada una por separado y luego todas juntas hasta que el modelo de toda la planta convergió.

Se concluyó que es posible la eliminación del arsénico presente en una corriente acuosa industrial para el aprovechamiento del agua en el mismo proceso u otra área de la planta. También, que la electrocoagulación puede ser considerada una técnica factible y amigable con el medio ambiente, al no consumir reactivos químicos; además de que los costos de aplicación de esta técnica son bajos.

Introducción

1. El agua

El agua es nuestra necesidad vital más imperiosa sin la cual apenas sobrevivimos tres días. Pese a ello, un 11% de la población mundial, no tienen acceso a una fuente de agua potable en condiciones (ONU, T.M., Agua). Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (Informe de la Situación del Medio Ambiente., 2012).

Hoy en día la humanidad enfrenta la que quizás sea una de las mayores problemáticas del siglo XXI, y es la necesidad de proveer agua para una creciente población mundial. La demanda de agua va en aumento en relación con el agua disponible y existe una sobreexplotación de las fuentes (Restrepo, A., 2006). Aun cuando el tema del agua se ha centrado principalmente en las necesidades humanas, es indispensable destacar su importancia como elemento clave para el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad (Informe de la Situación del Medio Ambiente., 2012).

1.1 Disponibilidad del agua

Cerca del 70% de la superficie de la tierra está cubierta de agua, no obstante la mayor parte del agua de la Tierra es salada: 97.5% es agua de mares y océanos. El restante 2.5% es agua dulce (Centro Virtual de Información del Agua., 2004), la mayoría del agua dulce del planeta está en forma de hielo en los glaciares, está en acuíferos no accesibles o presenta una contaminación severa por lo que su uso representa un riesgo para la salud humana (Cervantes, J., 2010).

Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos se contaminan por las descargas sin tratamiento previo, de aguas municipales e industriales, así como por los arrastres que provienen de las zonas que practican actividades agrícolas y pecuarias como se muestra en la figura I.

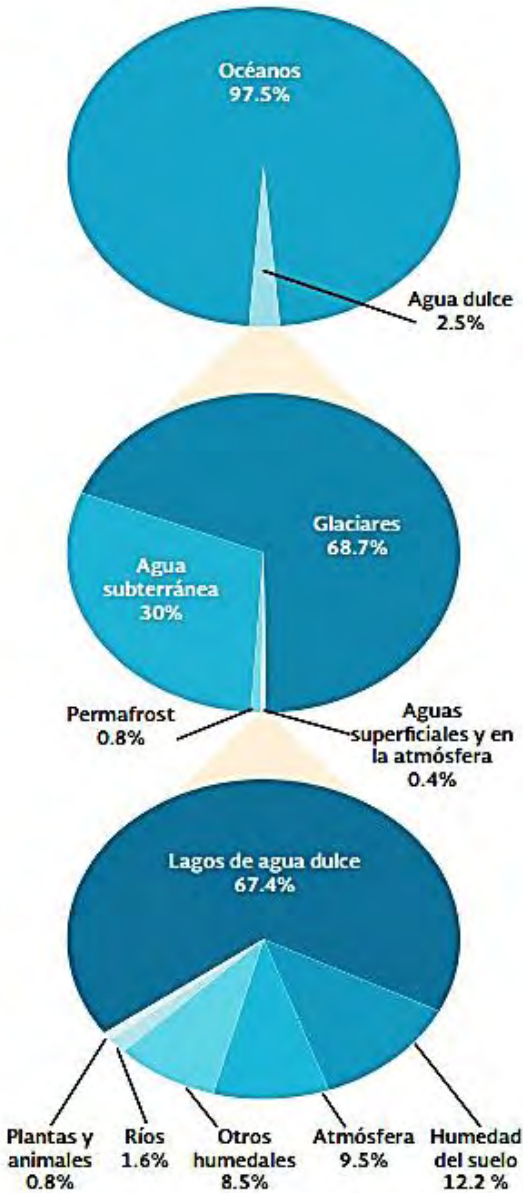


Figura I. Disponibilidad promedio de agua en diversos países (m³/habitante/año) (Informe de la Situación del Medio Ambiente., 2012).

Las reservas de agua en el mundo consideran el volumen disponible total acumulado de agua subterránea y superficial. Las reservas de agua mundiales son: Suramérica es la región con los mayores recursos hídricos renovables del planeta (cerca del 31.8% del total), seguida por Asia (28.9%) y Europa (13.9%); en contraste, la región de Centroamérica posee tan sólo el 1.5% de la reserva total mundial (Programa Nacional Hídrico., 2007-2012). En la figura II se muestra un parámetro de referencia en el contexto internacional en relación con el agua es su disponibilidad per cápita.

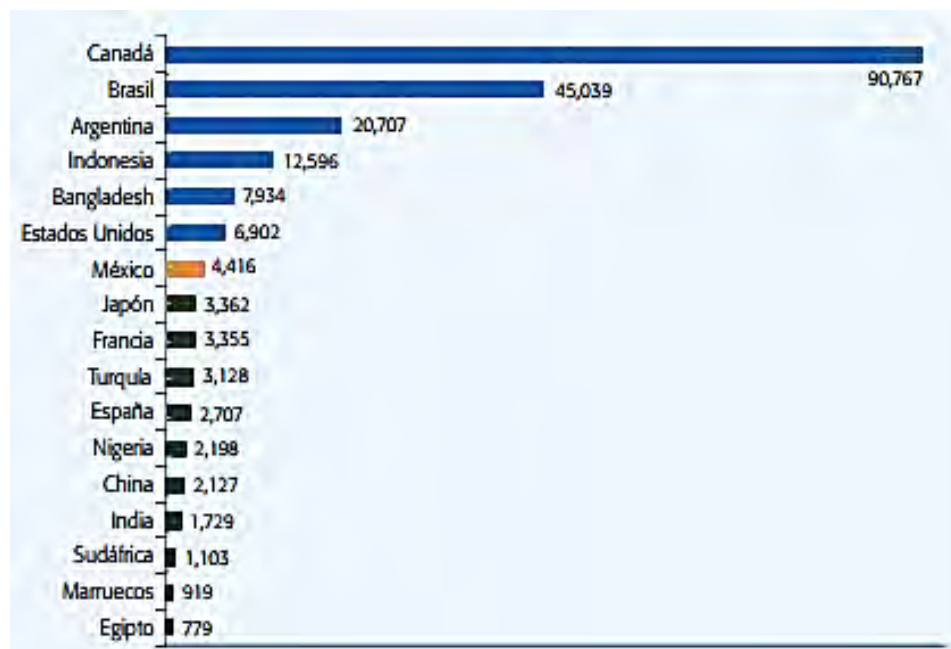


Figura II. Disponibilidad promedio de agua en diversos países (m³/habitante/año) (Programa Nacional Hídrico., 2007-2012).

Con base en esta ilustración, se puede ver que en tan sólo 56 años México pasó de una disponibilidad de 18,035 a tan sólo 4,416 metros cúbicos por habitante al año (Programa Nacional Hídrico, 2007-2012). La disponibilidad del agua depende no solo de la cantidad, sino también de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que no sea acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita (Jiménez, C., 2005).

De acuerdo con datos recientes proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, México pasó de tener una disponibilidad de agua de 18,000 m³/habitante-año en el año 1950 a 4400 m³/habitante-año en el 2006. Además, se estima que para el año 2025 dicha disponibilidad de agua sea de 3800 m³/habitante-año. Respecto a las aguas residuales que se generan en México, se crea un caudal total de 255 m³/s, de los cuales se captan 205 m³/s. A su vez, de esta cantidad captada, solamente se trata el 36.4%, lo cual representa 74.6 m³/s tratados en cerca de 1,500 plantas de tratamiento de aguas residuales (Diario Oficial de la Federación-DOF., 2014).

Los requerimientos de agua potable se han incrementado más de 6 veces debido al desarrollo industrial, a la irrigación no controlada y a la falta de conservación de este vital líquido (ONU, T.M., Agua), con lo cual se crea el reto de investigar y adaptar tecnologías que permitan la protección, conservación y recuperación del recurso hídrico (Arango, R., 2005), al igual que dichas tecnologías sean eficaces y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales.

1.2 Tratamientos de aguas residuales

Para enfrentar este problema, las tecnologías como ultrafiltración, ósmosis inversa y precipitación química se han desarrollado. Cada método de tratamiento tiene ventajas y desventajas. La ultrafiltración y la ósmosis inversa son procesos limpios, pero pueden ser prohibitivamente caros. Mientras que la precipitación química es un proceso sencillo, pero genera un alto volumen de lodos (Escobar, C., 2006). Como se puede observar en la tabla I, en México existen un total de 742 plantas de tratamientos de aguas residuales, de las cuales más de un 50 % de ellas llevan a cabo procesos convencionales (Ducci, 2013).

Proceso Central	Propósito	Plantas	
		No.	%
Ablandamiento	Eliminación de dureza	19	2.6
Adsorción	Eliminación de trazas orgánicas	3	0.4
Clarificación convencional	Eliminación de sólidos suspendidos	206	27.8
Clarificación de patente	Eliminación de sólidos suspendidos	159	21.4
Filtración directa	Eliminación de sólidos suspendidos	75	10.1
Filtración de carbón activado	Eliminación de sólidos suspendidos	15	2.0
Filtración lenta	Eliminación de sólidos suspendidos	11	1.5
Ósmosis inversa	Eliminación de sólidos suspendidos	231	31.1
Remoción de fierro y manganeso	Eliminación de sólidos disueltos	12	1.6
Otro		11	1.5
	Total	742	100

Tabla I. Principales Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales en México (Ducci, 2013).

Respecto al tratamiento de aguas residuales de origen industrial, en 2010 las plantas de tratamiento industrial del país procesaron 63 600 L/s. Las entidades que trataron en 2010 el mayor volumen de aguas residuales generadas de origen industrial fueron Sonora (27.34 m³/s cerca del 43% del total de aguas residuales de tipo industrial que se trataron a nivel nacional), Veracruz (8.70 m³/s), Tamaulipas (6.11 m³/s), Chiapas (3.34 m³/s) y Nuevo León (2.99 m³/s) (Conagua, 2012).

En la figura III se muestra el porcentaje de los tres niveles que existen en el tratamiento de aguas.



Figura III. Plantas de tratamiento de aguas residuales de origen industrial por nivel de tratamiento, 2011 (Conagua, 2012).

En esta figura se puede apreciar que el tratamiento más utilizado es el secundario, que se aplica en 1 869 plantas. Los sistemas de nivel primario son los más sencillos en la limpieza del agua (los tratamientos incluyen procesos físicos como el cribado, la flotación o eliminación de grasas y sedimentación); su función es

limpiar el agua de partículas cuyas dimensiones puedan obstruir los procesos subsecuentes. El nivel de tratamiento secundario limpia el agua de las impurezas cuyo tamaño es mucho menor a las que se captan por decantación y rejillas, para lo que se emplean métodos mecánicos y biológicos combinados (estos sistemas son muy diversos y dependen de factores como el clima para hacer la selección adecuada; como los sistemas de percolación y los anaeróbicos). Finalmente el tratamiento terciario incluye procesos biológicos, físicos y químicos (Conagua, 2012).

Históricamente las descargas de efluentes de una variedad de actividades antropogénicas han dado lugar a la contaminación de los ríos, lagos y otros cuerpos de agua (Cervantes, J., 2010). El crecimiento de la industria de procesos químicos tiene en consecuencia aumentos en la cantidad de aguas residuales descargada en el medio ambiente. Muchas de las aguas residuales industriales contienen metales pesados tales como As, Cd, Cr, Fe, Zn, entre otros en concentraciones por encima del nivel deseado del Consejo Regulador de la Contaminación (Madhavan, K., 2001).

La mayoría de los metales se consideran perjudiciales cuando se descargan sin tratamiento, principalmente debido a su no biodegradabilidad, toxicidad y/o carcinogenicidad (Gastios, 2015). El tratamiento de las aguas residuales es difícil debido a las grandes variaciones en su volumen y la composición, las altas concentraciones de la materia y sales orgánicas, y la presencia de pocos compuestos biodegradables o sustancias orgánicas (García, G., 2015).

1.2.1 Características de Agua Tratada

En México, los parámetros mínimos para caracterizar el agua residual, están dictados por las Normas Oficiales Mexicanas y por las Condiciones Particulares de

Descarga. En la Figura IV, se muestran los parámetros que se estipulan en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 (Comisión Estatal del Agua., 2013)

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																						
PARAMETROS(*) (miligramos por litro)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO				HUMEDALES NATURALES	
	Uso en riego		Uso público		Protección de vida acuática		Uso en riego		Uso público		Explotación pesquera, navegación y otros usos		Recreación		Estuarios		Uso en riego agrícola		NATURALES			
	agrícola		urbano				agrícola		urbano				(B)		(B)		agrícola		(B)			
	(A)		(B)		(C)		(B)		(C)		(A)						(A)					
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2		
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2		
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0		
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0		
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0		
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01		
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4		
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4		
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20		
P. D. = Promedio Diario		P. M. = Promedio Mensual				N. A. = No Aplicable																
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos																						
(1) Instantáneo																						
(2) Muestra Simple Promedio Ponderado																						
(3) Ausente según el método de Prueba definido en la NMX-AA-006																						

Figura IV. Límites permisibles de metales en la descarga de aguas residuales (Comisión Estatal del Agua., 2013).

2. Arsénico

Entre los metales pesados presentes, el arsénico es considerado como el más peligroso dentro de este grupo en términos de su impacto sobre los seres humanos y otros organismos (Mohan, D., 2007). Es una sustancia tóxica liberada tanto por ciertas actividades humanas como de forma natural por la corteza terrestre (American Cancer Society).

El arsénico existe tanto en forma orgánica como inorgánica. Los compuestos de arsénico inorgánico (como los que se encuentran en el agua) son extremadamente tóxicos (Organización Mundial de la Salud.- OMS., 2016). Con respecto al agua es

uno de los principales contaminantes, y posee características peligrosas graves (Madhavan, K., 2001).

El arsénico ocupa el lugar número 20° en abundancia en la corteza terrestre (Mandal, B., 2002), es un metaloide incoloro e inodoro, las especies de arsénico que pueden presentarse en cuerpos de agua son: Arsenito As (III) que forma una especie $(\text{H}_3\text{AsO}_3)_{(\text{ac})}$ o bien en forma de arseniato As (V) cuya forma iónica en solución es $(\text{H}_2\text{AsO}_4^-)$ (Mohan, D., 2007).

2.1 Toxicidad del arsénico

Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte (Organización Mundial de la Salud.- OMS., 2016). Los que sobreviven a un envenenamiento severo pueden desarrollar manchas de pigmentación en la piel y daños en los glóbulos rojos, la médula ósea, el hígado, los nervios y el cerebro (Green Facts., 2001). Igualmente la exposición a largo plazo de arsénico se ha relacionado con varios tipos de cáncer (American Cancer Society).

Derivado de las altas cantidades de arsénico en el agua potable se han percibido signos y síntomas de envenenamiento por arsénico, especialmente en países en desarrollo, donde millones de personas están en alto riesgo. Sin embargo, el arsénico dentro del agua contaminada no es un problema que solo se limite a los países en vías de desarrollo. En los Estados Unidos de América se ha estimado que 13 millones de personas beben agua con más de 10 g/L de arsénico (Bissen, M., 2003).

Existen diversas organizaciones mundiales como la Agencia de Protección Ambiental, la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea, que han establecido límites permisibles sobre la concentración máxima de arsénico contenida en agua. En México, es a través de la Norma Oficial Mexicana, NOM-127-SSA1-1994, de la modificación del año 2000, la cual estipula la concentración máxima permisible de arsénico para agua potable o de uso agrícola (Diario Oficial de la Federación – DOF., 2000).

2.2 El arsénico en las aguas mexicanas

La exposición al arsénico, principalmente a través del consumo de agua contaminada, ha afectado la salud de millones de personas en el mundo (Armieta, M., 2010). El arsénico se presenta en el agua procedente de la disolución de minerales y menas y efluentes industriales (Jiménez, C., 2005).

2.2.1 La Minería como Fuente de Arsénico

El arsénico se ha asociado con actividades mineras (Arreguín, 2014), México se ha caracterizado por ser una potencia minera. En la actualidad se encuentra en los primeros lugares del mundo en la producción de arsénico, cadmio, plomo, mercurio, fluorita, bario, etcétera. La minería es una actividad de gran importancia en algunos estados de la República Mexicana (Mejía, J., 1999).

En México se conoce que son varias las localidades del país cuyas fuentes de abastecimiento se encuentran contaminadas con arsénico. Tales localidades se ubican en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco, Morelos, Hidalgo y Guerrero (Gaceta del IMTA., 2009).

En regiones mineras, el desarrollo de procesos geoquímicos y la disposición inadecuada de los residuos de las operaciones de explotación y procesamiento

han ocasionado problemas de contaminación (Armieta, M., 2010). Por consiguiente, los sitios mineros con sus consecuentes exposiciones químicas abundan y su impacto en salud merece ser analizado (Mejía, J., 1999).

En México más del 90% de los residuos peligrosos que se producen al año se manejan inadecuadamente (Díaz, B., 1996). Al respecto, cabe mencionar que la minería genera 65% de los residuos industriales que se producen en México (Mejía, J., 1999). El grueso de los residuos se dispone de manera anómala en el ambiente, contaminando ríos, cañadas, desiertos, etcétera.

En la mayoría de los casos aún no se implementa un proceso de tratamiento debido a varias razones, entre las que se destacan los costos de la inversión inicial y de la operación, y el mantenimiento de la planta o de los equipos de tratamiento (Gaceta del IMTA., 2009). El problema de que la gran mayoría de los residuos no sean manejados correctamente puede ser aún más grave (Díaz, B., 1996).

La literatura dicta que la electroquímica puede ser una técnica viable y de bajo costo de la remoción de arsénico en un futuro próximo debido a algunas ventajas tales como, no hay problema de gestión de residuos económica, sin uso de productos químicos durante el proceso de purificación, etc. (Imran, A., 2011).

2.3 Técnicas de eliminación del arsénico

Varias son las técnicas desarrolladas y aprobadas para plantas de abatimiento de arsénico en agua (Holt, P., 2005). No obstante, la inmensa mayoría suponen un alto costo a la vez que un complicado uso y mantenimiento (Parga J.R., 2014). Los aspectos económicos son los factores más importantes para la selección de la tecnología de remoción de arsénico, también existen un número de factores

culturales y políticos que ayudan en la implementación de nuevas tecnologías (Arango, R., 2005).

La selección del método igualmente dependerá de la especiación del arsénico, la composición química del agua, el potencial de reducción, la dureza, la presencia de sílice, sulfatos, fosfatos, hierro y otras especies químicas, los volúmenes a ser tratados y el grado de sofisticación que pueda ser aplicado (Arango, R., 2005).

Todas las tecnologías se basan en unos pocos procesos químicos básicos, aplicados simultáneamente o secuencialmente: oxidación/reducción, precipitación, adsorción e intercambio iónico, separación sólido/líquido, exclusión física, etc. (Arango, R., 2005). Existen diversas técnicas que pueden ser utilizadas para llevar a cabo la remoción de arsénico y alcanzar los niveles de los valores deseados (Parga J.R., 2014).

La adsorción con alúmina activada y el intercambio iónico son dos métodos muy empleados. A escala más pequeña se aplican generalmente métodos como el intercambio iónico, adsorción sobre alúmina activada, ósmosis inversa, nano filtración y electrodiálisis inversa, métodos solares, etc. (Arango, R., 2005).

Hoy en día, las tecnologías electroquímicas ofrecen las herramientas ideales para abordar los problemas ambientales (García, G., 2015). Una tecnología eficaz que cumple los requisitos de limpieza de proceso, facilidad de manipulación, y baja operativa y los costos de inversión es la electrocoagulación (Escobar, C., 2006).

3. Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es una tecnología de tratamiento que ha empezado a tomar auge en las últimas décadas, aunque su desarrollo se llevó a cabo a

principios del siglo pasado y fue patentada en los Estados Unidos en 1909 (Soberanis, M., 2011). Es el proceso de desestabilizar los contaminantes suspendidos, emulsionados, o disueltos en un medio acuoso mediante la introducción de una corriente eléctrica en ese medio (García, G., 2015).

El proceso implica un fenómeno electroquímico que elimina simultáneamente los metales pesados, sólidos suspendidos y/o emulsionados y otros contaminantes del agua utilizando electricidad con placas de metal como electrodos. La EC es una simple y eficaz técnica en el que no se añade coagulante, por lo tanto, la cantidad de lodos es reducida (Imran, A., 2011).

A diferencia de la clarificación química, el coagulante es generado *in situ* por la oxidación electrolítica del ánodo (Rivera, H., 2008). La electrocoagulación elimina el arsénico presente en la corriente con una alta eficiencia del proceso sin requerir un valor fijo de pH. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la manipulación y disposición final de los residuos generados.

Revisión de la literatura

1. Orígenes de la Electrocoagulación

Los procesos electroquímicos se han utilizado en el tratamiento del agua y de las aguas residuales desde 1887 (Vik, E., 1984), la electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde el siglo XIX (Arango, R., 2005).

A fines del siglo XIX se pusieron en marcha varias plantas de tratamiento de aguas a gran escala en Londres. En la década de 1930, sin embargo, todas esas plantas habían sido abandonadas debido a los mayores costos operativos y la disponibilidad inmediata de alternativas de producción masiva para la dosificación de coagulantes químicos (Holt, Peter K., 2005).

En 1888 se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster, proceso que fue investigado luego en otras localidades de Inglaterra. En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizó ánodos de hierro y aluminio (Arango, R., 2005).

En 1909 J.T. Harries recibió la primera patente concedida en los Estados Unidos para el tratamiento de aguas residuales (Kabdasli, I., 2012). En 1930 este proceso dejó de tener interés para la industria aunque como hecho aislado fue utilizado en 1932, en Alemania, con eficiencia del 50% en reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de aguas residuales (Arango, R., 2005).

1.1 Resurgimiento de la Electrocoagulación

En 1947, en la URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro, obteniendo remociones de 70-80 % de DBO.

Se han reportado trabajos en URSS en donde se utilizó el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo (Kabdasli, I., 2012). En 1971, en Vancouver del Norte, se utilizaron ánodos de aluminio para disolverlos y coagular aguas negras. Este proceso operó a un costo ligeramente inferior al requerido con alumbre (Holt, Peter K., 2005).

Con el tiempo se presentaron problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos para que la industria adoptara esta técnica (Vik, E., 1984). Sin embargo, debido a su probada capacidad para eliminar eficazmente una gama extremadamente amplia de contaminantes, la electrocoagulación está siendo reexaminada como una tecnología de tratamiento localizada de bajo costo (Holt, Peter K., 2005).

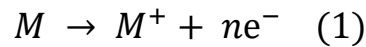
2. Fundamentos de la Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso de electrólisis (Kobya, M., 2008), donde la corriente eléctrica es aplicada en el agua residual a través de placas metálicas llamadas electrodos (Soto, E., 2004). La acción de la corriente eléctrica entre los dos electrodos permite la formación de iones metálicos por oxidación del ánodo (Kobya, M., 2008) que necesitan ser reemplazados periódicamente (Kabdasli, I., 2012).

Se han descrito diferentes electrodos en la literatura como el grafito, el titanio, el hierro y aluminio. Sin embargo, se ha reportado que el hierro y el aluminio son muy efectivos y exitosos en la remoción de contaminantes (Ghosh, D., 2008).

La especie coagulante se genera de manera in situ, esta especie es responsable de la agregación, así como de la precipitación de las partículas en suspensión y simultáneamente de la adsorción de los contaminantes disueltos (Ghosh, D., 2008).

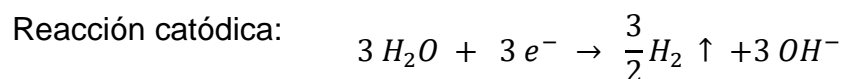
Las reacciones de los electrodos se resumen de la siguiente manera (Kabdasli, I., 2012):



El agua se reduce a hidrógeno gaseoso y el ion hidroxilo (Ecuación 2) (Koby, M., 2008), durante las etapas finales, los agregados coagulados interactúan con las burbujas (Ghosh, D., 2008) de hidrógeno gaseoso, que se forman durante la electrólisis del agua (Kabdasli, I., 2012) y flotan a la superficie o se asientan al fondo del baño EC (Ghosh, D., 2008).

2.1 Electrodos de Al

Las principales reacciones en los electrodos al utilizar Aluminio son (Koby, M., 2008):

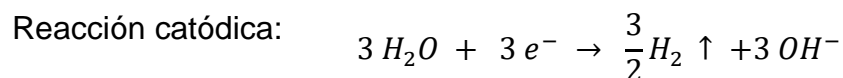
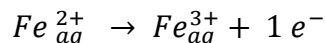


Durante la electrocoagulación, los cationes altamente cargados (Al^{3+} , Fe^{2+}) formados en el ánodo desestabilizan las partículas coloidales mediante la formación de especies complejas (Kabdasli, I., 2012). Los iones generados por reacciones de los electrodos reaccionan para formar diversas especies monoméricas y especies poliméricas, que finalmente se transforman en $Al(OH)_3$ de acuerdo con la cinética de precipitación compleja (Kobyá, M., 2008).

Estos complejos hidróxido-metálicos tienen altas propiedades de adsorción, formando agregados fuertes con polímeros. El grado de hidrólisis del metal depende de la concentración total de cationes metálicos y del pH, así como del tipo y concentración de otras especies presentes en la solución (Kabdasli, I., 2012).

2.2 Electrodo de Fe

Las principales reacciones en los electrodos con Fe son (Kobyá, M., 2008):



De forma similar, los iones férricos generados por la oxidación electroquímica del electrodo de hierro pueden formar especies monómeras y poliméricas dependiendo del pH del medio acuoso en el proceso de EC (Kobyá, M., 2008). El $Fe(OH)_n$ (s) permanece en la fase acuosa como una suspensión amorfa, que

puede eliminar los contaminantes de las aguas residuales por complejación o atracción electrostática seguida de coagulación (Kabdasli, I., 2012).

Durante las etapas finales, los agregados coagulados interactúan con las burbujas y flotan a la superficie o se asientan al fondo del baño de la CE. La flotación es la vía dominante de eliminación de contaminantes para altas corrientes de operación, mientras que la sedimentación es dominante a corrientes bajas (Ghosh, D., 2008).

3. La remoción del Arsénico mediante la EC

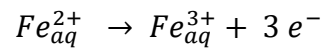
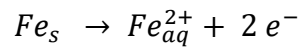
La EC para el arsénico se ha logrado con los electrodos de hierro y aluminio. Sin embargo, algunos autores también informaron del uso de electrodos de titanio, cobre y zinc. Todo el proceso de electrocoagulación se puede describir en tres partes: (i) oxidación electrolítica del ánodo de sacrificio y, por lo tanto, la formación de coagulantes, (ii) la desestabilización de los contaminantes, suspensión de partículas y la rotura de la emulsión, y (iii) la agregación de las partículas desestabilizadas (Imran, A., 2011).

3.1 Mecanismo de la EC

En la electrocoagulación (un proceso similar a la coagulación química), hay una reducción de la carga superficial neta a un punto donde las partículas coloidales pueden acercarse lo suficientemente cerca que origina las fuerzas de Van der Waals para que ocurra la agregación y mantenerlos juntos (Escobar, C., 2006).

Las principales reacciones en los electrodos de acuerdo en lo mencionado anteriormente y al utilizar Fe son (Koby, M., 2008):

Reacciones anódicas:



Reacción catódica:

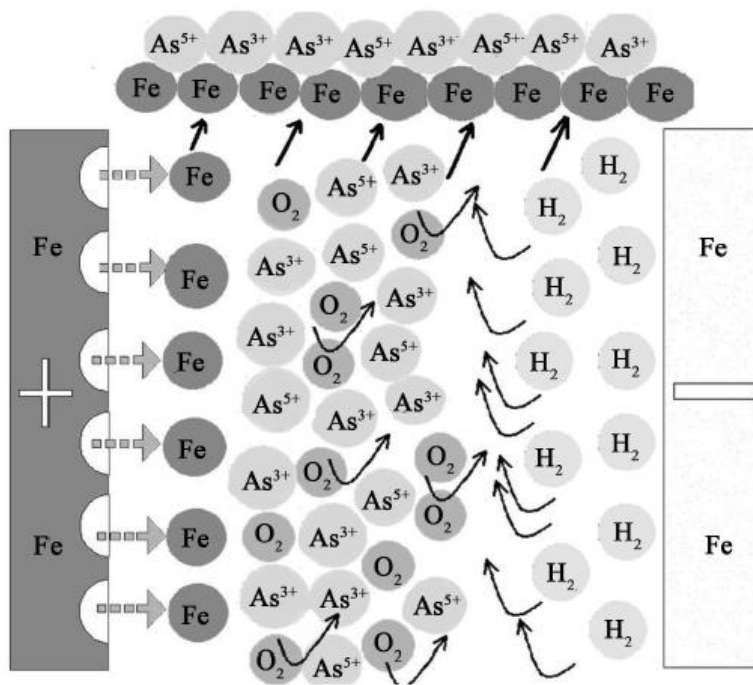
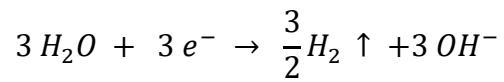


Figura V. Ilustración de los mecanismos de EC.

Los compuestos hidróxidos o polihidróxidos metálicos tienen una fuerte afinidad por las partículas dispersas así como contra iones que causan la coagulación (Gomes, J., 2007).

Además, se demostró que tanto el As (V) como el As (III) estaban fuertemente sorbidos por óxidos de hierro (III) tales como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, óxido férrico hidratado (HFO) y goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) (Gomes, J., 2007).

4. La simulación

Una de las herramientas que facilitan la investigación es la simulación y se puede abordar desde dos perspectivas, ya sea a nivel microscópico y/o macroscópico. Con respecto a nivel microscópico como su nombre lo dice es a escala microscópica, del orden de los micrómetros, a la cual se consideran los gradientes de las propiedades de transporte en un sistema dado. Se estudia el comportamiento de cada componente, compuesto o elemento y las interacciones que existen entre estos.

A nivel macroscópico no se consideran estos gradientes de propiedades de transporte, sino que se considera al sistema como una “caja negra”. Es decir, se consideran los comportamientos de los fenómenos involucrados a una escala mayor, las reacciones que ocurren en estos y el acoplamiento de todas las operaciones.

El MetSim es un simulador que permite modelar los procesos industriales y los propuestos y esto ahorra recursos al evitar la investigación experimental. Esto permite poner especial énfasis en el sistema a nivel macroscópico para comprender mejor los procesos (Belda, C., 2009), inclusive averiguar qué pasaría en el sistema si acontecieran determinadas hipótesis (Tapia, 2001).

Un aspecto muy importante a destacar dentro de las distintas definiciones de la simulación es que ésta pretende imitar el comportamiento del sistema real, (Belda, C., 2009). MetSim es un sistema de simulación de procesos de uso general

diseñado para ayudar en la realización de balances de masa y energía de procesos complejos. MetSim utiliza un surtido de métodos computacionales para efectuar una combinación óptima de complejidad, tiempo de usuario y uso de recursos informáticos (MetSim, 2017).

Planteamiento del problema

A través del tiempo, los gobiernos de algunos países han tenido la preocupación para lograr la remoción de metales pesados en aguas residuales, lo cual implica costos elevados e inversiones económicas elevadas.

Es importante destacar que la presencia de agua contaminada por la presencia del arsénico tiene mayor trascendencia dados los altos riesgos que tiene sobre la salud de las personas que consumen o están en contacto con dicho líquido contaminado. Si se consume durante periodos prolongados el agua contaminada con arsénico los efectos secundarios pueden ser cáncer de piel, neuropatías, lesiones dérmicas, entre otros.

Si a esto se agrega que la principal vía de dispersión del arsénico en el ambiente se lleva a cabo a través del agua. Cuando se concentra arsénico en aguas naturales frescas entonces se hace muy variable y tiene estrecha relación con las formas de arsénico que se encuentran en el suelo local.

Esta situación ocurre no solo escala nacional sino también globalmente; por lo cual, se han propuesto numerosos métodos para reducir el arsénico del agua; en donde la mayoría implican un alto costo en su inversión, de igual forma un complicado uso y mantenimiento.

Si bien es importante proporcionar la cantidad de agua que se requiere, también lo es que se suministre con la calidad adecuada de acuerdo a la NOM 127 y esto será posible al estar dentro del límite permisible del arsénico.

Cuando se busca retirar metales pesados contenidos en aguas de determinados lugares se han desarrollado diversos estudios en el ámbito de la electrocoagulación, siendo este un proceso viable y pertinente para el tratamiento de aguas residuales, tanto que tiene un margen muy elevado de eficiencia y es muy rentable debido a su bajo costo. Por lo anterior es relevante estudiar la electrocoagulación para la eliminación del arsénico.

En ese sentido el presente trabajo se presenta un *proceso de simulación efectivo de electrocoagulación* en la remoción de arsénico en una corriente acuosa industrial por la simulación de balances de materia utilizando el MetSim.

Hipótesis

En el presente trabajo se plantean dos hipótesis:

a).- Es posible seleccionar y conectar un conjunto de operaciones unitarias, dentro de una simulación mediante MetSim, para el tratamiento de un agua residual industrial (minera) y convertirla en agua libre de arsénico.

b).- Si se utiliza una operación de “electrowinning” y una separación de fases para la simulación con MetSim del proceso de electrocoagulación es posible separar el arsénico presente en el agua del proceso, entonces se logrará erradicar totalmente dicho elemento sin el uso de otras sustancias químicas.

Objetivos

- Demostrar por medio de la simulación el aprovechamiento de una corriente acuosa industrial de un modo sustentable y afable con el medio ambiente después de aplicar la técnica de electrocoagulación.
- Comprobar la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de arsénico en una corriente acuosa industrial por la simulación de balances de materia utilizando MetSim con la reportada en la literatura.

Metodología

La metodología aplicada consistió en simular un proceso de tratamiento para remover el arsénico presente en el agua proveniente de una presa de jales, incluyendo una operación unitaria de electrocoagulación y utilizando un programa comercial de simulación de procesos llamado MetSim, el cual se utiliza en la industria metalúrgica.

Es importante destacar que, al inicio de este trabajo, se realizaron las gestiones pertinentes a fin de obtener datos reales directamente de una planta tratadora de agua que tuviese arsénico. Al no poder contar con dicha información, se utilizaron los datos del agua de una presa de jales, obtenidos a través de la indagación en fuentes impresas, en este caso de un trabajo de tesis de doctorado (González, 2008).

1. Simulación con MetSim

Las diferentes etapas que se llevaron a cabo consistieron en las siguientes:

- a) Búsqueda y revisión de la literatura relacionada en fuentes ciber-gráficas y bibliográficas pertinentes para identificar los diferentes pasos que se llevan a cabo en el proceso actual de tratamiento de aguas residuales e incluir la electrocoagulación con la finalidad de eliminar el arsénico presente en la corriente acuosa.
- b) Análisis del proceso desde el punto de vista de los fenómenos de transporte, con ayuda del programa MetSim, se hizo uso de esta herramienta ya que ayuda a diseñar u “simular” un proceso, con lo cual obtendremos resultados próximos a la realidad.

- c) Se ideó el diagrama de flujo del proceso completo y con ayuda del software se realizaron los balances de materia. El programa MetSim es un programa de simulación de procesos desarrollado para ayudar al ingeniero en la realización de balances de materia y energía de procesos complejos. Dichos balances se practican en todas las principales operaciones unitarias representadas en el diagrama de flujo del proceso. El programa utiliza una variedad de métodos computacionales para efectuar una combinación óptima de complejidad, tiempo de usuario y la utilización de recursos informáticos.
- d) Dentro de esta etapa y primeramente con el programa MetSim se identifican los elementos que estarán involucrados en todo el proceso, los cuales son el H, O, C, N, Si, Fe, As, S y Cl. Después se definen los compuestos que están involucrados en el proceso, tomando en cuenta el estado de agregación en el que se requieren (gas, líquido o disuelto o sólido). Esto es importante debido a las diferentes condiciones de temperatura y presión que utiliza el programa para los cálculos. En este caso, también se deben de incluir algunos compuestos que el programa no tiene dentro de su base de datos y los cuales se necesitan para llevar a cabo la simulación.
- e) Al tener los compuestos ya definidos, se procede a ordenarlos de acuerdo a su estado de agregación y características, en primer lugar se incluyen los sólidos, después los sólidos orgánicos, los líquidos inorgánicos siguiéndole los líquidos orgánicos y todos los gases.
- f) Se definen las reacciones químicas de acuerdo a las reportadas en la literatura en la etapa de la electrocoagulación, con respecto a las etapas de desinfección y aireación estas se dedujeron de manera teórica.

- g) Para poder continuar con la siguiente etapa se procede a conceptualizar las características básicas que tiene la corriente de entrada denominada corriente uno o alimentación, en las cuales pueden identificarse la composición del agua que incluye; la cantidad de sólidos gruesos y finos, el arsénico, calcio, magnesio entre otros. Dicha información se recuperó de la tesis de doctorado antes mencionada y se pone como base de cálculo 1000 kg/hr.
- h) Por último, se inicia la simulación por cada etapa hasta hacer converger las operaciones unitarias individuales y finalmente el proceso completo.

1.1 Datos de entrada

La composición química del agua, la concentración del arsénico presente, los compuestos orgánicos y los sólidos en suspensión entre otros, se recabaron de la literatura (González, 2008).

Parámetro	Presa de Jales
T (° C)	26.5
Sulfatos (mg L ⁻¹)	5993
As (mg L ⁻¹)	0.22
Ca (mg L ⁻¹)	570.6
K (mg L ⁻¹)	152.3
Mg (mg L ⁻¹)	622.2
Na (mg L ⁻¹)	692

Tabla II. Temperatura y concentración de los componentes principales del agua proveniente de la presa de jales (González, 2008).

Las condiciones a las que se planteó la simulación, las reacciones involucradas en la etapa de remoción del arsénico se recabaron de diferentes fuentes consultadas.

La simulación consiste en definir y poner las condiciones de las corrientes, los parámetros para cada proceso individualmente, posteriormente se procede a iniciar el programa primero de manera individual cada etapa y por último todas las etapas juntas que componen el proceso. La simulación finaliza cuando todos los balances se satisfacen. Esto significa que se resolvió el sistema de ecuaciones que se generó, una ecuación por cada elemento por cada etapa en cada paso de la simulación, y el resultado tiene un error aceptable.

2. Otras consideraciones para la simulación

A continuación, se señalan algunas consideraciones aplicadas en la elaboración de esta propuesta de proceso:

- a) Se seguirá el proceso biológico de una planta tratadora de agua con la diferencia que se incluirá la etapa de electrocoagulación, esto con la finalidad de no agregar ningún compuesto químico con lo cual se reducirán los costos finales. En esta etapa se hará el diseño de la planta tratadora de agua, para lo cual se debe de identificar el proceso que se llevará a cabo e igualmente los diferentes parámetros para cada uno de ellos.

- b) En el diseño de la planta se incluyeron sistemas utilizados en el tratamiento de agua. El de separación de sólidos grandes consiste en que el agua pasa por unas rejillas que son las encargadas de atrapar los sólidos de gran tamaño a medida que estos intentan pasar. También, se involucraron desarenadores los cuales extraen las partículas que se

depositan rápidamente en el fondo de los tanques como son la grava y la arena que vienen en el agua de una presa de jales.

- c) Por último, están los tanques de sedimentación. La función que desempeñan es la de separar las partículas pesadas, las cuales se depositan en el fondo del tanque a medida que el agua ingresa. Estas tres etapas son para remover del agua de presa de jales todos los sólidos que pueden afectar en las etapas posteriores y que deben de llevar otro tratamiento, estas tres etapas corresponden de los procesos 2 al 4 en la simulación. Estas operaciones se simularon incluyendo separadores sólidos-líquidos. Estas y otras etapas se muestran en los diagramas de flujo.

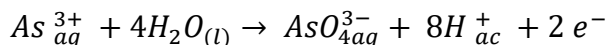
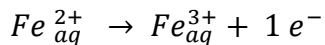
Después de estas tres etapas siguen la electrocoagulación, la aireación y la desinfección.

Simulación de los procesos unitarios críticos.

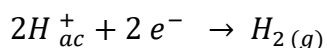
2.1 Electrocoagulación

El simulador no cuenta con una operación unitaria para la electrocoagulación; por lo cual, para simularla se empleó una operación unitaria de electro-recuperación (electrowinning) la cual tiene el mismo principio. En la etapa de la electrocoagulación se lleva a cabo la remoción del arsénico de la corriente acuosa. Se simulan electrodos de hierro ya que es más barato que el aluminio. En la simulación se utilizó una separación sólido líquido para obtener los compuestos de arsénico y de hierro de forma sólida.

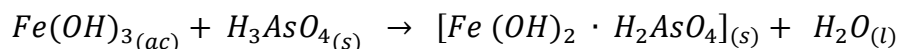
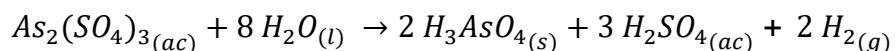
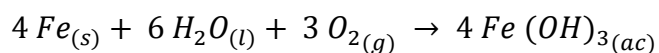
En esta etapa se simularon las siguientes reacciones parciales:



Reacciones catódica:

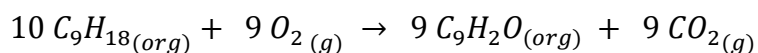


Las cuales dan lugar a las siguientes reacciones moleculares:



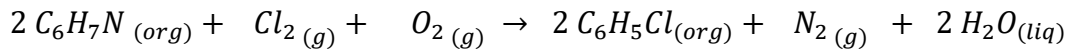
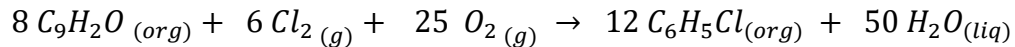
2.2 Aireación

Esta etapa consiste en aportar oxígeno mediante la inyección de aire al tanque para que las bacterias y otros microorganismos que se encuentran inmersos en el agua transformen los contaminantes en compuestos inofensivos. Para simular este proceso se utilizó un reactor agitado. La reacción que se usó para simular en esta etapa es la siguiente:



2.3 Desinfección

Para utilizar el agua de la presa de jales tratada en otras actividades como son la agricultura o en el área industrial se requiere su desinfección. Por lo que, en la etapa final del tratamiento, se utiliza cloro para eliminar los microorganismos que provocan las enfermedades. Las reacciones que se usaron para representar lo que ocurre en esta etapa son las siguientes:



La materia orgánica inicial y los compuestos clorados, que aparecen como productos de reacción, se propusieron para representar a los cuerpos de las bacterias y el consumo del cloro. Esta etapa se llevó a cabo con un reactor agitado en el cual se tiene una corriente de entrada para el cloro y también se utilizó un separador de fases que corresponde a la etapa 10, esto con la finalidad de poder separar el agua de los compuestos orgánicos presentes después de la desinfección y aireación.

En la última etapa se corre la simulación hasta que converge, al converger la simulación se concluye esta y se verifica que se cumplan todos los balances de materia.

Resultados y Discusión de resultados

Los resultados son presentados en dos partes, en la primera se muestran los diagramas de flujos obtenidos a partir de la simulación con ayuda del programa MetSim y en la segunda parte los cálculos realizados para la obtención del pH, la relación de Fe/As y las tablas de los productos obtenidos.

Parte I: Diagramas.

En este primer apartado se hace un análisis de los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada, donde se incluyen los diferentes diagramas desarrollados, los cuales muestran el diseño de la planta tratadora con sus respectivos flujos máxicos o concentraciones, los cálculos realizados para obtener el pH y la cantidad de Fe a utilizar y por último los flujos de salida e insumos que se utilizan haciendo una comparación.

En la figura VI se muestra el diagrama de flujo del diseño final de la planta tratadora de agua que se propone para eliminar el arsénico por medio de la aplicación de la electrocoagulación. La cual es un conjunto de las diferentes etapas unitarias que se llevaran a cabo para eliminar contaminantes de la corriente acuosa y donde la parte fundamental es la aplicación de la electrocoagulación que se propone para por medio de esta eliminar el arsénico presente. En el diagrama se puede observar cómo están relacionados los procesos, las diferentes corrientes de salida o entrada, el nombre propuesto para las diferentes operaciones realizadas e igualmente el “acrónimo” que tiene cada una de estas dentro del MetSim.

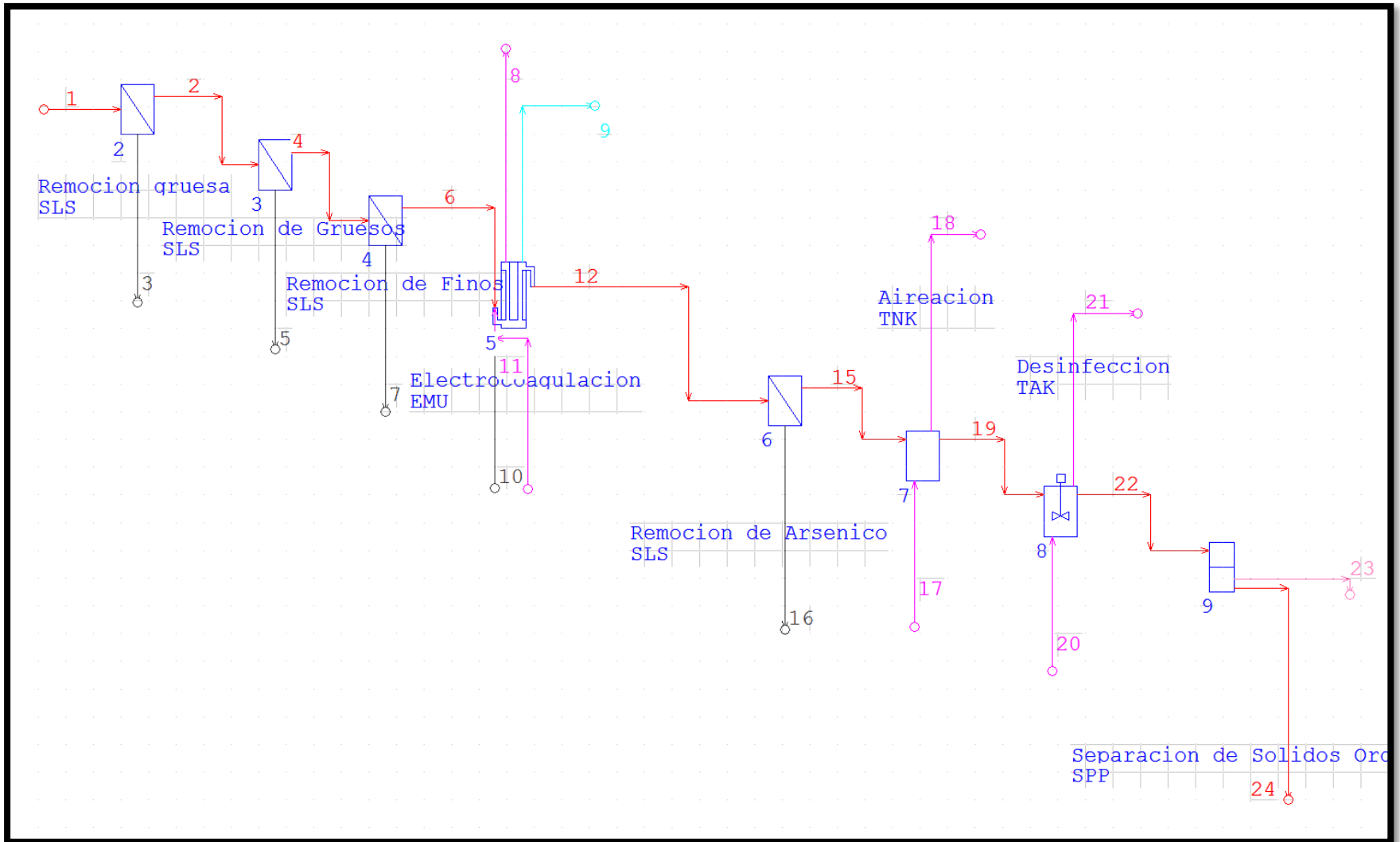


Figura VI. Diagrama que muestra los procesos y corrientes de la planta tratadora de agua.

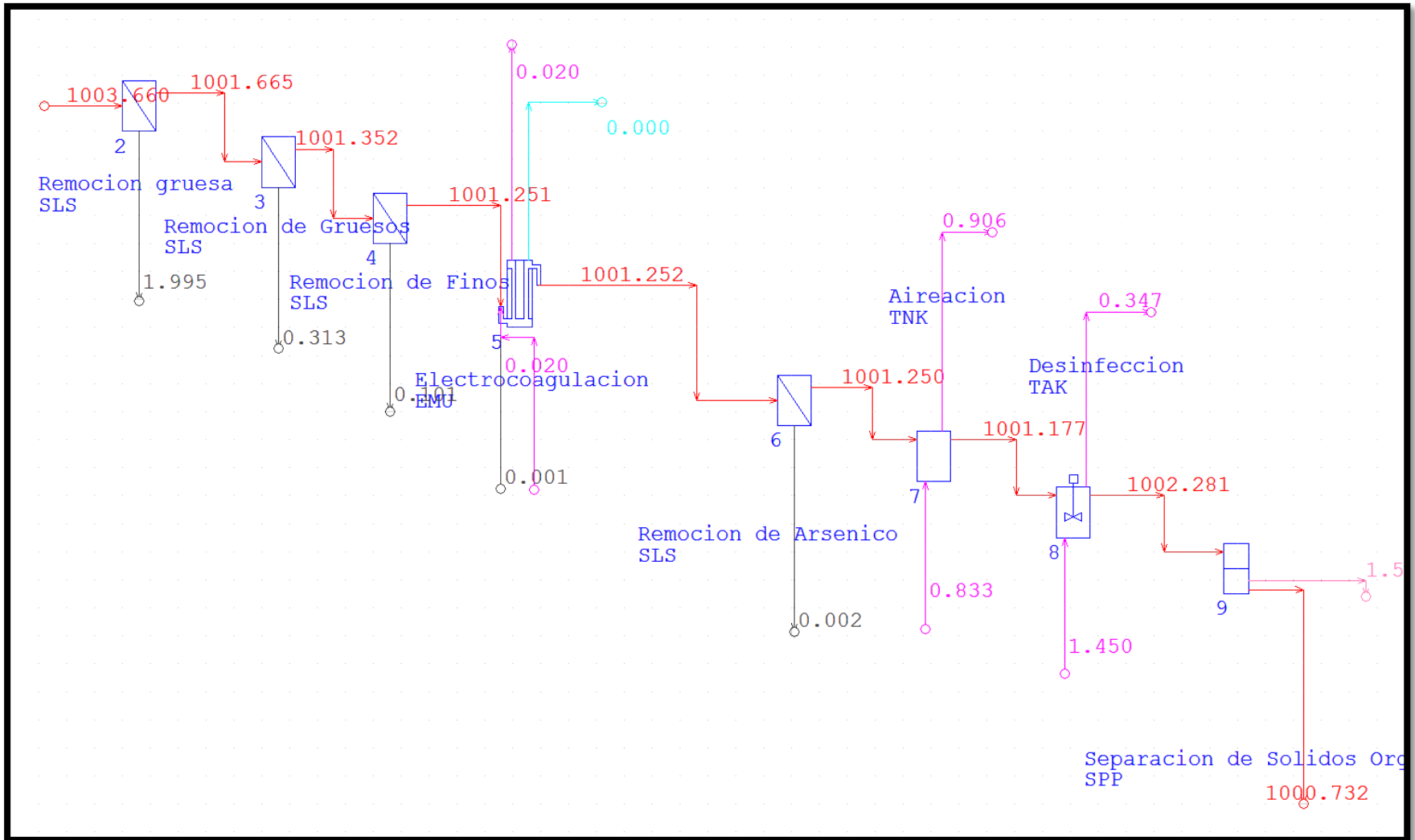


Figura VII. Diagrama que muestra los flujos másicos totales (kg/hr).

En la figura VII, se presenta el mismo diagrama del proceso de la planta tratadora de agua pero ahora se incluyen los flujos másicos totales. La base de cálculo para la simulación es de 1000 kg/hr de la corriente acuosa que contiene al arsénico en forma soluble, la cantidad restante que es 3.66 kg/hr corresponden a los sólidos y compuestos orgánicos presentes. Las tres primeras operaciones unitarias son para la remoción de sólidos, gruesa y fina. La remoción total obtenida de estas tres operaciones es de 2.409 kg/hr, la cual no es total pero esto es debido a que los procesos no son eficientes al 100%.

Se puede observar (figura IX del anexo I) que existen pérdidas de líquido en las operaciones 3 y 4, las cuales corresponden a la remoción de sólidos. Estas pérdidas se deben a que los sólidos son de tamaños de partícula pequeña y por lo tanto tienen el agua ocluida, lo que al separarlos de la corriente acuosa se llevan consigo algo de líquido.

Existe presencia de ácido sulfúrico en la corriente acuosa antes de la electrocoagulación. Además, dado que se simuló que el arsénico presente en la corriente acuosa se presenta en forma de sulfato arsenioso, el ion sulfato da lugar al ácido sulfúrico en la EC. Por esa razón, la cantidad de ácido en la corriente acuosa es mayor a la formada en la etapa de EC, aunque no se refleja en el flujo másico mostrado en el diagrama XI. De acuerdo con el contenido de ácido calculado, se estimó el pH final de la corriente acuosa, con un valor de 3.0, (ver el apéndice anexo I). Por ende, se podría recomendar una separación para remover el ácido presente y así obtenerlo como un subproducto dentro de la planta que se pueda utilizar posteriormente, al hacer esta separación y si el agua cumple con los requisitos se podría aprovechar en usos domésticos o agrícolas. También, se podría proponer utilizar el agua para reciclarla en la planta o en otros procesos o para otros usos industriales.

Parte II: Cuantificación de Fe y Comparación de Productos

Se presentan los cálculos realizados para obtener los diferentes valores requeridos.

Cuantificación de Fe consumido por As

En la figura VIII se muestra el diagrama de flujo del proceso propuesto, en donde se han anotado las concentraciones de arsénico. Se aprecia que, en la corriente de salida no existe presencia de arsénico ya que todo fue eliminado en la etapa de EC. Como ya se mencionó anteriormente, se forma una mezcla de complejos o precipitados en estado sólido, lo cual ayuda a poder separar de la corriente acuosa y que esta quede libre del arsénico.

Se observan pérdidas de arsénico en la parte de remoción de gruesos y remoción de finos, esto es debido a que al tener pérdidas de agua y a que esta agua ocluida en los sólidos como se mencionó anteriormente contiene arsénico, este elemento se va con ella ya que se encuentra disuelto dentro de esta. Para poder evitar que suceda esto se necesitaría tener otro proceso como una filtración, lo cual afectaría en un costo aún mayor. Esto no garantiza que no exista pérdida alguna de arsénico, primeramente porque como se mencionó anteriormente los procesos no son 100 % efectivo y siempre abra una pérdida mínima, al igual se debe en algún momento retirar o cambiar el filtro y algunas partículas todavía tendrán agua ocluida.

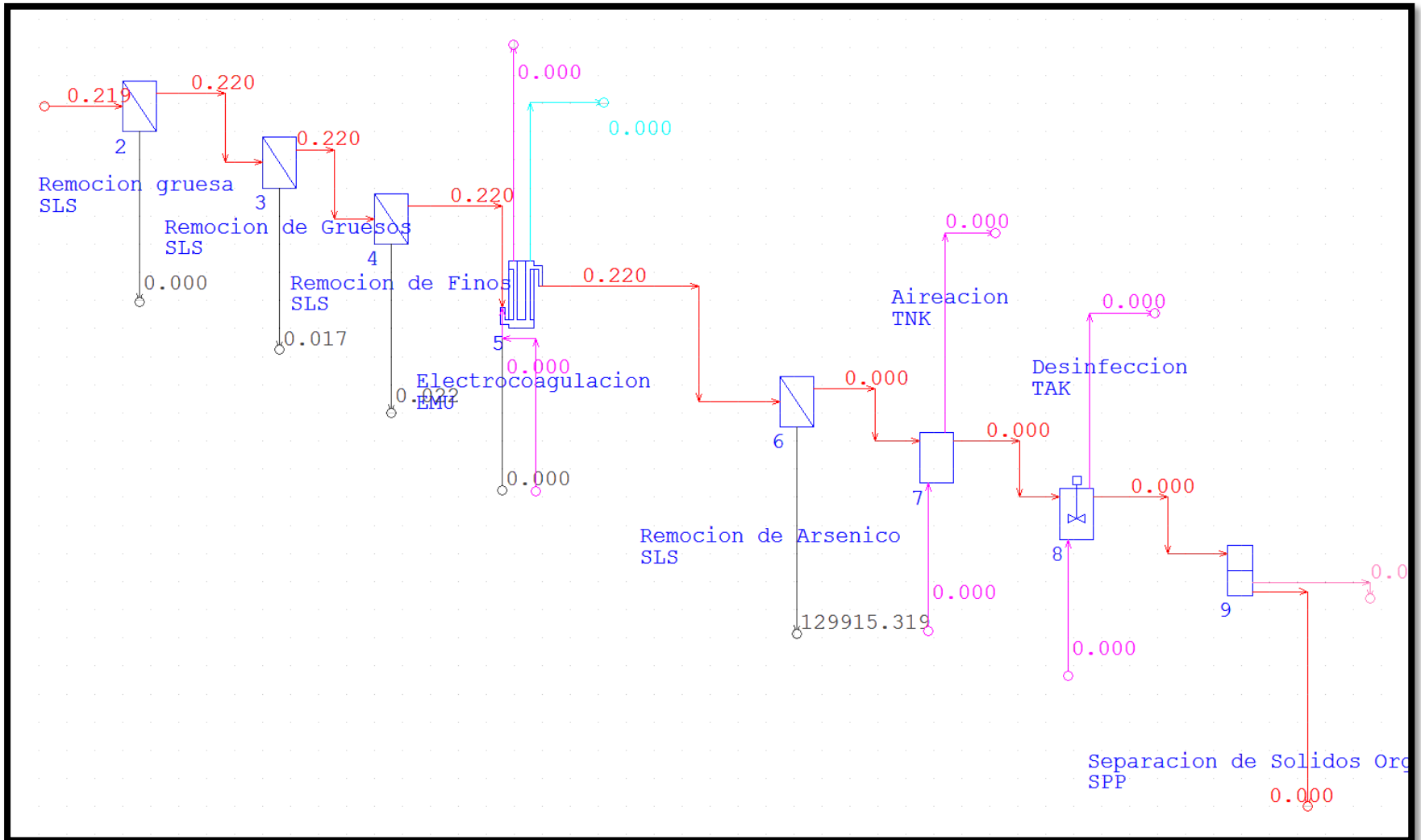


Figura VIII. Diagrama que muestra las concentraciones de arsénico (ppm).

De acuerdo con lo reportado en la literatura (Parga, 2014), se calculó el siguiente parámetro:

$$N (\text{mmol}_{\text{As}}/\text{g Fe}) = 4.24228$$

Este valor se obtuvo de manera empírica, para lo cual el investigador realizó experimentos mediante los cuales hizo la remoción del arsénico, utilizando como ánodo y cátodo el hierro. Lo cual, indica, después de la respectiva conversión, que para eliminar 0.3182 g Arsénico se debe disolver y precipitar 1.0 g de Fe. Dado que en la simulación se considera que en el agua residual industrial contiene 0.22 mg/L de arsénico (González, 2010), se obtiene un valor de:

$$0.00022 \text{ g As} \left(\frac{1 \text{ g Fe}}{0.3182 \text{ g As}} \right) = 6.91 \times 10^{-4} \text{ g Fe}$$

Es decir, se necesitan 6.91×10^{-4} g de Fe para remover esta cantidad de arsénico en la simulación.

	Empírico	Estimación	Simulación
Fe	1.0 g	6.91×10^{-4} g	6.95×10^{-4} g
As	0.3182 g	0.00022 g	0.00022 g

Tabla III. Comparación de valores de consumo de Fe con respecto al As.

En el diagrama de flujo que muestra la concentración de arsénico, Figura VIII, se observa que se logró una remoción total de este metal, el cual sale después de

pasar la etapa de la EC. De acuerdo a la literatura (Parga, 2014), que señala: “para eliminar 4.24228 mmol de As se utilizó 1 gramo de Fe”, se encontró que para la remoción de 0.32 gramos de arsénico se necesitan 1.0 gramos de hierro. Por lo tanto, como se mostró arriba, para la remoción de 2×10^{-4} gramos, que es el valor que se utilizó para la simulación, se necesitan 6.91×10^{-4} gramos de hierro, pero en la simulación se usó una cantidad solo un poco mayor comparada con esta, del orden de 1×10^{-6} .

La diferencia entre estas cantidades tiene algunas explicaciones. Una de ellas se encuentra asociada a que en la literatura no se hace mención de cómo se encuentra el arsénico en la solución, tampoco se hace mención de las reacciones o reacción que ocurre dentro de la etapa de electrocoagulación, en referencia al arsénico, ni que compuesto final se forma con el hierro.

En la simulación se propusieron las reacciones que se llevarían a cabo tomando en cuenta lo que se encontró en la literatura y no se tiene certeza de si estas reacciones coinciden de alguna manera con el experimento citado. Aunque esta relación no es la misma que en la literatura, se trató de realizar la simulación para llegar a un valor cercano y por lo cual hubo un aumento en el consumo de Fe.

Una vez que se logró la simulación del proceso, se puede analizar qué ventajas ofrece el proceso propuesto respecto al proceso sin EC. Un parámetro que permite comparar un proceso es el consumo de insumos, cuando se tiene la misma base de cálculo y los productos obtenidos.

Insumos.

En la siguiente tabla se comparan los flujos de las materias primas que se utilizan en el proceso:

Sustancia	Proceso sin EC. (kg/hr)	Proceso con EC. (kg/hr)
O ₂	0.9038391	0.9084974
N ₂	0.6389797	0.6543213
Cl ₂	0.7401810	0.7401810
Fe	0.0	0.000695

Tabla IV. Flujos de materias primas para el Proceso.

Dentro del diseño de la planta no se utiliza aire y Fe, por lo cual se quita la cantidad utilizada de estos insumos y así se puede llevar a cabo la comparación si se tiene la etapa de electrocoagulación y si no se tiene esta.

El oxígeno suministrado en el proceso sin EC es de 0.903 gramos y con la etapa de EC es de 0.908 gramos. Para la electrocoagulación se suministró 0.005 gramos del cual solo el 2 % aproximadamente se consumió para llevar a cabo la reacción. Similarmente, la cantidad de nitrógeno aumentó cuando se lleva a cabo la etapa de EC; esto es debido, a que el oxígeno suministrado es en forma de aire; con lo cual, se mantiene su proporción con el nitrógeno. Con respecto al cloro la cantidad es la misma ya que la EC no afecta en la desinfección del agua, esta etapa es la final. En la etapa de aireación se produce dióxido de carbono, el cual es independiente a la etapa de electrocoagulación.

Productos

Corriente de Salida: En la siguiente tabla se incluyen los flujos de las salidas del proceso propuesto exceptuando los gases.

Salida	Flujo (kg/hr)
H₂O	998.55
H₂SO₄	0.04089
[Fe(OH)₂ · H₂AsO₄]	6.78 x 10 ⁻⁴
C₆H₅Cl	1.55

Tabla V. Flujos de salida del Proceso.

Los compuestos orgánicos que se obtienen al final, y que ya no afectan a la corriente acuosa, son separados de esta y conforman un flujo es de 1.55 gramos por hora, el cual es eliminado en su totalidad. Al pasar por la aireación y la desinfección se vuelven compuestos que no son dañinos y que igualmente se pueden dejar para no utilizar otro equipo que se traduciría en mayor inversión económica.

Las ventajas de introducir la etapa de la EC es la remoción total del arsénico. Además, se evita la necesidad de utilizar compuestos químicos y no se generan gases que contaminen el medio ambiente. La cantidad que se consume de hierro es poca y permite que el agua tratada por este proceso pueda reutilizarse. La desventaja es que se necesita una inversión inicial que algunas empresas quizá no querrán proveer. También, se requerirá una mayor cantidad de equipo para llevar a cabo esta propuesta y se tiene una pequeña generación de ácido sulfúrico pero esta no acidifica considerablemente el agua.

Conclusiones

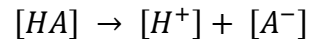
Una vez culminado el presente trabajo, se arribaron a las siguientes conclusiones de manera significativa, que en mucho pueden servir a trabajos posteriores:

- a) Se efectuó una simulación con ayuda del programa MetSim, en el cual se integró la etapa de la electrocoagulación a un proceso de tratamiento de agua con la finalidad de poder eliminar el arsénico en el agua residual industrial.
- b) Al mostrarse por simulación que es posible eliminar el contenido de arsénico del agua residual industrial, esta idea se podría probar experimentalmente y aprovechar para reutilizarla en esta u otra planta o proceso y así evitar el desperdicio del agua.
- c) El llevar a cabo un proceso de simulación incluyendo la EC, mostró que esta técnica es viable y pertinente, ya que su grado de efectividad es alto, su operación no afecta de manera significativa al medio ambiente y además sus costos de operación son mínimos.
- d) El utilizar la EC dentro de una planta tratadora de agua, conlleva solamente un consumo de 6.95×10^{-4} g de Fe y 4.6 g de oxígeno por cada metro cúbico de solución procesada.

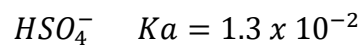
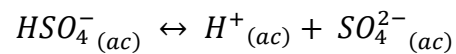
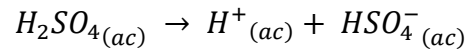
Anexo I

Cálculo del pH del agua residual industrial

Para calcular el pH del agua se utiliza lo siguiente:



$$pH = -\log C_{H^+}$$



Debido a que el ácido sulfúrico presente en el proceso es un ácido fuerte, el pH se puede obtener de la fórmula. La cantidad de ácido sulfúrico presente en la corriente acuosa se mantiene estable aún al pasar la etapa de electrocoagulación, por ello se utiliza el valor de 0.04089 kg/m³ el cual es el mismo a lo largo de todo el “tratamiento o proceso” y por consiguiente su valor aproximado es:

$$pH = 3.0$$

Anexo II

Diagramas

A continuación se presentan los diferentes diagramas de flujo obtenidos con ayuda del programa MetSim, los cuales muestran los flujos máxicos del líquido y de sólidos, la cantidad de Fe a lo largo del proceso y la cantidad de ácido sulfúrico presente en la corriente.

En la figura IX se muestran los flujos máxicos de líquido dentro de todo el proceso, no tomando en cuenta la composición de cada corriente y solo el estado de estas. Las tres primeras etapas que comprenden del proceso 2 al 4 son la remoción de sólidos, en la etapa 2 que es la remoción gruesa no existen pérdidas de líquido ya que el objetivo es eliminar aquellos desechos de gran tamaño como basura o piedras que sean arrastrados hasta la alimentación.

En las etapas 3 y 4, que corresponde a la remoción de gruesos y finos respectivamente existe una pequeña cantidad de líquido en la salida, ya que al ser la separación de finos se da una fuga casi inexistente, por ello se puede observar que el flujo a la salida de cada etapa disminuye pero esto no ocasiona problemas, sin embargo se pueden buscar otras alternativas para evitar dichas pérdidas o minimizarlas aún más.

La etapa 5 corresponde a la electrocoagulación y la 6 la separación del acuoso con el ácido que se forma en la etapa anterior y en la etapa 7 se extrae el arsénico de la corriente acuosa. Las últimas tres etapas son de aireación, desinfección y separación de sólidos orgánicos. En estas cambia el flujo debido a que algunos compuestos dentro de la corriente acuosa cambian de estado, como por ejemplo el arsénico que pasa a formar un complejo sólido y por ende ya no se encuentra disuelto.

En la figura X se presentan ahora los flujos máxicos de sólidos, como se mencionó anteriormente no se toma en cuenta la composición si no solo el estado de agregación. En la etapa 4 se da la eliminación total de los sólidos con lo cual al entrar a la etapa 5 el flujo de solidos es cero. Esto es debido a que en la electrocoagulación el arsénico pasa a formar un complejo solido junto con el Fe que será eliminado en la etapa 6 y por ello en las siguientes etapas ya no existe flujo de solido dentro de la corriente acuosa.

En la figura XI, este diagrama solo muestra la cantidad de ácido sulfúrico presente, la cantidad es la misma de inicio a fin de todo el proceso. En la etapa 5 donde se lleva a cabo la electrocoagulación de acuerdo a las reacciones propuestas, se da una formación de ácido sulfúrico, la cual debería de aumentar el flujo después de esta etapa. Pero este aumento no se ve reflejado en los flujos debido a que la cantidad de ácido formado es muy pequeña por lo cual el programa no lo muestra. Como se mencionó anteriormente, existen perdidas de líquido en las etapas de remoción de gruesos y finos, por lo cual en el diagrama a la salida de la etapa 3 se ve una pequeña pérdida de ácido sulfúrico.

Por último, en la figura XII se presentan las concentraciones de hierro en la etapa de electrocoagulación y en la corriente de entrada.

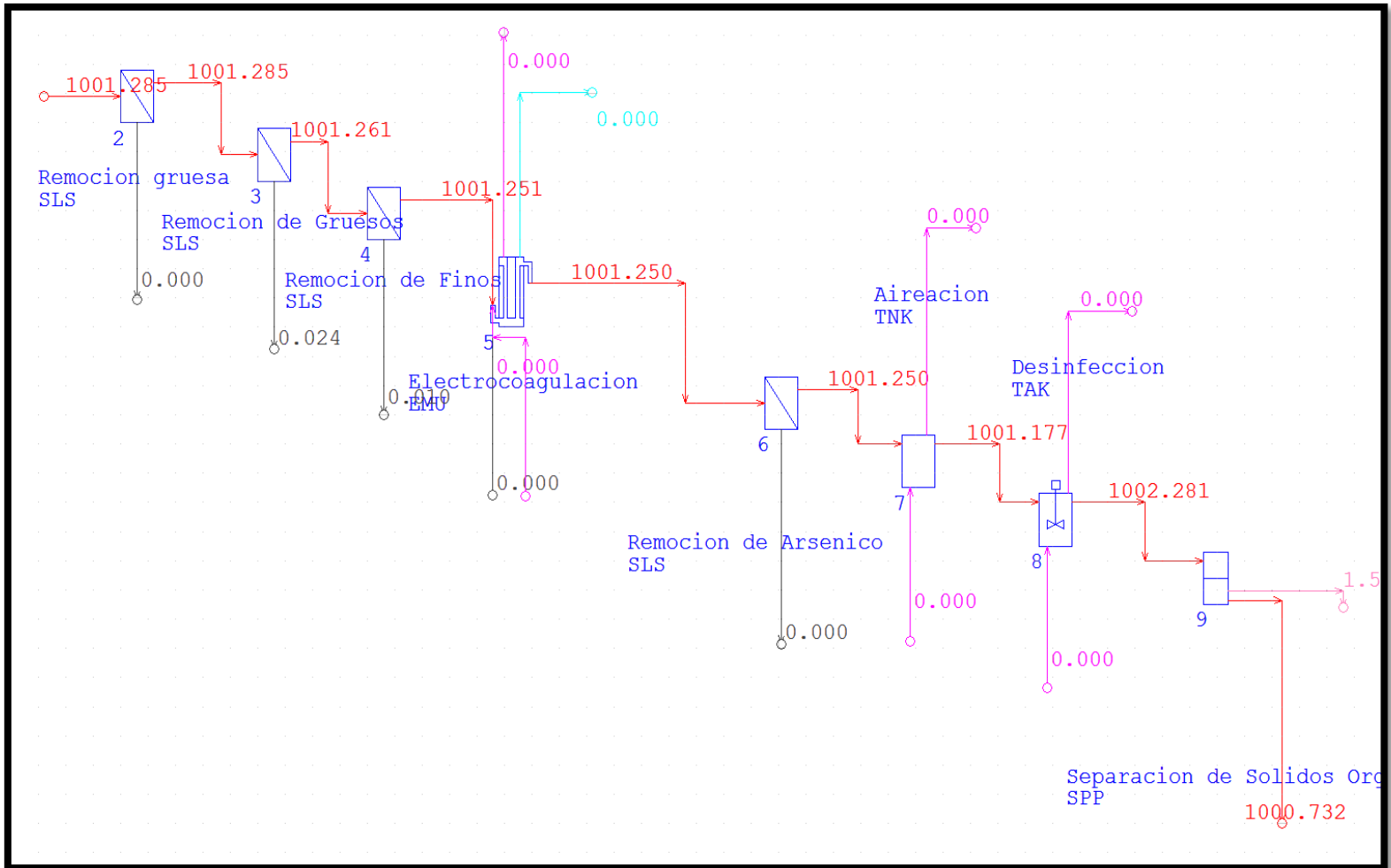


Figura IX. Diagrama que muestra los flujos másicos de líquido (kg/hr).

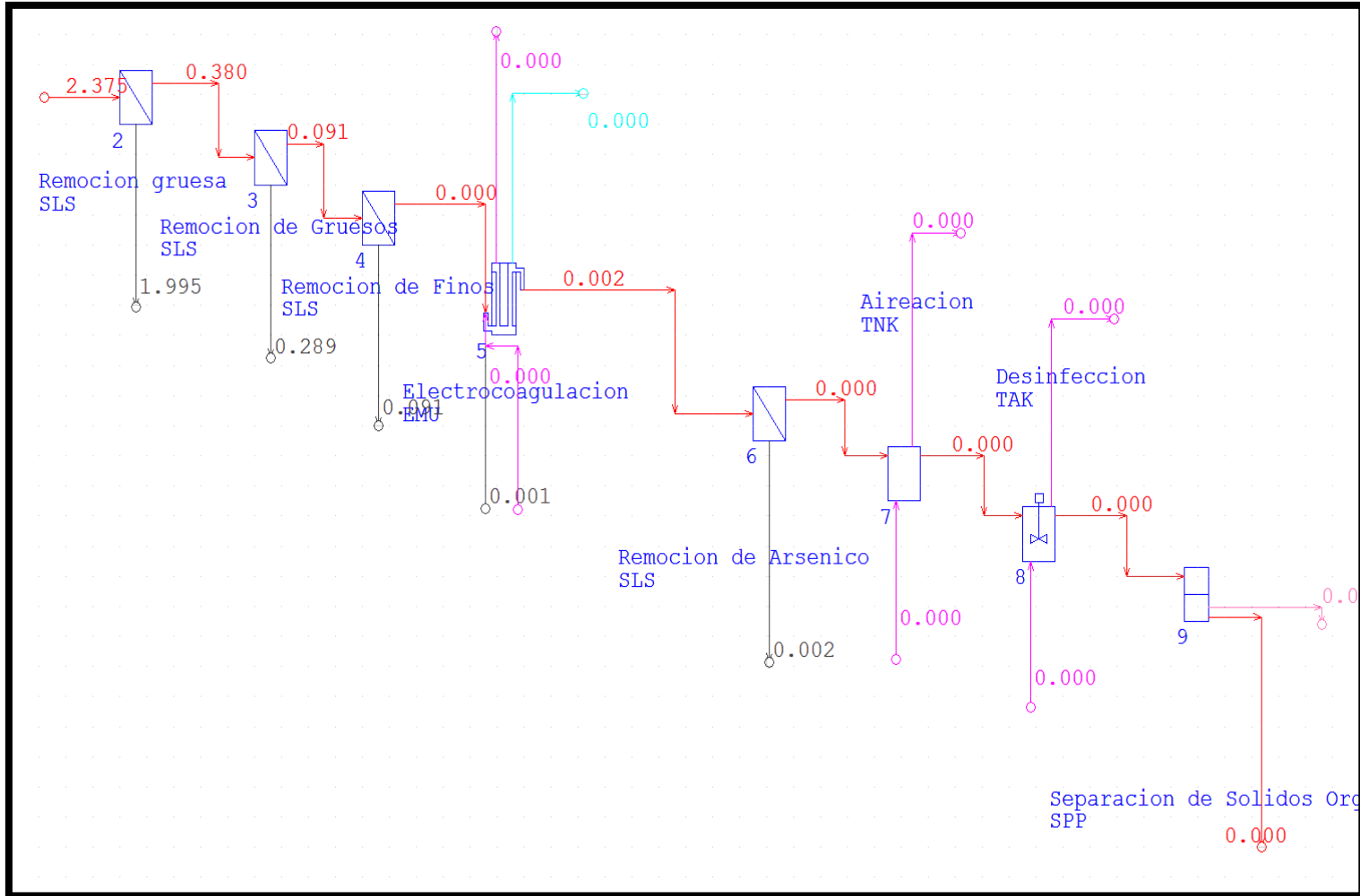


Figura X. Diagrama que muestra los flujos máxicos de sólidos (kg/hr).

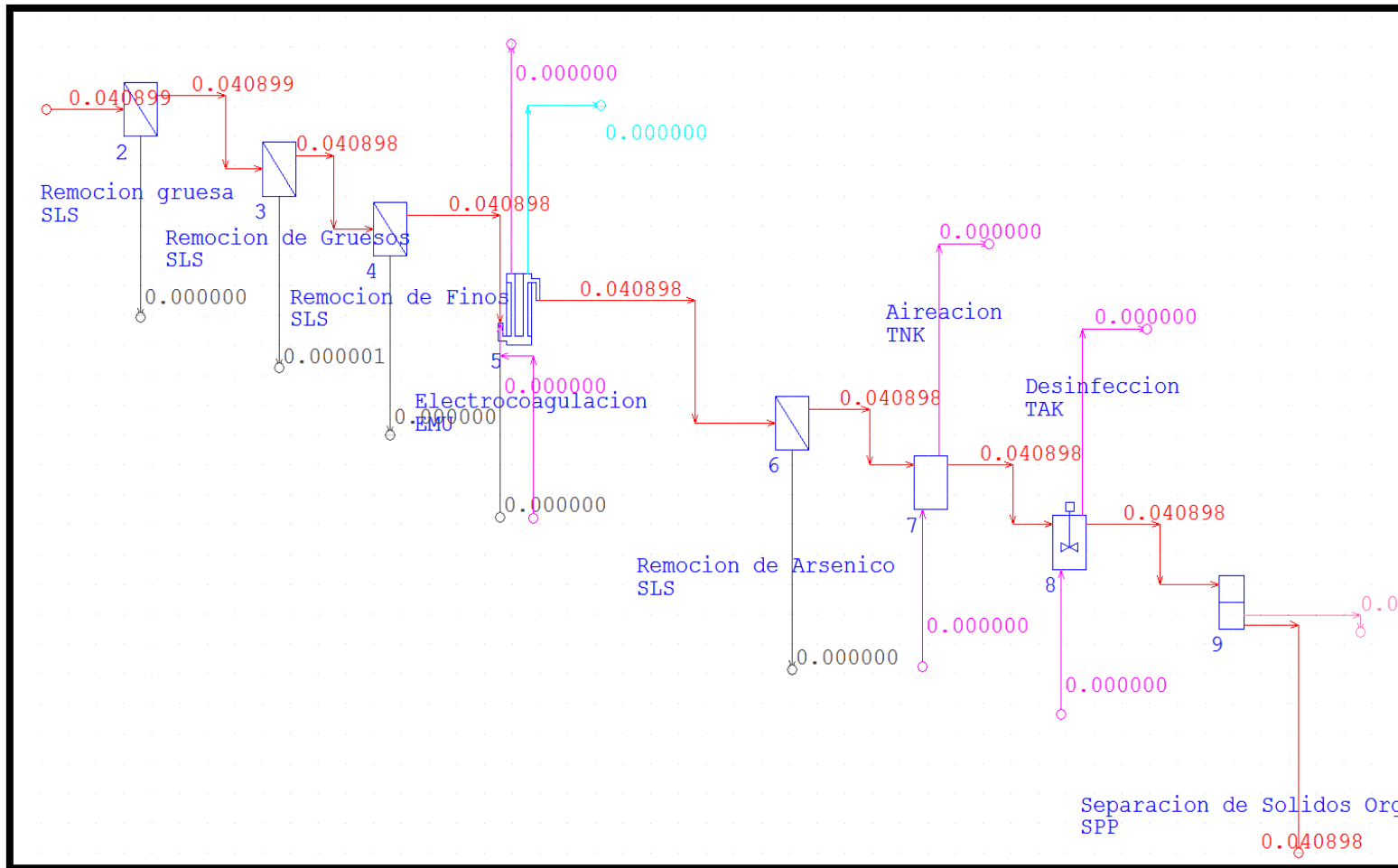


Figura XI. Diagrama que muestra los flujos máxicos de H₂SO₄ (kg/hr).

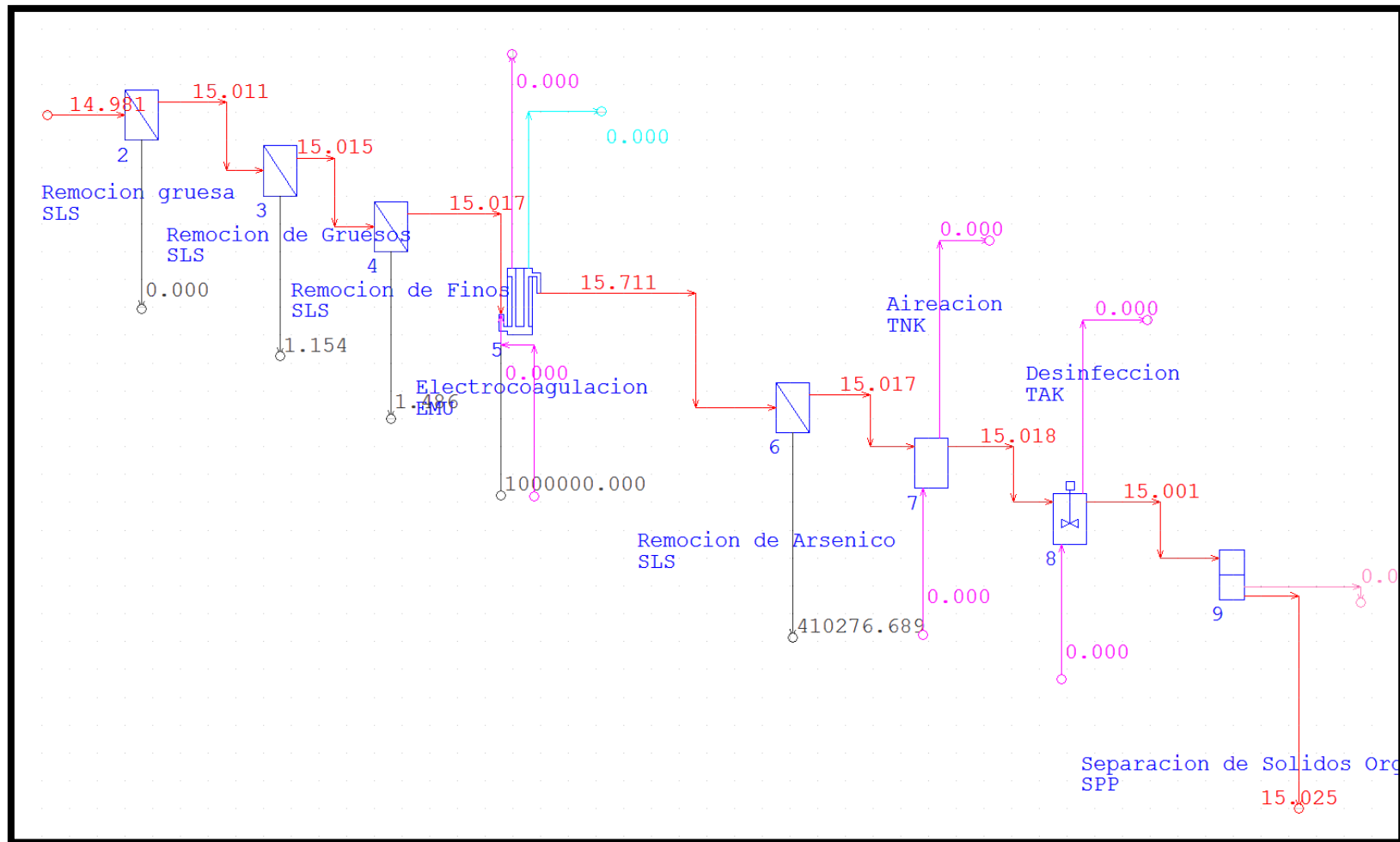


Figura XII. Diagrama que muestra las concentraciones de hierro (ppm).

Bibliografía

1. Acosta, G., Coy, C., Bourdon, A. (2013). Evaluación y regulación de parámetros en un equipo diseñado para la disminución de cromo (V), provenientes de la industria de recubrimientos galvánicos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23, 107-116.
2. American Cancer Society. Arsenic and Cancer Risk <http://www.cancer.org/cancer/cancercauses/othercarcinogens/intheworkplace/arsenic>
3. Arango, R. Álvaro. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Artículo de Revisión. *Lasallista de Investigación*. Vol. 2, No. 1.
4. Armietta, M., Aurora. (2010) Arsénico en México: Origen e implicaciones ambientales. Instituto de Geofísica, UNAM.
5. Armienta, M. A., Rodríguez, R. (1999). Arsénico en el Valle de Zimapán Hidalgo. Instituto de Geofísica. UNAM.
6. Arreguín Cortés, F. I., Chávez Guillén, R., Soto Navarro, P. R. (2014) Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México. *Conagua. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
7. Belda, F. C., Grande, U. E. (2009). Los modelos de simulación: Una herramienta multidisciplinar de investigación. *Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid*.
8. Bissen, Monique y Frimmel, H. Fritz. (2003). Arsenic. Part II: Oxidation of Arsenic and its Removal in Water Treatment. *Acta Hydrochim*. Vol. 31.
9. Cand. Dr. María del Refugio González Sandoval. (2010). Tesis "Procesos de Oxidación de Sulfuros en una Presa de Jales".
10. Cervantes, J., Francisco. (2010). Tratamiento Anaerobio de las Aguas Residuales en México. *CONCYTEG*. Vol. 5.
11. Centro Virtual de Información del Agua. (2004) *Agua.Org.mx* <http://www.agua.org.mx/el-agua/agua-en-el-planeta/>

12. Chabalina, L. (2002). Propuesta de tecnología para el tratamiento de residuales galvánicos. XVIII Congreso Iberoamericano de ingeniería sanitaria y ambiental. México.
13. Chávez Porras, Á., Cristancho Montenegro, D. L., & Ospina Granados, É. A. (2009). Una alternativa limpia para el tratamiento de aguas residuales galvánicas: Revisión bibliográfica. Ingenierías Universidad de Medellín, 39-50.
14. Comisión Nacional de Agua. (2013). Estadísticas del Agua en México. Edición 2013.
15. Comisión Estatal del Agua. (2013). Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados. Manual de Procedimientos.
16. Conagua, SEMANART. (2012). Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2012. México.
17. Diario Oficial de la Federación, (2000). "Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización", México.
18. Diario Oficial de la Federación. Programa Nacional Hídrico. 2014 – 2018. (2014).
19. Díaz, B., Fernando. (1996) Los residuos peligrosos en México. Evaluación del riesgo para la salud. Salud Pública de México. Vol. 38, No. 4.
20. Ducci, Jorge y De la Peña, M. Eugenia. (2013). Tratamiento de Aguas Residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo.
21. Escobar, C., Salazar, C. (2006). Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater. ELSEVIER. Vol. 81.
22. Fundes. (2003). Guía de buenas prácticas para el sector galvanotécnica. Bogotá D.C: Ministerio del Medio Ambiente y Fundes Colombia.
23. Gaceta del IMTA. (2009). La electrocoagulación (EC): una alternativa para el tratamiento de agua contaminada con arsénico. No. 21.

24. Garcia, G. Alfredo y Cienfuegos, M. Iván. (2015). Industrial wastewater treatment by electrocoagulation–electro oxidation processes powered by solar cells. ELSEVIER. Vol. 149.
25. Gastios, Evangelos, Hahladakis, N. John. (2015). Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals. ELSEVIER. Vol. 154.
26. Ghosh, D., Solanki, H., Purkait, M. K. (2008). Removal of Fe (II) from tap water by electrocoagulation technique. ELSEVIER. Vol. 155, No. 1--2.
27. Gilpavas, E. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. Dirección de Investigación y Docencia Universidad EAFIT.
28. Gomes, Jewel A. G., Daida, P., Kesmez, M., Weir, M. (2007). Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al–Fe electrode system and characterization of products. ELSEVIER. Vol. 139, No. 2.
29. Gózales, Sandoval, María del Refugio. (2008). Procesos de oxidacion en una presa de jales. UNAM.
30. Green Facts. Facts on Health and the Enviroment. Arsenic. (2001-2016) <http://www.greenfacts.org/es/arsenico/l-2/arsenic-7.htm#0>
31. Holt, Peter K., Barton, Geoffrey w., Mitchell, Cynthia A. (2005). The Future for Electrocoagulation as a Localised Water Treatment Technology. ELSEVIER. Vol. 59, No. 3.
32. Imran, Ali y Tabrez, A. Khan. (2011). Removal of Arsenic from Water by Electrocoagulation and Electrodialysis Techniques. Taylor and Francis.
33. Informe de la Situación del Medio Ambiente. SEMARNAT. (2012) Capítulo 6, Agua. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf
34. Jiménez, C. Blanca Elena. (2005). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. LIMUSA. México.

35. Kabdasli, I., Arslan-Alaton, I., Olmez-Hansi, T. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters. *Environmental Technology Reviews*. Vol.1.
36. Kobya, M., Ciftci, C., Bayramoglu, M., Sensoy, M. T. (2008). Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation. *ELSEVIER*. Vol. 60, No. 3.
37. Madhavan, K. (2001). Arsenic Removal from Industrial Effluent through Electrocoagulation. *Chem. Eng. Techno*. Vo. 24.
38. Mandal, B. K. y Suzuki, T. (2002). Arsenic round the world: a review. *ELSEVIER*. Vol. 58.
39. Metsim. The premier steady-state and dinamic process simulator. (2017).
40. Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V. M. (1999). Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. *Salud Pública de México*. Vol. 41.
41. Mohan, D. y Pittman U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—a critical review. *ELSEVIER*. Vol. 142.
42. Morales, B., & Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 20, 33-44.
43. ONU. Temas mundiales. Agua. <http://www.un.org/es/globalissues/water/> (04/11/2015)
44. Organización Mundial de la Salud. (2016) Arsénico. Nota Descriptiva. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>
45. Parga J.R., Valenzuela J. L., Munive G. T., Y Vázquez V M. (2014). Thermodynamic Study of Arsenic Removal from Freshwater by Using Electrocoagulation Process. *Scientific Research*. No. 4.
46. Programa Nacional Hídrico. 2007-2012. Gobierno Federal. SEMANART.
47. Rivera, H. Lourdes. (2008). Incidencia del gradiente de Velocidad en la Eficiencia de la Electrocoagulación para Remover Arsénico en un Reactor a Flujo Pistón. *INTERCIENCIA*. Vol. 33. No. 7.

48. Sik, E., Kobyas, M., Demirbas, E., Oncel, M. S. (2014). Removal of As V from groundwater by a new electrocoagulation reactor using Fe ball anodes optimization of operating parameters. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 56.
49. Soberanis, M. y Dominguez, A. Martin. (2011). Review of Design Variables and Operation Conditions in Electrocoagulation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10, No. 2.
50. Soto, E., Lozano, T., Barbarin, J., & Alcalá, M. (2004). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Ingenierías*, Vol. VII, No. 23.
51. Tapia, C. *Sistemas, modelos y simulación*. (2001). Universidad de Buenos Aires. Fiuba.
52. Vik, E. A., Carlson, D. A., Eikun, A. S., Gjessing, E. T. (1984). *Electrocoagulation of potable water*, *Water Res.* 18, pp. 1355–1360.
53. <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales> (2015) 21/11/2016