

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE UNA INDUSTRIA TEXTIL DEL  
CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA,  
CONTAMINADOS CON COLORANTES AZOICOS MEDIANTE UN  
PROCESO ELECTRO-FENTON**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**OSCAR DAMIÁN BALLADARES MOYANO**

**DIRECTORA: DRA. FLORINELLA MUÑOZ BISESTI**

**Quito, Agosto 2014**

© Escuela Politécnica Nacional (2014)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Oscar Damián Balladares Moyano, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Oscar Damián Balladares Moyano

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Oscar Damián Balladares Moyano, bajo mi supervisión.

---

Dra. Florinella Muñoz Bisesti  
**DIRECTORA DE PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto semilla PIS 12-25: “Tratamiento de efluentes de una industria textil del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, contaminados con colorantes azoicos, mediante el uso de procesos foto-Fenton y electro-Fenton”.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres y hermana, a quienes les debo lo que soy, mil gracias por su apoyo incondicional.

A la Dra. Florinella Muñoz, por su paciencia en la realización del presente trabajo, por compartir su conocimiento y guiarme en este largo camino.

A Cris, mi novia, por apoyarme en todo momento, por escuchar pacientemente y aconsejarme cuando fue necesario.

A mis amigos y compañeros, Esteban, July, Franklin, Andrés, Chiflo, Fausto, Pauli, Carlos, Katty, Cris y Majo, quienes han sabido sacarme una sonrisa en los momentos más difíciles.

Al Departamento de Ciencias Nucleares, por abrirme las puertas para la realización del presente trabajo, en especial a Paito, por la ayuda brindada.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Sixto y Célida, y a mi hermana Viviana.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>RESUMEN</b>	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xvi</b>
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1 Colorantes azoicos	1
1.1.1 Características y propiedades	1
1.1.2 Síntesis de colorantes azoicos	2
1.1.3 Problemas asociados al uso de colorantes azoicos	2
1.1.4 Colorantes azoicos y problemas medioambientales asociados con su uso en la industria textil del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua	3
1.1.5 Normativa ambiental vigente	5
1.2 Reacción Fenton	6
1.2.1 Historia y química	6
1.2.2 Reacción Fenton como un proceso de oxidación avanzada	9
1.2.3 Parámetros influyentes en el proceso Fenton	9
1.2.3.1 pH	10
1.2.3.2 Relación $Fe^{2+}/H_2O_2$	10
1.2.3.3 Temperatura	11
1.3 Proceso electro-Fenton	11
1.3.1 Electroquímica	11
1.3.1.1 Reacciones redox	11
1.3.1.2 Celdas electroquímicas	12
1.3.1.3 Potencial de los electrodos	13
1.3.1.4 Espontaneidad de las reacciones redox	13
1.3.1.5 Tipos de celdas electroquímicas	14
1.3.2 Electroquímica medioambiental	14
1.3.3 Oxidación electroquímica	15
1.3.3.1 Oxidación electroquímica directa	15
1.3.3.2 Oxidación electroquímica indirecta	19
1.3.4 Química del proceso electro-Fenton	22
1.3.5 Variables del proceso electro-Fenton	24
1.3.5.1 Material de los electrodos	24
1.3.5.2 Corriente eléctrica	26
1.3.5.3 Distancia entre electrodos	26
1.3.5.4 Aireación al cátodo	27
1.3.6 Cinética de degradación de colorantes azoicos en el proceso electro-Fenton	28
1.3.7 Aplicaciones	29
1.3.7.1 Herbicidas y pesticidas	30



1.3.7.2	Colorantes	30
1.3.7.3	Grasas	31
<b>2</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
2.1	Materiales y reactivos	32
2.1.1	Materiales	32
2.1.2	Reactivos	34
2.2	Caracterización del efluente	34
2.2.1	Ubicación del sitio de muestreo	34
2.2.2	Caracterización fisico-química de las muestras	35
2.3	Determinación de la intensidad de corriente eléctrica en soluciones sintéticas preparadas en laboratorio con respecto a la corriente eléctrica utilizada	35
2.3.1	Preparación de soluciones y construcción de las curvas de calibración para las soluciones sintéticas de colorantes puros	35
2.3.2	Tratamiento de las soluciones sintéticas preparadas en laboratorio en el sistema electro-Fenton	36
2.3.3	Tratamiento de la solución mezcla de colorantes en el sistema electro - Fenton	37
2.4	Determinación del tiempo de tratamiento para la muestra real que permita la disminución de los valores de DQO, DBO5, TOC y color real a valores dentro de norma	38
2.4.1	Tratamiento del efluente en modalidad batch	38
2.4.2	Tratamiento del efluente en modalidad continua	39
2.5	Diseño de una planta piloto que considere el sistema aplicado a una industria del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, para el tratamiento de un flujo de 3 m <sup>3</sup> /día.	40
2.5.1	Cálculo de los parámetros de diseño para el reactor electro Fenton	40
2.5.2	Dimensionamiento del tanque de acondicionamiento con chaqueta de calentamiento y regulación de pH	41
2.5.3	Dimensionamiento del sistema de calentamiento del efluente	41
2.5.4	Dimensionamiento de las PISCINAS de neutralización	41
2.5.5	Dimensionamiento del filtro de arena	42
2.5.6	Dimensionamiento del lecho de secado de lodos	42
2.6	Análisis de costos preliminar	42
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
3.1	Análisis físico-químico de las muestras del efluente de la empresa PAREDSUR	44
3.2	Pruebas de tratamiento para la determinación de la intensidad de	45

	corriente eléctrica en Soluciones sintéticas preparadas en laboratorio	
3.2.1	Construcción de las curvas de calibración para los colorantes puros	45
3.2.2	Tratamiento de soluciones de colorantes puros en el sistema electro-Fenton	49
3.2.3	Tratamiento de la solución mezcla de colorantes en el sistema electro-Fenton	56
3.3	Determinación del tiempo de tratamiento del efluente real para disminuir los valores de los parámetros en estudio a valores dentro de la norma ambiental vigente	58
3.3.1	Estudio en modalidad batch	58
	3.3.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO)	58
	3.3.1.2 Color real	61
	3.3.1.3 Variación del TOC, DBO5, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos	63
3.3.2	Estudio en Modalidad continua	64
	3.3.2.1 Determinación del flujo de trabajo	64
	3.3.2.2 Constatación del estado estacionario en el tratamiento en modalidad continua	67
3.4	Diseño de una planta piloto que considere el sistema aplicado a una industria del cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, para el tratamiento de un flujo de 3 m <sup>3</sup> /día	71
3.4.1	Diseño del reactor electro-Fenton	71
	3.4.1.1 Volumen total del reactor electro-Fenton a escala de laboratorio	71
	3.4.1.2 Volumen efectivo del reactor electro-Fenton a escala de laboratorio	72
	3.4.1.3 Volumen ocupado por los electrodos	72
	3.4.1.4 Volumen del reactor ocupado por el efluente	72
	3.4.1.5 Dimensionamiento del reactor electro-Fenton a escala piloto	72
3.4.2	Dimensionamiento de los electrodos	74
3.4.3	Determinación de la intensidad de corriente eléctrica necesaria para el reactor electro-Fenton a escala piloto	75
3.4.4	Dimensionamiento del tanque de acondicionamiento con chaqueta de calentamiento y de regulación de pH	75
3.4.5	Dimensionamiento del sistema de calentamiento del efluente	76
3.4.6	Dimensionamiento de las PISCINAS de neutralización	77
3.4.7	Dimensionamiento del sistema de filtrado	77
3.4.8	Dimensionamiento del lecho de secado de lodos	77
3.5	Análisis de costos preliminar	80
3.5.1	Costo de implementación del sistema electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR	80
	3.5.1.1 Costo del reactor electro-Fenton	80
	3.5.1.2 Costo de equipos complementarios	81

3.5.1.3 Capital de trabajo	81
3.5.2 Costo de tratamiento del efluente	83
<b>4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>87</b>
4.1 Conclusiones	87
4.2 Recomendaciones	89
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.1.</b>	Colorantes azoicos utilizados en la experimentación	4
<b>Tabla 1.2.</b>	Límites permisibles en descargas líquidas en cuerpos de agua dulce	6
<b>Tabla 1.3.</b>	Potencial redox para oxidantes utilizados en tratamiento de aguas	7
<b>Tabla 1.4.</b>	Poder oxidativo en medio ácido de varios materiales de ánodo usados en oxidación electroquímica	18
<b>Tabla 2.1.</b>	Parámetros fijados para el tratamiento electro-Fenton, modalidad batch, para las soluciones de colorantes preparadas en laboratorio	36
<b>Tabla 2.2.</b>	Parámetros fijados en el tratamiento electro-Fenton, modalidad batch, para el efluente real	38
<b>Tabla 2.3.</b>	Parámetros fijados para el tratamiento electro-Fenton, modalidad continua, para el efluente real	39
<b>Tabla 3.1.</b>	Análisis físico-químico de las muestras del efluente de la empresa PAREDSUR	44
<b>Tabla 3.2.</b>	Longitud de onda de máxima absorbancia ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) para los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22	46
<b>Tabla 3.3.</b>	Valores de absorbancia para diferentes concentraciones del colorante azul BRL a $\lambda=564$ nm (pH=3)	46
<b>Tabla 3.4.</b>	Valores de absorbancia para diferentes concentraciones del colorante pardo LEGL a $\lambda=418$ nm (pH=3)	47
<b>Tabla 3.5.</b>	Ecuaciones obtenidas para el cálculo de la concentración de colorante en función de la absorbancia medida para los colorantes azul BRL y pardo LEGL.	48
<b>Tabla 3.6.</b>	Resultados comparativos de la variación de concentración del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	49
<b>Tabla 3.7.</b>	Resultados comparativos de la variación de concentración del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch, a dos condiciones de corriente	50

eléctrica

<b>Tabla 3.8.</b>	Constante cinética de reacción para la degradación de los colorantes azul BRL y pardo LEGL al aplicar el proceso electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	51
<b>Tabla 3.9.</b>	Resultados comparativos de la variación del parámetro color real del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	53
<b>Tabla 3.10.</b>	Resultados comparativos de la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	54
<b>Tabla 3.11.</b>	Variación del parámetro color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton a la solución mezcla de colorantes en modalidad batch (I = 8 A y 10 A)	56
<b>Tabla 3.12.</b>	Variación de la DQO al aplicar el tratamiento electro-Fenton al efluente real en modalidad batch (I=10 A, pH=3)	59
<b>Tabla 3.13.</b>	Variación del color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton al efluente real en modalidad batch (I = 10 A, pH=3)	61
<b>Tabla 3.14.</b>	Variación de los parámetros DQO, TOC, DBO <sub>5</sub> , color real, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos al inicio del proceso y a los 9 min de tratamiento en el sistema electro-Fenton, modalidad batch (I = 10 A)	63
<b>Tabla 3.15.</b>	Variación de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 60 mL/min)	65
<b>Tabla 3.16.</b>	Disminución de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)	65
<b>Tabla 3.17.</b>	Disminución de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 85 mL/min)	66
<b>Tabla 3.18.</b>	Comportamiento de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)	68

<b>Tabla 3.19.</b>	Comportamiento del color real en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ , Flujo = $70 \text{ mL/min}$ )	68
<b>Tabla 3.20.</b>	Dimensiones del reactor electro-Fenton utilizado en la experimentación a escala de laboratorio	71
<b>Tabla 3.21.</b>	Relación de dimensiones en el reactor electro-Fenton del sistema a escala de laboratorio	73
<b>Tabla 3.22.</b>	Dimensiones del reactor electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes provenientes de la descarga de la empresa PAREDSUR	74
<b>Tabla 3.23.</b>	Dimensiones de los electrodos del reactor electro-Fenton utilizado para el tratamiento de los efluentes provenientes de la empresa PAREDSUR	74
<b>Tabla 3.24.</b>	Dimensiones del reactor electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR	75
<b>Tabla 3.25.</b>	Dimensiones del tanque de acondicionamiento previo al tratamiento electro-Fenton	76
<b>Tabla 3.26.</b>	Dimensiones del tanque de calentamiento de agua	76
<b>Tabla 3.27.</b>	Dimensiones de las piscinas de neutralización	77
<b>Tabla 3.28.</b>	Dimensiones del tanque de filtración y número de filtros	77
<b>Tabla 3.29.</b>	Dimensiones del lecho de secado	78
<b>Tabla 3.30.</b>	Costos de implementación física del reactor electro-Fenton	80
<b>Tabla 3.31.</b>	Costo de los electrodos para el reactor electro-Fenton	81
<b>Tabla 3.32.</b>	Costos de implementación de equipos complementarios	82
<b>Tabla 3.33.</b>	Costos del capital de trabajo	83
<b>Tabla 3.34.</b>	Detalle de costos de los activos fijos del sistema de tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR (Duración del proyecto = 10 años)	84
<b>Tabla 3.35.</b>	Detalle de costos del capital de trabajo del sistema de tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR	85
<b>Tabla 3.36</b>	Detalle de costos de implementación del sistema de	85

tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR

<b>Tabla AI.1</b>	Selección de la muestra de análisis de DBO <sub>5</sub>	102
<b>Tabla AII.1</b>	Variación de la concentración del colorante azul BRL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad Batch, corriente de 8 A	106
<b>Tabla AII.2</b>	Variación de la concentración del colorante azul BRL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch, corriente de 10 A	107
<b>Tabla AII.3</b>	Variación de la concentración del colorante pardo LEGL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch, corriente de 8 A	108
<b>Tabla AII.4</b>	Variación de la concentración del colorante pardo LEGL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch, corriente de 10 A	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.1.</b>	Anaranjado de metilo	1
<b>Figura 1.2.</b>	Estructura molecular del colorante azul BRL ( $C_{34}H_{28}N_6O_{16}S_4$ )	4
<b>Figura 1.3.</b>	Estructura molecular del colorante pardo LEGL ( $C_{18}H_{11}CuN_6NaO_8S$ )	5
<b>Figura 1.4.</b>	Estructura molecular del colorante negro 22 ( $C_{44}H_{32}N_{13}Na_3O_{11}S_3$ )	5
<b>Figura 1.5.</b>	Celda electroquímica	12
<b>Figura 1.6.</b>	Esquema de la oxidación electroquímica directa de contaminantes	16
<b>Figura 1.7.</b>	Esquema del proceso de oxidación electroquímica de compuestos orgánicos en ánodos “activos” y “no activos” por la reacción de transferencia de oxígeno electroquímica	18
<b>Figura 1.8.</b>	Esquema de la oxidación electroquímica indirecta de contaminantes	19
<b>Figura 1.9.</b>	Esquema del proceso de electrocloración en función del material del electrodo de trabajo	20
<b>Figura 1.10.</b>	Reacciones electroquímicas presentes en el proceso electro-Fenton	23
<b>Figura 1.11.</b>	Sistema de burbujeo de oxígeno hacia el cátodo en un sistema electro-Fenton	27
<b>Figura 1.12.</b>	Esquema de un electrodo de difusión gaseoso (GDE)	28
<b>Figura 2.1.</b>	Esquema del sistema electro-Fenton a escala de laboratorio, empleado para el tratamiento	32
<b>Figura 2.2</b>	Vista superior reactor electro-Fenton a escala de laboratorio	33
<b>Figura 3.1.</b>	Curva de calibración espectrofotométrica para el colorante azul BRL ( $\lambda=564$ nm, pH=3)	47



<b>Figura 3.2</b>	Curva de calibración espectrofotométrica para el colorante pardo LEGL ( $\lambda = 418 \text{ nm}$ , $\text{pH}=3$ )	48
<b>Figura 3.3.</b>	Degradación del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica. Recuadro: Linealización de los datos	50
<b>Figura 3.4.</b>	Degradación del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica. Recuadro: Linealización de los datos	51
<b>Figura 3.5.</b>	Variación del parámetro color real del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	54
<b>Figura 3.6.</b>	Variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica	55
<b>Figura 3.7.</b>	Comportamiento del parámetro color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a la solución mezcla de los colorantes azul BRL y pardo LEGL ( $I= 8 \text{ A}$ y $10 \text{ A}$ )	57
<b>Figura 3.8.</b>	Disminución de la DQO en el efluente real en un tratamiento electro-Fenton en modalidad batch ( $I = 10 \text{ A}$ , $\text{pH}=3$ )	59
<b>Figura 3.9.</b>	Disminución del color real en el efluente en un tratamiento electro-Fenton en modalidad batch ( $I = 10 \text{ A}$ , $\text{pH}=3$ )	62
<b>Figura 3.10.</b>	Monitoreo del parámetro DQO del efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ , Flujo = 60, 70 y 85 mL/min)	66
<b>Figura 3.11.</b>	Monitoreo de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ , Flujo = 70 mL/min)	69
<b>Figura 3.12.</b>	Monitoreo del parámetro color real en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ , Flujo = 70 mL/min)	69
<b>Figura 3.13.</b>	Vista en planta del sistema de tratamiento de los	79

efluentes de la empresa PAREDSUR

<b>Figura AIII.1.</b>	Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la degradación del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	110
<b>Figura AIII.2.</b>	Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la degradación del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	111
<b>Figura AIII.3.</b>	Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica sobre la variación del parámetro color real del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	111
<b>Figura AIII.4.</b>	Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica sobre la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	112
<b>Figura AIII.5.</b>	Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento para la degradación del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	112
<b>Figura AIII.6.</b>	Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento para la degradación del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	113
<b>Figura AIII.7.</b>	Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento sobre la variación del parámetro color real del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	113
<b>Figura AIII.8.</b>	Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento sobre la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)	114
<b>Figura AIII.9</b>	Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento para la remoción del color real de la solución mezcla de colorantes en el proceso electro-Fenton (I=10 A)	114
<b>Figura AIII.10</b>	Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la remoción del color real de la solución mezcla de colorantes en el proceso electro-Fenton (I= 8 A y 10 A)	115
<b>Figura AIII.11</b>	Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton (I = 10 A)	115
<b>Figura AIII.12</b>	Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento	116

para la disminución del color real del efluente real en el proceso electro-Fenton ( $I = 10 \text{ A}$ )

<b>Figura AIII.13</b>	Gráfico de medias del efecto del flujo de trabajo para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ )	116
<b>Figura AIII.14</b>	Gráfico de medias del efecto del volumen de efluente tratado para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ )	117
<b>Figura AIII.15</b>	Gráfico de medias del efecto del volumen de efluente tratado para la disminución del color real del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ )	118

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b>	
Métodos utilizados en el análisis físico-químico de los efluentes tratados	101
<b>ANEXO II</b>	
Resultados obtenidos para el tratamiento de los colorantes puros en el sistema electro-Fenton	106
<b>ANEXO III</b>	
Análisis estadístico de los resultados obtenidos	110
<b>ANEXO IV</b>	
Cálculos para el dimensionamiento del reactor electro-Fenton	119
<b>ANEXO V</b>	
Cálculos para el dimensionamiento de los equipos complementarios del sistema de tratamiento de efluentes	125

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar las condiciones más apropiadas para el tratamiento de los efluentes provenientes de una empresa textil ubicada en el cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, contaminados con colorantes azoicos, mediante el uso de un proceso electro-Fenton. La investigación buscó reducir los valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, TOC, color real, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos de la muestra a valores aceptables dentro de la norma ambiental vigente. Se estudió la influencia de la corriente eléctrica en la degradación de los colorantes puros y se determinó el tiempo de residencia y flujo de trabajo para el tratamiento del efluente.

Se prepararon soluciones sintéticas de los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22 y la combinación de ellos, que se trataron en el sistema electro-Fenton a 8 A y 10 A de corriente eléctrica. Se trabajó a condiciones fijas de pH (3,0), dosis de sulfato ferroso (0,56 mmol·L<sup>-1</sup>) y distancia entre electrodos (0,5 cm). Se midió la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de cada muestra para constatar la degradación de los colorantes. Las soluciones se trataron con la finalidad de determinar el valor de la corriente eléctrica de trabajo más adecuado para el efluente real. Los mejores resultados se obtuvieron con 10 A de corriente eléctrica.

Se procedió a tratar el efluente real en modalidad batch. Las condiciones de trabajo fueron las mismas que las utilizadas para los colorantes puros. Se determinó un tiempo de residencia en el reactor de 9 min, el cual permitió la disminución de los valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, TOC, color real, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos a valores dentro de la norma TULSMA.

Finalmente, se trató el efluente real en modalidad continua. Se trabajó a tres diferentes flujos (60, 70 y 85 mL·min<sup>-1</sup>), con los cuales se obtuvieron tiempos de residencia aproximados al valor encontrado en las condiciones batch. Se determinó la disminución de la DQO y del color real. Se realizó un análisis de

varianza simple y se determinó que el flujo que permitió alcanzar la mayor disminución de la DQO fue el de  $70 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Se diseñó un proceso básico electro-Fenton para el tratamiento de un flujo de efluente de  $3 \text{ m}^3/\text{día}$ , que consta de un reactor electro-Fenton de 71 L de capacidad, un filtro de arena, dos piscinas de neutralización, una marmita que provee el agua para el calentamiento del efluente y un lecho de secado para los lodos provenientes del proceso. El costo total aproximado de implementación de este proceso fue de 39 340 USD en activos fijos, 124 838,40 USD para el capital de trabajo y un costo global de 164 178,40 USD para un proyecto a 10 años. El montaje del sistema electro-Fenton en función del volumen tratado tuvo un costo de 14,39 USD/  $\text{m}^3$  tratado.

## INTRODUCCIÓN

Los efluentes de la industria textil de fabricación de prendas de mezclilla se consideran difíciles de tratar por la alta carga no biodegradable que presentan, por lo que tratamientos biológicos y tradicionales resultan ineficientes para alcanzar valores aceptables en los parámetros de descarga según la normativa ambiental (Pineda y Jara, 2010, p.103).

La principal dificultad con este tipo de efluentes puede estar asociada con la presencia de colorantes azoicos (Hildenbrand, Winfried, Wodarz, Kimmel, y Dartsch, 1999, p. 52). Estos compuestos presentan algunos problemas ambientales, puesto que al degradarse en el agua pueden generar aminas aromáticas, peligrosas en caso de ingestión. Por esta razón, el uso de algunos de estos colorantes ha sido cuestionado por la Comunidad Europea (Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos, 2006, p.1).

Una alternativa para el tratamiento de aguas de este tipo son los procesos de oxidación avanzada (POA's), que se caracterizan por la generación de radicales libres. Entre ellos se encuentran los procesos Fenton, que involucran la reacción de  $Fe^{2+}$  con  $H_2O_2$ , como una fuente de radicales hidroxilo, que se encuentran en el grupo de los agentes oxidantes más fuertes (Von Sonntag, 2006, p.189).

Una variación al proceso original es el denominado electro-Fenton, el mismo que se lleva a cabo dentro de una celda electroquímica, en la que se alojan dos electrodos con una alimentación de corriente continua, en medio ácido y con suministro de iones ferrosos. El principal objetivo de estas implementaciones es la generación de  $H_2O_2$  "in situ".

Pelileo, cantón localizado en la provincia de Tungurahua, Ecuador, se caracteriza por su actividad textil. Esta actividad se relaciona especialmente con la confección y el teñido de prendas de mezclilla. Por lo general, los efluentes generados en las industrias del cantón son desechados directamente a cuerpos de agua dulce como el río Patate, el mismo que sirve como fuente de agua para regadío de

cultivos agrícolas y alimentación de animales e incluso de seres humanos (Municipio de Pelileo, 2014, p. 5). Entre los principales contaminantes de estos efluentes se encuentran ciertos colorantes azoicos utilizados en el proceso de teñido.

Por esta razón, la presente investigación estudió la posibilidad de aplicar un proceso electro-Fenton para el tratamiento de este tipo de efluentes en el cantón Pelileo. Se utilizaron las aguas provenientes de la empresa PAREDSUR para establecer la eficiencia del método propuesto.



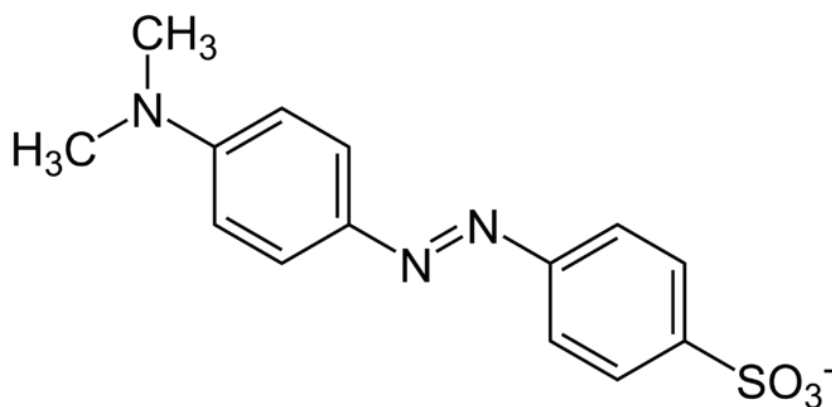
# 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 COLORANTES AZOICOS

### 1.1.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Los colorantes azoicos son un grupo de compuestos sintetizados para fines comerciales y se caracterizan por la presencia de grupos azoicos (-N=N-) enlazados por ambos lados con átomos de carbono con orbitales  $sp^2$ , generalmente en forma de anillos bencénicos (Denisov, 2003, p. 303).

Por su facilidad de preparación, los colorantes azoicos son los más usados en la industria textil, aunque sus aplicaciones se extienden a la industria farmacéutica y alimenticia. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de un compuesto azoico: el anaranjado de metilo (López, Moreira, Feijoo y Lema, 2007, p. 561; Zollinger, 2003, p. 165).



**Figura 1.1** Anaranjado de metilo  
(Ege, 2004, p. 1 025)

Los grupos azoicos, además de ser la característica estructural de este tipo de colorantes, funcionan como grupos cromóforos, puesto que generalmente se encuentran unidos a anillos aromáticos, lo cual determina un sistema de dobles enlaces conjugados que absorbe la radiación en la región ultra violeta y visible (Bermejo, Valiente y Jaramillo, 2003, p. 379).

Los compuestos azoicos aromáticos son mucho más estables que sus similares alifáticos y su descomposición por calor se produce a temperaturas superiores a los 300 °C. Entre las características más relevantes de estos compuestos se pueden nombrar su alta intensidad de color y su resistencia a la luz, el calor, el agua y los solventes, una vez aplicados al textil (Christie, 2001, p. 46).

### **1.1.2 SÍNTESIS DE COLORANTES AZOICOS**

La síntesis en laboratorio de compuestos azoicos se puede resumir en una reacción en dos pasos. Se sintetiza un ion aromático diazotado a partir de un derivado de la anilina y, posteriormente, este derivado reacciona con otro compuesto aromático. Según la naturaleza y complejidad de los derivados de la anilina y el derivado aromático que se utilice, el colorante puede tomar colores amarillo, rojo, naranja, pardo o azul (Gung y Taylor, 2004, p. 1630; Zollinger, 2003, p. 166).

### **1.1.3 PROBLEMAS ASOCIADOS AL USO DE COLORANTES AZOICOS**

A pesar de los beneficios que los colorantes azoicos brindan a la industria textil, existe controversia en cuanto a los problemas medioambientales que se producen debido a su uso. Entre ellos se encuentra la coloración provocada en los efluentes, cuando estos colorantes son arrojados a cuerpos acuosos, puesto que su presencia puede disminuir la cantidad de luz que reciben bacterias y plantas y como consecuencia interferir en su desarrollo (Khan y Banerjee, 2010, p. 75).

Se conoce además que, generalmente, los compuestos formados, luego de degradar el enlace azoico, corresponden a derivados aromáticos, en algunos casos aminas aromáticas, que podrían tener efectos cancerígenos sobre el ser humano. Por esta razón, se han tomado medidas para evitar el uso de los compuestos azoicos. Este es el caso de la Unión Europea, que en el año 2002, planteó una prohibición expresa de ciertos compuestos de este tipo utilizados en

la industria textil. Esta no es la única normativa que se ha planteado en este sentido, ya que en 1994, el gobierno alemán prohibió el uso de algunos colorantes azoicos para la producción de bienes de consumo masivo. Sin embargo, medidas similares no han sido consideradas en la normativa ambiental ecuatoriana ni en sus similares de la región (Hildenbrand, Winfried, Wodarz, Kimmel, y Dartsch, 1999, p. M52; Khan y Banerjee, 2010, p. 75; Puntener y Page, 2004, p.1).

Algunos compuestos azoicos son sulfonados para conseguir características específicas. Este tipo de colorantes también forma aminas aromáticas en el proceso de degradación. Sin embargo, Chung y Cerniglia (1992, p. 202) realizaron un estudio en el que demuestran que estos compuestos tienen un bajo o nulo efecto cancerígeno sobre las células, a diferencia de sus pares desulfonados. Probablemente, esto se debe atribuir a la carga eléctrica que presentan, ya que evita la activación metabólica en las células. Por las razones expuestas, es notorio que se debe evitar en lo posible el ingreso de colorantes azoicos o sus derivados a cuerpos de agua de cualquier tipo.

#### **1.1.4 COLORANTES AZOICOS Y PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS CON SU USO EN LA INDUSTRIA TEXTIL DEL CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**

El cantón Pelileo se encuentra ubicado en la provincia de Tungurahua, a 19,7 km de Ambato, su extensión es de 202,4 km<sup>2</sup> y su población bordea los 50 000 habitantes. La segunda actividad económica más importante del cantón, detrás de la producción agrícola, corresponde a la producción textil, especialmente a la confección de prendas de mezclilla. Sin embargo, los problemas asociados a las industrias textiles se han incrementado a medida que la actividad económica se ha desarrollado en el cantón. Los efluentes que las industrias generan son desechados, sin previo tratamiento, a cuerpos de agua dulce como el río Patate, el mismo que sirve como fuente de agua para el regadío de cultivos destinados para el consumo humano. Un problema con este tipo de aguas es la presencia de colorantes azoicos, que son utilizados en el proceso de tinción de prendas. En los

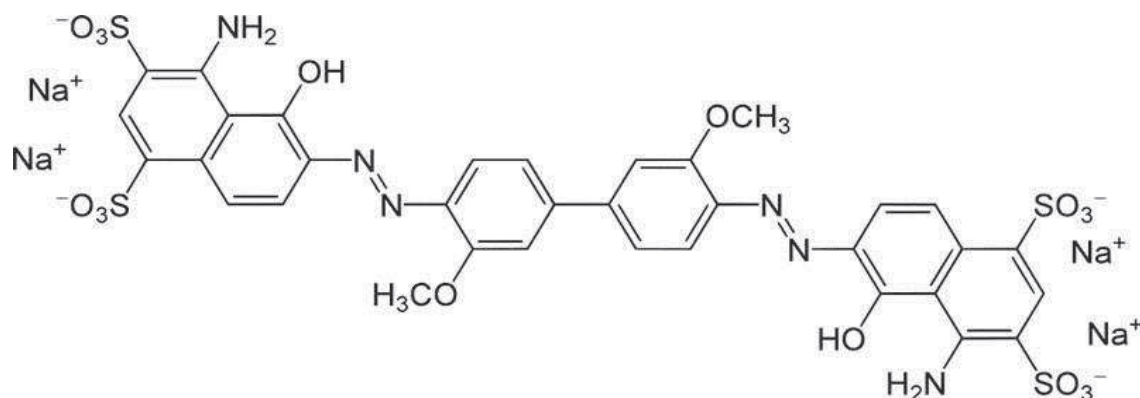
últimos años, se ha extendido el uso de este tipo de colorantes por múltiples factores, entre ellos su fácil aplicación a las fibras textiles, pues son compuestos solubles en agua y de excelente afinidad con la fibra celulósica (Municipio de Pelileo, 2014, pp. 2,6; Christie, 2001, p. 46).

Se han identificado tres colorantes comerciales específicos ampliamente utilizados en las empresas textiles del sector de Pelileo. Su nombre comercial y fórmula condensada se detallan en la Tabla 1.1.

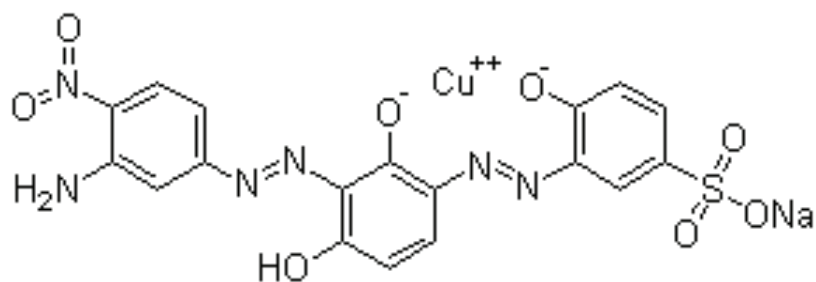
**Tabla 1.1** Colorantes azoicos utilizados en la experimentación

Nombre comercial	Fórmula condensada
Azul BRL	$C_{34}H_{28}N_6O_{16}S_4$
Pardo LEGL	$C_{18}H_{11}CuN_6NaO_8S$
Negro 22	$C_{44}H_{32}N_{13}Na_3O_{11}S_3$

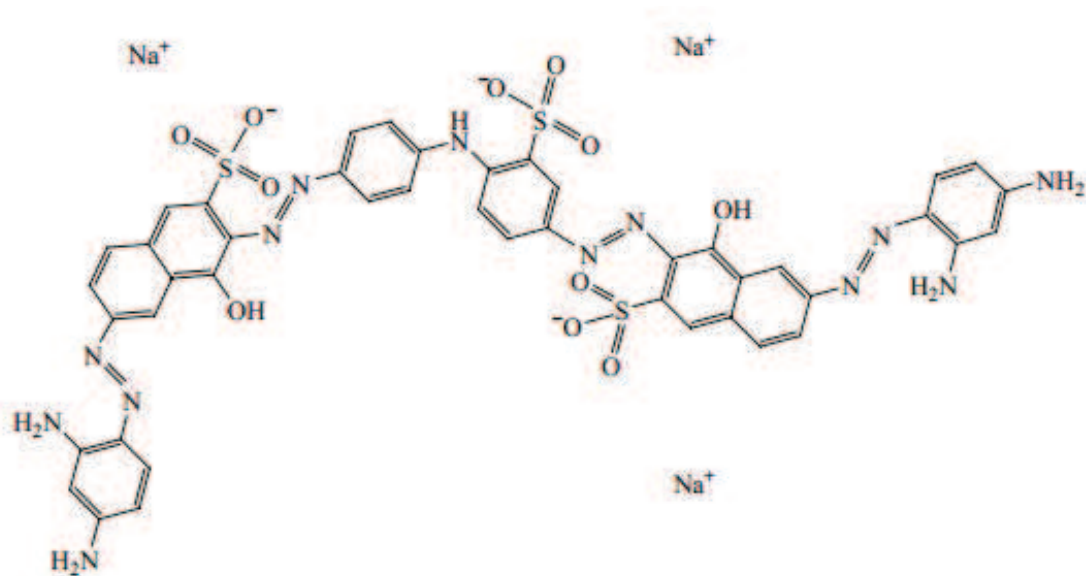
En las Figuras 1.2, 1.3 y 1.4, se presentan las estructuras de los colorantes utilizados en la presente investigación. Se puede observar la presencia de anillos aromáticos y grupos sulfonados, comunes entre los compuestos de este tipo. Además, se puede mencionar la presencia de dos grupos azoicos, en el caso de los colorantes azul BRL y pardo LEGL, y cuatro grupos azoicos en el caso del colorante negro 22.



**Figura 1.2** Estructura molecular del colorante azul BRL ( $C_{34}H_{28}N_6O_{16}S_4$ )  
(Helmenstine, 2014, p.1)



**Figura 1.3** Estructura molecular del colorante pardo LEGL ( $C_{18}H_{11}CuN_6NaO_8S$ )  
(Clearysynth, 2013, p. 2)



**Figura 1.4** Estructura molecular del colorante negro 22 ( $C_{44}H_{32}N_{13}Na_3O_{11}S_3$ )  
(Isaev, Aliev y Adamadzeiya, 2011, p. 766)

### 1.1.5 NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE

El incremento de la cantidad de industrias a nivel mundial determina que los residuos generados tengan una importancia cada vez mayor. Como consecuencia, las entidades responsables deben elaborar leyes y reglamentos que controlen, de alguna manera, la cantidad y características de los desechos que pueden ser arrojados al medioambiente. Dentro de estos contaminantes se puede mencionar a los colorantes azoicos, que representan el 70 % de la demanda mundial de tintes para empresas textiles, alimenticias, farmacéuticas, entre otras (López, Moreira, Feijoo y Lema, 2007, p. 561).

Los límites permisibles para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce, como el río Patate en la provincia de Tungurahua, se encuentran establecidos en el Texto Unificado de Legislación y Saneamiento Medioambiental (TULSMA), Anexo VI, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. En esta normativa se resumen los valores de los parámetros que el efluente debe cumplir para ser arrojado al medioambiente. La Tabla 1.2 presenta los parámetros de interés en este estudio (TULSMA, 2005, p. 331).

**Tabla 1.2** Límites permisibles en descargas líquidas en cuerpos de agua dulce

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor límite permisible</b>
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg O <sub>2</sub> /L	250
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg O <sub>2</sub> /L	100
<b>Color real</b>	Co/Pt	Inapreciable en dilución 1/20
<b>Turbidez</b>	NTU	100
<b>pH</b>	-	5-9
<b>Sólidos totales</b>	mg/L	1600

(TULSMA, 2005, p. 331)

## 1.2 REACCIÓN FENTON

### 1.2.1 HISTORIA Y QUÍMICA

Henry John Horstman Fenton, en 1894, publicó un estudio en el que describía como iones de hierro (II), en contacto con determinados agentes, producían una solución de alto poder oxidante. A esta mezcla se la denominó "Reactivo Fenton". En la actualidad su definición se limita a la mezcla en solución de peróxido de hidrógeno e iones de hierro (II) (Barbusiński, 2009, p. 103).

Las propiedades oxidantes del proceso se basan en la formación de especies altamente reactivas, capaces de degradar contaminantes. Entre ellas, el más importante es el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), que tiene un potencial de oxidación muy elevado (2,80 V) y reacciona no selectivamente con un sinnúmero de sustancias contaminantes (Jiang y Zhang, 2007, p. 1119).

La Tabla 1.3 muestra comparativamente los potenciales redox de algunos agentes oxidantes; se observa que dentro del grupo, el radical hidroxilo es el de potencial más alto (Zhou y Smith, 2002, p. 254).

**Tabla 1.3** Potencial redox para oxidantes utilizados en tratamiento de aguas

<b>Especie</b>	<b>Potencial redox (V)</b>
<b>Radical hidroxilo</b>	2,80
<b>Ozono</b>	2,07
<b>Peróxido de hidrógeno</b>	1,78
<b>Permanganato</b>	1,69
<b>Dióxido de cloro</b>	1,56
<b>Cloro</b>	1,36
<b>Oxígeno</b>	1,23

(Zhou y Smith, 2002, p.254)

El reactivo Fenton, en condiciones ácidas y con temperatura y presión apropiadas, puede alcanzar una significativa degradación de contaminantes. Algunas ventajas de la aplicación de este método se mencionan a continuación (Castells, 2012, p. 113):

- Se producen cambios en la estructura molecular de los compuestos tratados, porque se promueven oxidaciones y fragmentaciones. Esto determina un aumento en la biodegradabilidad.
- Se puede utilizar para el tratamiento de compuestos no biodegradables o refractarios que, en condiciones normales, no pueden ser sometidos a tratamientos tradicionales como el biológico.

- En general, no existe la formación de subproductos tóxicos.
- No suponen la presencia de oxidantes residuales como el cloro.

La reacción Fenton se puede resumir en la Ecuación 1.1 (Barbusiński, 2009, p. 103):



El proceso se puede llevar a cabo tanto en sistemas homogéneos como en sistemas heterogéneos, con soluciones de  $\text{Fe}^{2+}$  o en presencia de complejos ferrosos como la goetita ( $\text{FeOOH}$ ). El  $\text{Fe}^{3+}$  resultante puede reaccionar con el peróxido o el radical superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) y reducirse nuevamente; de manera que se recupera uno de los reactivos presentes y puede reaccionar mientras exista suficiente concentración del otro. Las reacciones propuestas se muestran a continuación (Mohanty y Wei, 1983, p. 171):



Las reacciones 1.1, 1.2 y 1.3 ocurren en forma cíclica hasta que el peróxido de hidrógeno se consume totalmente y, al ser el generador de radicales hidroxilo, el proceso termina (Mohanty y Wei, 1983, p. 171).

A pesar de ser un fenómeno conocido por más de un siglo, su utilización como un proceso de oxidación no inició sino hasta 1960. En la actualidad, la reacción Fenton es uno de los métodos de oxidación avanzada más efectivo para la degradación de contaminantes (Barbusiński, 2009, pp. 14-15).



## **1.2.2 REACCIÓN FENTON COMO UN PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los procesos de oxidación avanzada involucran la generación de radicales libres para la destrucción de contaminantes. El creciente interés en estos procesos se refleja en la cantidad de investigaciones llevadas a cabo en torno al tema en los últimos años. La aplicación de este grupo de técnicas se ha extendido al tratamiento de efluentes industriales, remoción de agentes patógenos, degradación de compuestos orgánicos y acondicionamiento de lodos residuales (Mohajerani, Mehrvar y Ein-Mozaffari, 2010, p. 122; Konstantinou y Albanis, 2003, p. 2; Comninellis et al., 2008, pp. 769-770).

Dentro de los procesos de oxidación avanzada, los radicales hidroxilo se pueden formar por procesos fotoquímicos y no fotoquímicos. Los procesos Fenton tradicionales se encuentran dentro del grupo de los procesos no fotoquímicos (Quiroz, Bandala y Martínez, 2011, p. 686).

## **1.2.3 PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL PROCESO FENTON**

El proceso Fenton se ve afectado por los valores que se asignan a ciertos parámetros, que modifican la velocidad y eficacia del proceso de oxidación. Dentro de estos se encuentran la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , la relación  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ , el valor de pH, la temperatura y el tiempo de reacción. La influencia de cada uno de estos factores se detalla a continuación.

### **1.2.3.1 pH**

El pH es uno de los parámetros más importantes en el proceso Fenton; se ha encontrado que la velocidad de reacción tiende a ser máxima cuando su valor está cercano a 2,9. En el rango de pH entre 2,5 y 3,0 el hierro se encuentra en su forma iónica  $\text{Fe}^{2+}$ , mientras que a valores más altos el hierro puede precipitar en

forma de hidróxidos. A un valor de pH menor a 2 se produce la formación de  $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ , especie poco reactiva con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Pignatello et al., 2006, p. 35).

### 1.2.3.2 Relación $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$

La eficacia del proceso Fenton suele estar relacionada con la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , mientras que la cinética del mismo es una función de la cantidad de hierro presente. Estas afirmaciones no son válidas para concentraciones muy altas de los reactivos, debido a que el peróxido puede reaccionar con los radicales hidroxilo, como se observa en la reacción 1.4, y disminuir la capacidad de estos para oxidar a la materia orgánica; y en el caso del hierro, se puede formar  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que es insoluble en medio acuoso (Mohanty y Wei, 1983, p. 175).



La mejor combinación de ambos reactivos siempre deberá ser estudiada, puesto que depende de factores como la naturaleza del efluente a tratar y las necesidades técnicas y económicas del proceso; es decir, las cualidades que debe presentar el efluente para su descarga y al costo en el que se puede incurrir para lograrlo.

### 1.2.3.3 Temperatura

La reacción Fenton es de naturaleza endotérmica y su velocidad aumenta cuando se incrementa la temperatura. Sin embargo, es importante mencionar que a 50 °C se produce la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, y que a la misma temperatura el hierro (II) precipita en forma de hidróxido, ya que la constante de solubilidad disminuye (Jiang y Zhang, 2007, p. 1 119).

Por las razones expuestas, el rango recomendable de trabajo suele mantenerse entre 20 y 45 °C. Este factor debe controlarse en el proceso de tratamiento,

puesto que en muchas industrias, como las textiles, se trabaja a altas temperaturas. Por ello, la implementación de ciertos sistemas Fenton y sus variaciones no necesitarían instalaciones para el calentamiento previo (Neyens y Baeyens, 2003, pp. 33-35; Torrades, Núñez, García-Hortal, y Peral, 2008, p. 124).

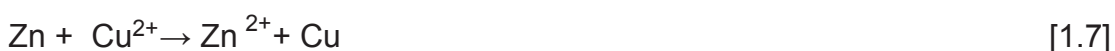
## 1.3 PROCESO ELECTRO-FENTON

### 1.3.1 ELECTROQUÍMICA

#### 1.3.1.1 Reacciones redox

Las reacciones químicas en las que se produce transferencia de electrones desde un átomo hacia otro se denominan de oxidación y reducción, o simplemente redox. (Kotz, Treichel y Weaver, 2005, p. 169).

El número de oxidación es la cantidad de electrones ganados, perdidos o que han sido compartidos por un elemento. Cualquier reacción redox se puede expresar como una suma de dos semirreacciones, que son reacciones hipotéticas de transferencia de electrones. En las ecuaciones 1.5 y 1.6 se presentan ejemplos de reacciones de reducción y oxidación respectivamente. La reacción global se muestra en la ecuación 1.7, en la que se denota como un proceso de oxidación se da simultáneamente con uno de reducción (Atkins y Jones, 2006, p. 445; Davis y Whitten, 2008, p. 132; Valenzuela, 1995, p. 535).

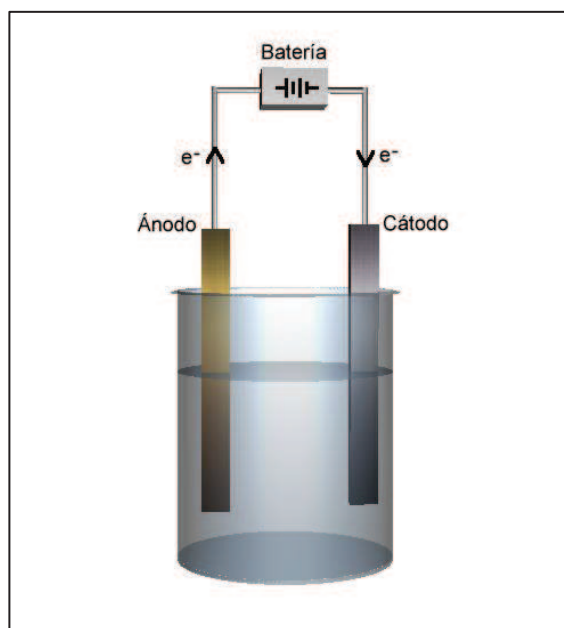


### 1.3.1.2 Celdas electroquímicas

Una celda electroquímica es un dispositivo que consta de dos electrodos en contacto con un electrolito. El electrolito es cualquier sustancia que contiene iones libres y puede comportarse como un medio conductor. Cada electrodo acompañado de su electrolito se denomina compartimento electródico o semipila, y ambos electrodos pueden compartir al electrolito. En el caso de tener electrolitos diferentes, es necesario el uso de un puente salino que permita la transmisión de iones entre los electrodos (Atkins, 2006, p. 255; Clavijo, 2002, p. 365)

Dentro de una celda electroquímica se dan los procesos de oxidación y reducción, responsables de la reacción global. La carga cedida en la oxidación en un electrodo es transportada a través del electrolito o puente salino e ingresa nuevamente en el otro electrodo, donde es utilizada para la semirreacción de reducción (Atkins, 2006, p. 255).

Se denomina ánodo al electrodo donde se da la oxidación y cátodo al electrodo donde se produce la reducción. La Figura 1.5 muestra una celda electroquímica y sus electrodos (Clavijo, 2002, p. 366).



**Figura 1.5.** Celda electroquímica

### 1.3.1.3 Potencial de los electrodos

El potencial de un electrodo es una propiedad intrínseca de cada material y representa, de forma cuantitativa, la facilidad que tiene ese electrodo para producir una semirreacción de oxidación o reducción. La magnitud de este parámetro depende de factores como la temperatura y la presión. Además, este valor se determina con referencia a un electrodo de potencial conocido, que en la mayoría de casos corresponde al electrodo de hidrógeno, al cual se le asigna el valor convencional de cero, para la comparación con el electrodo de estudio. (Skoog y West, 1986, p. 371).

### 1.3.1.4 Espontaneidad de las reacciones redox

Las celdas electroquímicas también se pueden caracterizar por un parámetro llamado potencial estándar. Este valor se obtiene al sumar los potenciales estándar de los electrodos que conforman la celda. Este potencial estándar se relaciona con la energía del proceso mediante la Ecuación 1.8 (Chang, 2002, pp. 771, 777).

$$\Delta G = - nFE^{\circ} \quad [1.8]$$

Donde:

n: Número de equivalentes de electrones

F: constante de Faraday = 96 485,3 C

Al multiplicar la carga y el potencial se obtiene la energía eléctrica máxima que se puede obtener de la celda, que corresponde al trabajo eléctrico. El cambio de energía libre de Gibbs se relaciona con el trabajo útil de una reacción. Para un proceso espontáneo, la variación de la energía libre de Gibbs es negativa, de tal manera que el potencial de la celda debe ser positivo. En el caso contrario, para

reacciones no espontáneas, el potencial estándar de la celda será negativo (Albarrán, 2008, p. 337).

### 1.3.1.5 Tipos de celdas electroquímicas

Existen dos tipos de celdas electroquímicas, cuyas características se detallan a continuación:

- **Celdas galvánicas:** Se denominan también pilas, baterías, fuentes o acumuladores. Son celdas electroquímicas en las que las reacciones redox se dan de manera espontánea. El cátodo tiene un potencial superior al del ánodo; las especies que sufren la reducción toman electrones del cátodo y dejan en él una carga positiva. Por otro lado, en el ánodo, la oxidación lleva a una transferencia de electrones hacia el electrodo y se origina una carga negativa; esto produce un flujo neto de corriente (Atkins , 2006, p. 258).
- **Celdas electrolíticas:** Son celdas electroquímicas donde ocurren reacciones no espontáneas, por ello requieren energía en forma de voltaje para que se lleven a cabo. En el cátodo debe existir un suministro de electrones para producir la reducción; estos electrones deben ser enviados hacia el ánodo para producir la oxidación (Atkins, 2006, p. 258).

### 1.3.2 ELECTROQUÍMICA MEDIOAMBIENTAL

La electroquímica medioambiental estudia los procesos de detección, cuantificación y tratamiento de contaminantes orgánicos, mediante el uso de técnicas electroquímicas. Algunas aplicaciones, en el área ambiental, se mencionan a continuación (Rajeshwar e Ibanez, 1997, p. 15; Juttner, Galla y Schmieder, 2000, p. 2575, 2576).

- Tratamiento de efluentes líquidos mediante procesos de oxidación electroquímica, directa e indirecta.
- Detección de la contaminación, en sólidos, líquidos y gases, mediante sensores electroquímicos.
- Recuperación de metales mediante electrodeposición.
- Generación electroquímica de hidrógeno como combustible alternativo.

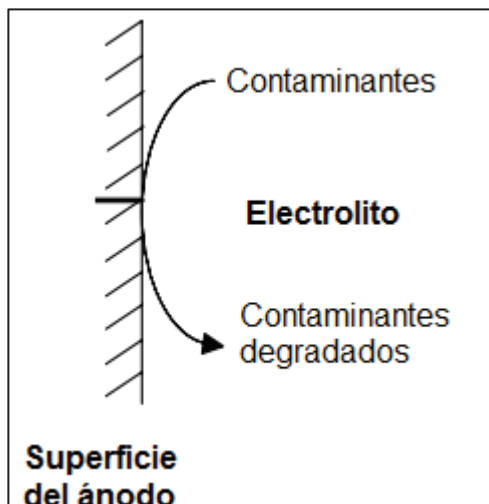
### **1.3.3 OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA**

En la actualidad, una de las aplicaciones de mayor importancia de la electroquímica, en el área medioambiental, se refiere a la generación de especies oxidantes usadas para la degradación de contaminantes en aguas residuales, este proceso se denomina oxidación electroquímica (Nordin, Mohd Amir, Riyanto y Othman, 2013, p. 11404)

Los procesos de oxidación electroquímica se pueden clasificar en directos e indirectos, las principales características de cada uno se mencionan a continuación (Anglada, Urriaga y Ortiz, 2009, p. 1748).

#### **1.3.3.1 Oxidación electroquímica directa**

La degradación de los contaminantes se lleva a cabo directamente sobre la superficie del ánodo, debido a la generación de especies altamente oxidantes. La eficiencia del proceso depende de dos factores, el primero de ellos es la velocidad de transferencia de masa en la superficie del ánodo y el segundo es la velocidad de transferencia de los electrones, que se afecta directamente por la intensidad de corriente eléctrica aplicada. Un esquema se presenta en la Figura 1.6 (Anglada, Urriaga y Ortiz, 2009, p. 1748).



**Figura 1.6** Esquema de la oxidación electroquímica directa de contaminantes  
(Anglada, Urtiaga y Ortiz, 2009, p. 1748)

Se pueden mencionar dos mecanismos de reacción sobre la superficie del ánodo, el primero de ellos involucra la oxidación de los compuestos, solo en la reacción con el electrón removido. Este proceso implica la oxidación parcial de los contaminantes, por lo que un tratamiento posterior es necesario, la reacción 1.9 describe el proceso mencionado (Anglada, Urtiaga y Ortiz, 2009, p. 1748).



El segundo mecanismo es el de mayor importancia y que, generalmente, se conoce como oxidación electroquímica. En este proceso se forman radicales hidroxilos fisiadsorbidos sobre la superficie del ánodo, como se muestra en la reacción 1.10 (Comninellis, 1994, p. 1858).



Las siguientes etapas de reacción dependen de la naturaleza del material que se utilice como ánodo. Comninellis (1994) señala que, de forma general, se pueden nombrar dos tipos de electrodos, activos y pasivos. Los electrodos denominados activos tienen un potencial de formación superior al del  $O_2$  ( $E^\circ = 1,23 \text{ V}$ ), esta propiedad induce a que los radicales hidroxilo fisiadsorbidos reaccionen



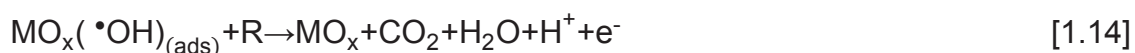
nuevamente como se señala en la ecuación 1.11 Como productos se obtienen radicales superóxido quimiadsorbidos, menos reactivos que los radicales hidroxilos. Algunos ejemplos de electrodos activos son el Pt, RuO<sub>2</sub> o IrO<sub>2</sub> (pp. 1858, 1859).



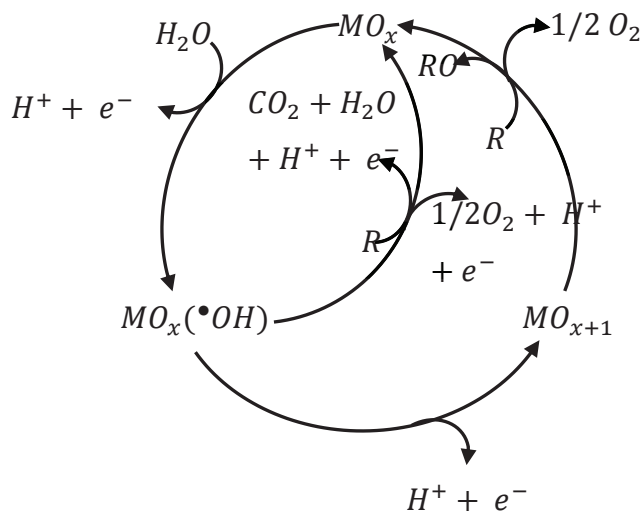
La formación de radicales superóxido produce que la degradación de contaminantes sea más lenta, sin embargo son especies reactivas, que pueden degradar contaminantes o descomponerse para formar oxígeno, como se muestra en las ecuaciones 1.12 y 1.13 (Comninellis, 1994, p. 1858).



Una alternativa al uso de electrodos activos son los que se han denominado pasivos, cuyo potencial de oxidación es menor al del O<sub>2</sub>. Entre los materiales de uso más extendido se pueden mencionar al PbO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> y BDD. El uso de estos electrodos promueve que los radicales hidroxilos fisiadsorbidos reaccionen con los contaminantes, sin formación de otras especies radicalarias. Esto permite que, en algunos casos, se logre la completa mineralización de los compuestos contaminantes, como se muestra en la reacción 1.14 (Comninellis et al., 2008, p. 770).



Un resumen de las reacciones que pueden ocurrir, de acuerdo a la naturaleza del ánodo, se presenta en la **Figura 1.7** (Comninellis, 1994, p. 1858).



**Figura 1.7** Esquema del proceso de oxidación electroquímica de compuestos orgánicos en ánodos “activos” y “no activos” por la reacción de transferencia de oxígeno electroquímica (Comninellis, 1994, p. 1858)

Con base en el criterio del potencial de oxidación es posible clasificar a los materiales, como se indica en la Tabla 1.4, según su capacidad para fomentar la generación de radicales fisiadsorbidos o quimiadsorbidos (Comninellis et al., 2008, p.771).

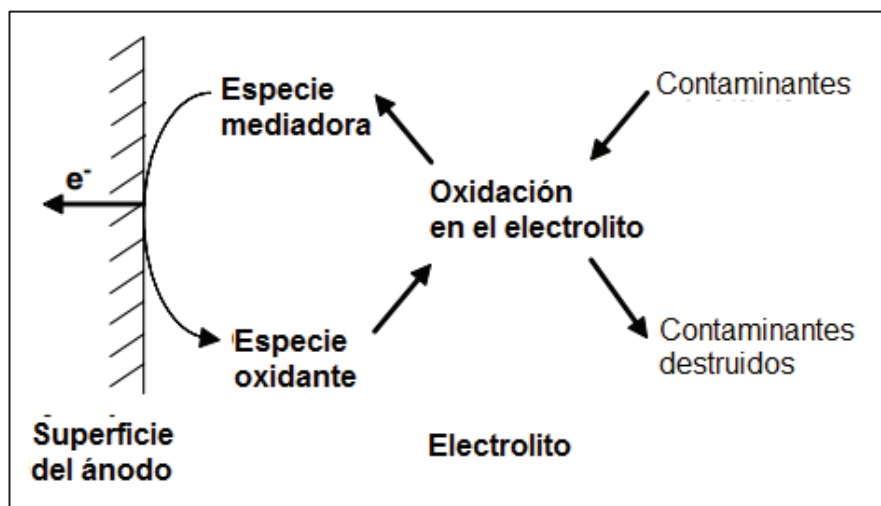
**Tabla 1.4** Poder oxidativo en medio ácido de varios materiales de ánodo usados en oxidación electroquímica

Material	Potencial de Oxidación (V)	Sobrepotencial de evolución de $O_2$ / V	Entalpía de adsorción de $MO_x(OH)$	Poder de oxidación del ánodo
$RuO_2 - TiO_2$	1,4 – 1,7	0,18	Adsorción química del radical OH ↑ Adsorción física del radical OH	↓
$IrO_2 - Ta_2O_5$	1,5 – 1,8	0,25		
Ti/Pt	1,7 – 1,9	0,3		
Ti/ $PbO_2$	1,8 – 2,0	0,5		
Ti/ $SnO_2 - Sb_2O_5$	1,9 – 2,2	0,7		
p-Si/BDD	2,2 – 2,6	1,3		

(Comninellis et al., 2008, p.771)

### 1.3.3.2 Oxidación electroquímica indirecta

En este caso, sobre la superficie del ánodo se produce la electro-generación de especies oxidantes, las mismas que reaccionan con los agentes contaminantes contenidos en el electrolito. La Figura 1.8 presenta un esquema del proceso de oxidación electroquímica indirecta (Anglada, Urriaga y Ortiz, 2009, p. 1748).



**Figura 1.8** Esquema de la oxidación electroquímica indirecta de contaminantes (Anglada, Urriaga y Ortiz, 2009, p. 1748)

A continuación se detallan los mecanismos en que se puede llevar a cabo el proceso de oxidación electroquímica indirecta.

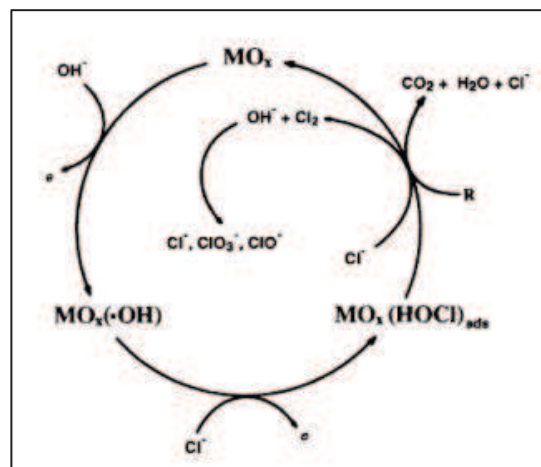
- **Oxidación mediada por pares redox metálicos:** Los iones metálicos en solución ácida y con alimentación de corriente eléctrica pueden ser oxidados en el ánodo, desde su forma iónica estable ( $M^{z+}$ ) hacia su estado de oxidación más reactivo ( $M^{(z+1)+}$ ). De esta forma pueden atacar a los compuestos orgánicos, la degradación puede formar dióxido de carbono, sales inorgánicas y agua. Las reacciones 1.15 y 1.16 resumen este proceso (Muff, 2014, p. 90).



La reacción 1.16 produce la regeneración de la especie metálica a su estado de oxidación estable. Además, es necesaria la ubicación de una membrana iónica que evite la reducción del agente oxidante en el cátodo (Muff, 2014, p. 90).

- **Oxidación mediada por la generación in-situ de oxidantes químicos:** Las reacciones se producen debido a la generación in situ de especies oxidantes. El caso más común de oxidación electroquímica indirecta se lleva a cabo con el cloro que se forma por la oxidación anódica de los cloruros presentes en la solución. Además, se pueden formar peróxido de hidrógeno, hipoclorito, peroxidisulfato e incluso ozono (Muff, 2014, p. 91).

- a) **Electrocloración de contaminantes:** Es el método más utilizado, debido a la presencia de cloro en la mayoría de aguas residuales de la industria. Las reacciones de oxidación por cloración se pueden llevar a cabo tanto en la solución, mediante especies oxiclорadas, como en la superficie del ánodo mediante la generación de cloro, ácido hipocloroso e hipocloritos, dependiendo del pH de trabajo. El proceso de oxidación depende de la concentración de sal, la temperatura, el pH y el material del electrodo (Muff, 2014, p. 93).



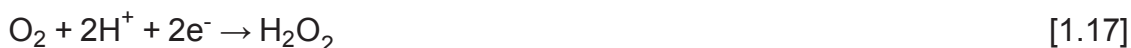
**Figura 1.9** Esquema del proceso de electrocloración en función del material del electrodo de trabajo (Muff, 2014, p. 93)

- b) **Generación anódica de otros oxidantes fuertes:** Varias especies pueden ser generadas por vía electroquímica, entre las más importantes se pueden mencionar al ozono, persulfato, percarbonato y perfosfato. Sin embargo, la principal limitación es la necesidad de uso de electrodos no activos como BDD y  $\text{PbO}_2$ , de muy alto costo. La formación de estas especies es poco usual, ya que, generalmente, el proceso involucra una serie de etapas de reacción (Muff, 2014, p. 95).
- c) **Generación catódica de peróxido de hidrógeno:** El peróxido de hidrógeno puede ser generado, electroquímicamente, mediante la reducción del oxígeno en el compartimento catódico. Este compuesto es un oxidante fuerte, que puede reaccionar directamente con los contaminantes presentes en la solución. El oxígeno necesario para la reducción puede ser obtenido mediante reacciones de evolución en el ánodo o por alimentación directa sobre la superficie del cátodo. Entre los compuestos que pueden ser degradados se pueden mencionar a los sulfuros, cianuros, aldehídos, ácido fórmico y algunos compuestos nitro o sulfonados (Muff, 2014, p. 96).

El poder oxidante del peróxido de hidrógeno puede ser mejorado mediante la adición de especies como ozono, luz UV o hierro, para la producción de la reacción de Fenton, conocido como electro-Fenton. Especial atención conlleva el último proceso en mención, ya que la presente investigación utiliza este fenómeno para la degradación de los contaminantes (Muff, 2014, p. 96).

### 1.3.4 QUÍMICA DEL PROCESO ELECTRO-FENTON

El proceso electro-Fenton es una variación del proceso Fenton tradicional. Se puede clasificar dentro de los procesos de electrólisis indirecta ya que se lleva a cabo dentro de una celda electrolítica donde se alojan los electrodos y la solución a tratar. Su característica principal es la generación “in-situ” de peróxido de hidrógeno, gracias a la reducción catódica del oxígeno disuelto presente en el medio; de esta manera pueden reaccionar los iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que han sido añadidos previamente a la solución. El proceso se detalla en el siguiente grupo de reacciones (Jiang y Zhang, 2007, p. 1 119; Osorio, Torres y Mercedes, 2011, p. 60):



Es importante mencionar que, gracias a la acción electroquímica en el cátodo, es posible reducir los iones férricos que han sido consumidos en la reacción Fenton para ser reutilizados en el mismo proceso, la reacción 1.19 explica el carácter catalítico de los iones ferrosos en la reacción. Esto se cumple si la velocidad de regeneración es tan alta como para proveer la cantidad necesaria de iones ferrosos (Jiang y Zhang, 2007, p. 1119; Guivarch, Trevin y Lahitte, 2003, p. 38):



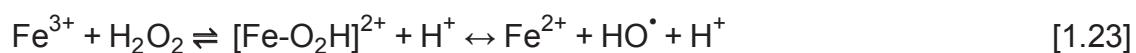
Las reacciones 1.17, 1.18 y 1.19 resumen la actividad presente en el compartimento catódico y se pueden expresar mediante la Reacción 1.20 (Guivarch et al., 2003, p. 38):



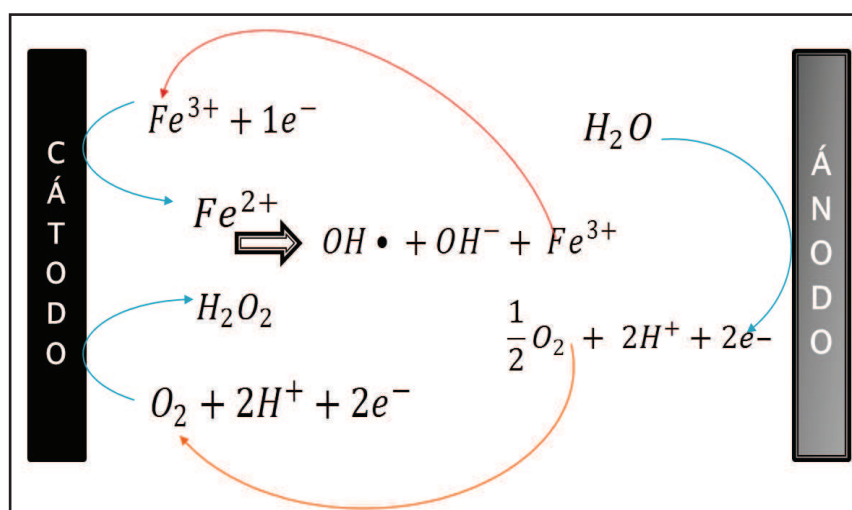
Por otro lado, el ánodo, además de producción oxidación electroquímica, cumple la función de oxidar el agua para generar el oxígeno necesario en las reacciones catódicas. La reacción de oxidación se resume en la Ecuación 1.21 (Jiang y Zhang, 2007, p. 1119):



La acción regenerativa de los iones férricos a ferrosos también se puede dar por oxidación de un compuesto orgánico o por la reacción del ion Fe (III) con peróxido de hidrógeno o con el radical hidroperoxilo, como se muestra en las reacciones 1.22, 1.23 y 1.24 (Jiang y Zhang 2007, p. 1119):



Un ejemplo simplificado de las reacciones que se llevan a cabo dentro de la celda electroquímica se muestra en la Figura 1.10:



**Figura 1.10** Reacciones electroquímicas presentes en el proceso electro-Fenton

### 1.3.5 VARIABLES DEL PROCESO ELECTRO-FENTON

El proceso electro-Fenton incorpora nuevas variables de estudio, entre ellas el material de los electrodos, la corriente eléctrica, la distancia entre electrodos y la aireación al cátodo. El detalle y la importancia de cada uno de estos parámetros se detallan en los siguientes acápite.

#### 1.3.5.1 Material de los electrodos

##### - **Ánodo**

La función del ánodo en el proceso electro-Fenton es proveer las condiciones necesarias para que el agua circundante al electrodo se descomponga en oxígeno e hidrógeno, que son consumidos en las reacciones catódicas. Es por ello que el material de trabajo elegido debe poseer las siguientes características (Jiang y Zhang, 2007, p. 1120):

- Resistencia a la corrosión, debido al medio ácido en que se trabaja y a la corriente eléctrica que soporta. No debe formar capas pasivas en su superficie como en el acero inoxidable.
- Alta conductividad eléctrica, necesaria para el paso de la corriente sobre toda la superficie del electrodo.

El platino ha sido el material de uso más extendido; sin embargo, por su alto costo su uso industrial es muy limitado. Como material alternativo se han utilizado bases de titanio con recubrimiento de platino (Casado y Fornaguera, 2005, p. 54).

En los últimos años se ha popularizado el uso de boro dopado con diamante (BDD por sus siglas en inglés). Este material presenta ventajas con respecto al platino, como la formación de BDD( $\text{HO}\cdot$ ), un oxidante no selectivo adicional que permite la descomposición directa de algunos compuestos orgánicos. Sin



embargo, su costo es un factor limitante, puesto que es mayor que el del platino (Vasudevan y Oturan, 2013, p. 60).

El ánodo también produce oxidación electroquímica, por ello el uso de electrodos no activos promueve la generación de radicales hidroxilos adicionales sobre la superficie del ánodo, mientras que el uso de materiales activos involucra la formación del radical superóxido, una especie menos reactiva, estos procesos se detallaron en el apartado 1.3.3.1.

#### - **Cátodo**

En el sistema electro-Fenton, el cátodo es el electrodo de trabajo; es decir que en él se llevarán a cabo las reacciones cruciales del proceso. La eficiencia del cátodo es crítica, y varios materiales han sido estudiados para cumplir con esta labor. Las características que debe tener el material del cátodo son la resistencia a la corrosión, la capacidad de difusión de oxígeno y una gran área superficial (Guivarch et al., 2003, p. 39).

Los electrodos de grafito han sido los más estudiados y con ellos se han obtenido los mejores resultados. Grafito puro ha sido utilizado para la degradación de múltiples contaminantes como colorantes azoicos, pentaclorofenol, bisfenol, paranitrofenol y contaminantes organofosforados. Sin embargo, el área superficial puede ser incrementada considerablemente mediante la utilización de fibra de carbón activado. Este material ya ha sido utilizado en estudios de la degradación de colorantes azoicos. Además, se ha utilizado carbón dopado con teflón (PTFE) para la degradación de compuestos orgánicos; sin embargo, el mercurio presente en este compuesto es peligroso en el medio ambiente (Guivarch et al., 2003, p. 39; Jiang y Zhang, 2007, p. 1120; Wang, Qu, Ru, Liu y Ge, 2005, p. 229).

### 1.3.5.2 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica es un parámetro muy importante en el proceso electro-Fenton, puesto que la cinética de generación de peróxido de hidrógeno y la regeneración de los iones férricos depende directamente de la cantidad de electricidad que circule en el sistema. Además, la corriente eléctrica de trabajo tiene una directa incidencia sobre los costos globales del proceso (Jiang y Zhang, 2007, p. 1121; Vasudevan y Oturan, 2013, p. 57).

En términos generales, la eficiencia del proceso mejora con el incremento de la corriente eléctrica, puesto que se provoca una mayor producción de radicales hidroxilo. Sin embargo, valores muy altos de corriente, determinados experimentalmente, no representan mejores resultados, debido a la formación de subproductos no deseados y a la polarización electroquímica que produce la reducción de la fuerza electromotriz de la celda, mediante el aumento de la resistencia óhmica en el electrolito. Se ha experimentado con valores de corriente eléctrica en el intervalo entre 0,3 A y 20 A, para la degradación de distintos contaminantes (Casado y Fornaguera, 2005, p. 54; Jiang y Zhang, 2007, pág. 1121; Vasudevan y Oturan, 2013, p. 57).

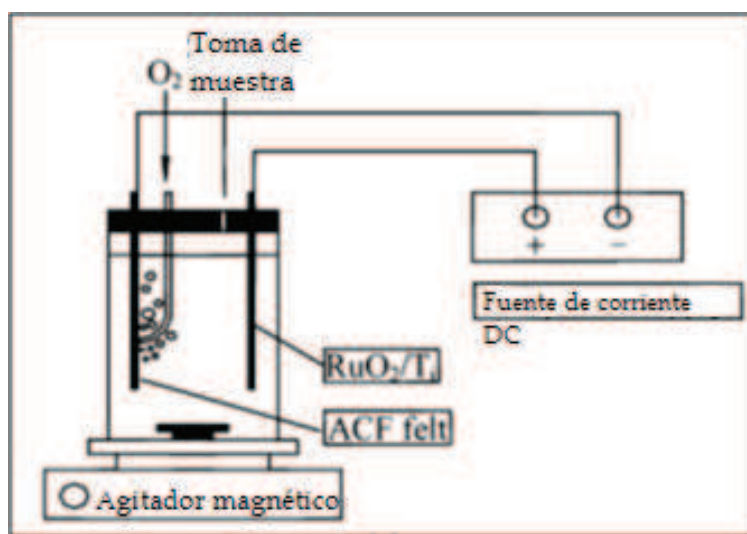
### 1.3.5.3 Distancia entre electrodos

La distancia entre electrodos se relaciona directamente con el consumo energético del proceso electro-Fenton. Así, con una distancia corta se logra disminuir la resistencia del medio reaccionante y, por consiguiente, se disminuye el consumo de electricidad en el sistema. Sin embargo, es necesario establecer una distancia adecuada de tal forma que se cuente con un volumen reaccionante significativo y se eviten cortocircuitos debido al contacto ánodo-cátodo (Fockedey y Lierde, 2002, pág. 4 170; Jiang y Zhang, 2007, p. 1121).

### 1.3.5.4 Aireación al cátodo

En el proceso electro-Fenton, el peróxido de hidrógeno es generado gracias a la reducción del oxígeno en el cátodo, lo que significa que la provisión del gas, en la cantidad adecuada, tiene incidencia también sobre la eficiencia del proceso. (Lahkimi, Oturan, Oturan y Chaouch, 2007, p.36)

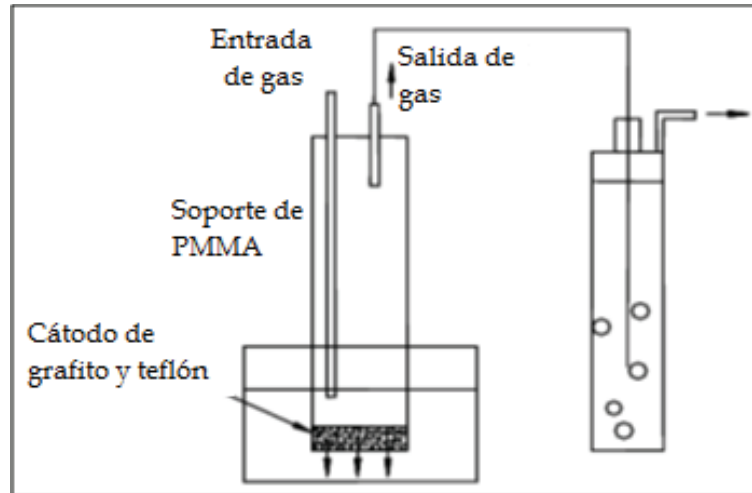
Se pueden plantear dos opciones para proveer el suministro de oxígeno necesario hacia al cátodo del sistema. La primera de ellas es la utilización de un cátodo con gran área superficial y la segunda alternativa posee un sistema de burbujeo de oxígeno hacia el electrodo; este último es el método más simple y de uso más extendido en la experimentación. En la Figura 1.8 se observa un tipo de configuración con inyección de oxígeno (Jiang y Zhang, 2007, p. 1 121).



**Figura 1.11** Sistema de burbujeo de oxígeno hacia el cátodo en un sistema electro-Fenton (Jiang y Zhang, 2007, p. 1 120)

En los últimos años, se ha extendido el uso de electrodos de difusión gaseosos (GDE) gracias a que presentan claras ventajas sobre la aireación tradicional. El oxígeno llega a la superficie del cátodo con mucha más facilidad y no existen burbujas en la superficie del cátodo, si se opera correctamente. Se determinó que el GDE tiene una mayor selectividad para la producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, sin pérdidas significativas en la regeneración de hierro. Finalmente, el GDE demostró ser

eficaz con el uso de aire como fuente de oxígeno, lo que significa un decrecimiento en los costos operativos. La Figura 1.12 muestra el esquema de un equipo difusor de oxígeno (Brillas y Casado, 1996, p. L51).



**Figura 1.12** Esquema de un electrodo de difusión gaseosa (GDE)  
(Jiang y Zhang, 2007, p. 1 121)

### 1.3.6 CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE COLORANTES AZOICOS EN EL PROCESO ELECTRO-FENTON

La cinética de degradación de soluciones de colorantes azoicos, cuando son sometidos al proceso electro-Fenton, se puede explicar con el modelo planteado a continuación. Si se parte de la reacción 1.25, se puede encontrar el modelo cinético que describe el proceso (Guivarch et al., 2003, p. 41; Almomani y Baranova, 2013, 1476).



La cinética seguida se puede representar por la ecuación 1.26.

$$-\frac{d[\text{Colorante}]}{dt} = k \times [\text{Colorante}] \times [\cdot\text{OH}] \quad [1.26]$$

La generación de radicales hidroxilos es controlada por la corriente eléctrica de alimentación y se considera constante a lo largo del proceso. Con base en esta hipótesis la ecuación 1.27 puede expresarse como se indica a continuación (Guivarch et al., 2003, p. 41; Almomani y Baranova, 2013, 1476).

$$-\frac{d[\text{Colorante}]}{dt} = k_0 \times [\text{Colorante}] \quad [1.27]$$

$$\ln \left( \frac{[\text{Colorante}]_0}{[\text{Colorante}]_t} \right) = k_0 \times t \quad [1.28]$$

Donde:

$$k_0 = k [\cdot\text{OH}]$$

El modelo, que se muestra en la ecuación 1.27, se ajusta a la cinética de una reacción de pseudo primer orden. El parámetro  $k_0$  es una constante cinética global del proceso. La ecuación 1.28 muestra el resultado de la integración del modelo cinético propuesto, que permite el cálculo de las constantes características, para la degradación de colorantes azoicos, cuando son sometidos al tratamiento en el proceso electro-Fenton (Guivarch et al., 2003, p. 41; Almomani y Baranova, 2013, 1476).

### 1.3.7 APLICACIONES

El proceso electro-Fenton ha sido utilizado para la degradación de un sinnúmero de contaminantes orgánicos, no orgánicos y refractarios. Algunos ejemplos corresponden a contaminantes como colorantes, pesticidas y herbicidas (Jiang y Zhang, 2007, p. 1122).

### 1.3.7.1 Herbicidas y pesticidas

Los compuestos de este tipo se utilizan para el control de plantas no deseadas y plagas. Su naturaleza es no biodegradable y su tratamiento se dificulta por este motivo. Este tipo de sustancias no consumidas por las plantas permanecen en el suelo y, posteriormente, pueden ser transportadas a los cuerpos de agua dulce. En Estados Unidos y Europa se han llegado a reportar concentraciones de 10 µg/L en aguas subterráneas. El proceso electro-Fenton ha sido utilizado exitosamente para la degradación de este tipo de compuestos. En el caso de herbicidas, el proceso reportó la mineralización completa de los ácidos 4-clorofenoxiacético (4-CPA); 4-cloro-2-metilfenoxiacético (MCPA); 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y 2,4,5-triclorofenoxiacético (2,4,5-T) (Brillas et al., 2004, p. 4 487).

En el tratamiento de compuestos de este tipo, el uso de ánodos de boro dopado (BDD) ha tenido mejores resultados que la utilización de ánodos tradicionales de PbO<sub>2</sub>, dopado con SnO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub> y Ti/Pt, debido a las propiedades presentadas en el apartado 1.3.3.1. En la degradación de herbicidas clorofenólicos y pesticidas, se puede utilizar un cátodo de difusión gaseoso (GDE) para mejorar aún más la eficiencia (Edelahi, Oturan, Oturan, Padellec, Bermond y Kacemi, 2003, p. 233).

### 1.3.7.2 Colorantes

Alrededor de 10 000 colorantes sintéticos son fabricados a nivel mundial para su uso en la industria textil, papelera y plástica. Se conoce que alrededor del 10 al 15 % del colorante que se utiliza, como promedio, es descargado como parte de los efluentes de las industrias. También se ha encontrado que algunos colorantes azoicos, sus precursores o subproductos tienen un carácter cancerígeno. El tratamiento de aguas residuales, que contienen colorantes puede presentar algunas dificultades técnicas, debido a la presencia de compuestos refractarios y no biodegradables, como ciertos compuestos que contienen grupos azoicos,

nitrosos o sulfonados. El proceso electro-Fenton ha sido efectivo para la remoción de color en este tipo de efluentes (Guivarch et al., 2003, p.44).

Algunos estudios del tratamiento electro-fenton en colorantes azoicos muestran la eficiencia del método. Así, por ejemplo la experimentación con el colorante rojo 14 sometido al proceso electro-Fenton permitió conseguir una disminución del 70 % en el parámetro TOC y el proceso aplicado al colorante índigo carmín con un ánodo de boro dopado (BDD), permitió alcanzar su mineralización completa (Wang et al., 2005, 227; Flox , Ammar, Arias, Brillas, Vargas-Zavala y Abdelhedi., 2006, 93).

### **1.3.7.3 Grasas**

Las grasas están presentes en los aceites utilizados en la industria de alimentos y sus desechos son muy contaminantes si ingresan a cuerpos de agua dulce. Entre los agentes contaminantes que se pueden encontrar en este tipo de efluentes se pueden nombrar a los triglicéridos, carotenos, alcoholes, fosfolípidos e hidrocarburos alifáticos. Además, estos desechos pueden presentar de un 5 a un 7 % de sólidos. Todas estas cualidades confieren a este tipo de efluentes características no biodegradables y se convierten en un grave problema en el caso de usar métodos convencionales (Ramesh, Seeni, Venkatesan, y Sumandha, 2010, p. 203).

El proceso electro-Fenton ha sido utilizado para la degradación de este tipo de sustancias y, en especial, para aumentar su biodegradabilidad para posteriores tratamientos biológicos. Ramesh et al. (2010, pp. 206-207) combinaron un proceso electro-Fenton con un posterior tratamiento biológico, el primer proceso en mención logró aumentar la relación DBO/DQO de 0,63 a 0,80 con una remoción de la DQO del 48,35 %. Además, se comprobó la transformación de ácidos grasos de cadena larga en ácidos de menor peso molecular como el ácido acético y fórmico.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

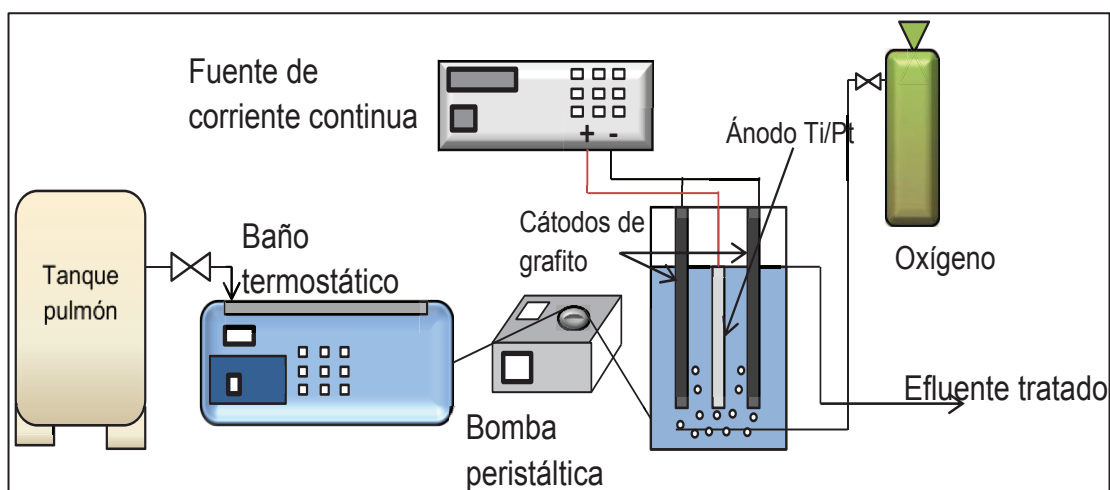
### 2.1 MATERIALES Y REACTIVOS

#### 2.1.1 MATERIALES

El montaje del sistema electro-Fenton desarrollado en el presente trabajo, se realizó con el uso de los siguientes materiales:

- Baño María marca Boeco PWB-4, 4 L de capacidad.
- Bomba peristáltica marca Control Company, flujo de 4 a 100 mL/min.
- Convertidor trifásico GW-Instek.
- Burbujeador de aire con difusor.
- Reactor PMMA de 1000 mL.
- Ánodo de titanio recubierto de platino Ti/Pt de 100 cm<sup>2</sup>.
- Cátodos de grafito de 130 cm<sup>2</sup>.

Un esquema de este montaje, se observa en la Figura 2.1.



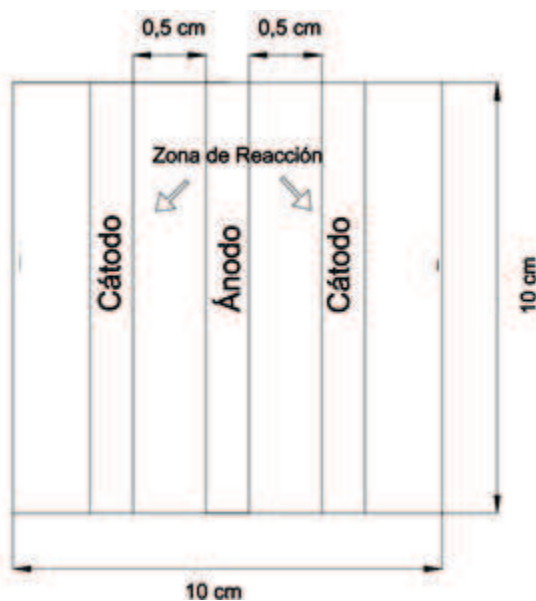
**Figura 2.1** Esquema del sistema electro-Fenton a escala de laboratorio, empleado para el tratamiento

Los equipos se instalaron bajo dos modalidades de uso de la siguiente forma:



- Modalidad batch: En este caso, no se empleó el baño termostático ni la bomba peristáltica, de tal forma que el sistema consistió en el reactor, la fuente de oxígeno y la fuente de alimentación de corriente. Se trabajó con un volumen inicial de 1 L de efluente, en todos los casos. Para la evaluación de la degradación de contaminantes se tomaron alícuotas a distintos tiempos.
- Modalidad continua: En estos experimentos, la temperatura de alimentación del efluente se controló a 40 °C y se mantuvo un flujo de alimentación constante, mediante la bomba peristáltica. Para evaluar la degradación de los contaminantes se tomaron muestras a intervalos de tiempo definidos.

La celda electroquímica donde se llevó a cabo el proceso electro-Fenton fue construida con polimetil metacrilato y tuvo una capacidad de 1 L. Se utilizó una configuración con un ánodo de titanio platinizado de 700 cm<sup>2</sup> y dos cátodos de grafito de 700 cm<sup>2</sup>. Además, se utilizó una fuente de burbujeo, colocada en el interior del reactor, que además de proveer del oxígeno necesario para las reacciones, sirvió como medio de agitación y homogeneización. La vista superior del reactor se presenta en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Vista superior reactor electro-Fenton a escala de laboratorio

### 2.1.2 REACTIVOS

Los reactivos utilizados en las pruebas con el sistema electro-Fenton fueron los siguientes:

- Sulfato ferroso heptahidratado, 99,7 %, Merck
- Ácido sulfúrico, 97 %, Merck
- Hidróxido de sodio, 99 %, Baker
- Colorante azul BRL ( $C_{30}H_{16}C_{12}N_4Na_2O_8S_2$ ), DYETEX
- Colorante pardo LEGL ( $C_{18}H_{11}CuN_6NaO_8S$ ), DYETEX
- Colorante negro 22 ( $C_{44}H_{32}N_{13}Na_3O_{11}S_3$ ), DYETEX

## 2.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE

Los efluentes utilizados para la experimentación fueron obtenidos de la empresa PAREDSUR, dedicada a la tinción de prendas de mezclilla, que se encuentra ubicada en el cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, Ecuador. La planta de producción genera un volumen de efluentes líquidos de 3 m<sup>3</sup>/día.

### 2.2.1 UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

La empresa PAREDSUR cuenta con una planta de tratamiento de efluentes propia, que posee un tanque de almacenamiento primario, en el cual se reciben los efluentes procedentes del proceso de tinción. Debido al caudal generado por la empresa, estos pueden ser tratados en un solo día de operación de la planta de tratamiento. Generalmente, la operación tiene lugar los días miércoles de cada semana.

El efluente se tomó del tanque de almacenamiento de descargas líquidas, que tiene una capacidad de 10 m<sup>3</sup>. Se realizaron muestreos semanales en la empresa PAREDSUR, durante los meses de enero y febrero del año 2013. En cada

muestreo se homogeneizó el agua en el tanque y se tomó una muestra de 45 L. Para evitar la degradación de los contaminantes, se adicionaron 2 mL de ácido fosfórico concentrado por litro de muestra.

## **2.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LAS MUESTRAS**

Las muestras fueron transportadas en recipientes plásticos al Laboratorio de Aguas y Microbiología del Acelerador de Electrones del DCN. En este lugar, se realizó la medición de los siguientes parámetros: DQO, DBO<sub>5</sub>, TOC, color real, turbidez, pH, sólidos totales y sólidos disueltos. Los métodos utilizados en cada caso siguen la normativa APHA, AWWA, WEF (2005) y se encuentran detallados en el Anexo I.

## **2.3 DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA DE TRABAJO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL PROCESO ELECTRO FENTON A SOLUCIONES SINTÉTICAS DE COLORANTES AZOICOS**

### **2.3.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES Y CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA LAS SOLUCIONES SINTÉTICAS DE COLORANTES PUROS**

Se seleccionaron tres colorantes azoicos comerciales que se utilizan en la industria textil del cantón Pelileo, provincia del Tungurahua, cuyos nombres y estructuras se detallaron en la Tabla 1.1 y en las Figuras 1.3, 1.4 y 1.5.

Se prepararon soluciones sintéticas de cada uno de los tres colorantes con una concentración de 50 ppm y se ajustó el pH a un valor de 3,0, debido a que en esas condiciones se llevó a cabo la experimentación. Se realizó un barrido espectrofotométrico en la región UV-Vis mediante el uso de un espectrofotómetro

HITACHI, con la finalidad de determinar la longitud de onda de máxima absorbancia de cada uno de los colorantes. Esta información sirvió para la construcción de las curvas de calibración.

Se prepararon soluciones de concentración 5, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm, para cada uno de los colorantes en estudio y se midió la absorbancia a la longitud de onda máxima correspondiente. Se construyeron las curvas de calibración para cada colorante.

### 2.3.2 TRATAMIENTO DE LAS SOLUCIONES SINTÉTICAS PREPARADAS EN LABORATORIO EN EL SISTEMA ELECTRO-FENTON

Para el tratamiento en un sistema batch, de las soluciones sintéticas preparadas en laboratorio, se fijaron los parámetros descritos en la Tabla 2.1, que sirvieron para determinar las mejores condiciones de experimentación.

**Tabla 2.1** Parámetros fijados para el tratamiento electro-Fenton, modalidad batch, para las soluciones de colorantes preparadas en laboratorio

Parámetro	Valor
Concentración de sulfato ferroso heptahidratado	*0,56 mmol·L <sup>-1</sup>
pH	2,9 – 3,0
Distancia ánodo-cátodo	0,5 cm

\* (Ozcan, Oturan, Şahin y Oturan, 2010, p. 480)

Las soluciones a tratar, en todos los casos de estudio, fueron saturadas con oxígeno 10 min antes de iniciar el proceso. Se midió el pH y su valor fue regulado en el intervalo de 2,9 a 3,0, mediante el uso de ácido sulfúrico al 50 %, preparado a partir de ácido sulfúrico de pureza 95 – 97 %. La distancia entre el ánodo y los cátodos se reguló previamente en un reactor de polimetil metacrilato. Para la provisión del Fe<sup>2+</sup> se utilizó sulfato ferroso en su forma heptahidratada, el cual fue añadido antes de iniciar la alimentación de corriente eléctrica continua.

En esta experimentación, la corriente eléctrica fue definida como variable del sistema con dos niveles de intensidad, que fueron de 8 A y 10 A. El diseño experimental fue de un solo factor, con tres repeticiones en cada ensayo. Se tomaron alícuotas a los 0, 1, 2, 4, 7, 9, 12, 15 y 20 min. Se midió la absorbancia a la longitud de onda definida como máxima para cada muestra y se determinó la concentración de cada colorante, con la ayuda de las curvas de calibración construidas, para establecer la decoloración de las soluciones de los colorantes puros. Para cada condición se realizaron tres repeticiones.

En la etapa inicial de la investigación, se estudiaron los colorantes puros en solución. Esto sirvió para analizar la efectividad del proceso en la degradación del grupo cromóforo de los colorantes azoicos. Además, se determinó la intensidad de corriente eléctrica que permitía obtener una remoción más rápida del color sin calentamiento excesivo del sistema, es decir sin alcanzar una temperatura de 50 °C, por las razones explicadas en el apartado 1.2.3.3. Los resultados obtenidos se muestran en el apartado 3.2.2 y el Anexo II.

### **2.3.3 TRATAMIENTO DE LA SOLUCIÓN MEZCLA DE COLORANTES EN EL SISTEMA ELECTRO-FENTON**

Para constatar los resultados obtenidos con los colorantes puros, se preparó una solución en la que se mezclaron los colorantes. Las concentraciones con las que se preparó la solución fueron de 40 ppm para los colorantes azul BRL y pardo LEGL. El tratamiento se llevó a cabo bajo las mismas condiciones de trabajo que las establecidas para los colorantes puros. La variable de trabajo fue la corriente eléctrica (8 A y 10 A), y se cuantificó la variación del color real.

## 2.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO PARA LA MUESTRA REAL QUE PERMITA LA DISMINUCIÓN DE LOS VALORES DE DQO, DBO<sub>5</sub>, TOC Y COLOR REAL A VALORES DENTRO DE NORMA

### 2.4.1 TRATAMIENTO DEL EFLUENTE EN MODALIDAD BATCH

Los resultados obtenidos en la experimentación descrita en el apartado 2.3 permitieron la determinación de la corriente eléctrica de trabajo para el tratamiento con el efluente real. En el sistema batch, se fijaron los parámetros detallados en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Parámetros fijados en el tratamiento electro-Fenton, modalidad batch, para el efluente real

Parámetro	Valor
Corriente eléctrica (A)	10
Concentración de sulfato ferroso heptahidratado (mmol·L <sup>-1</sup> )	0,56
Ph	2,9 - 3,0
Distancia ánodo-cátodo (cm)	0,5

El tratamiento del efluente real en el sistema electro-Fenton, en modalidad batch, permitió determinar el tiempo de residencia necesario para alcanzar valores dentro de norma de los parámetros estudiados. Se tomaron alícuotas a los 0, 2, 4, 7, 9, 12, 15 y 20 min. Se midió la remoción de la DQO y el color real. Para cada condición se realizaron tres repeticiones. Se midieron los valores de los parámetros DBO<sub>5</sub>, TOC, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos al inicio del proceso y luego del tiempo de residencia determinado para la disminución del valor del parámetro DQO a valores dentro de norma. Esto sirvió para constatar que los valores de los otros parámetros también se encontraron dentro de la norma.

## 2.4.2 TRATAMIENTO DEL EFLUENTE EN MODALIDAD CONTINUA

Con base en los mejores resultados del tratamiento del efluente real, en modalidad batch, se procedió al tratamiento del mismo en modalidad continua. Para ello, se implementó en el sistema de tratamiento un baño termostático, que permitió mantener la temperatura en 40 °C, de tal manera que se favoreciera la cinética de la reacción, y una bomba peristáltica, que permitió mantener un flujo constante. Las condiciones de trabajo fueron:

**Tabla 2.3** Parámetros fijados para el tratamiento electro-Fenton, modalidad continua, para el efluente real

Parámetro	Valor
Corriente eléctrica (A)	10
Concentración de sulfato ferroso heptahidratado (mmol·L <sup>-1</sup> )	0,56
pH	3,0
Distancia ánodo-cátodo (cm)	0,5
Tiempo de residencia (min)	9

El tiempo de residencia y el volumen del reactor experimental fueron datos para el cálculo del flujo de trabajo. Se realizó la experimentación a tres diferentes flujos, los cuales permitieran obtener un tiempo de residencia cercano al propuesto en la modalidad batch y, bajo estas condiciones, se midió la disminución de la DQO. Se tomaron alícuotas cada 7 min de tratamiento durante 49 min.

Para cada condición se realizaron tres repeticiones. Se realizó un análisis estadístico de los gráficos de medias para cada ensayo, mediante la utilización del software Stat Graphics, los resultados se presentan en el Anexo III. Las gráficas analizadas fueron las correspondientes a la disminución de la DQO en función del tiempo de tratamiento para las diferentes condiciones de flujo. Con estos datos, se determinó el flujo de trabajo para los diseños correspondientes.

Para constatar el funcionamiento del sistema, en cuanto al estado estacionario que debía alcanzar, se realizaron pruebas en las que se cuantificó la disminución de la DQO y el color real, con mediciones a la salida del equipo durante 49 min. Se realizó el análisis estadístico de las gráficas de medias de los ensayos, para comprobar la estacionalidad de los valores en el tiempo.

## **2.5 DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO QUE CONSIDERE EL SISTEMA APLICADO A UNA INDUSTRIA DEL CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, PARA EL TRATAMIENTO DE UN FLUJO DE 3 m<sup>3</sup>/DÍA**

Sobre la base de los resultados obtenidos del desarrollo de los procedimientos descritos en la sección 2.4, se seleccionó un sistema de tratamiento para la descontaminación de los efluentes de la empresa textil PAREDSUR. Se consideró un tiempo de trabajo en la planta de tratamiento de 8 horas por día. Además, se dimensionaron los equipos del proceso básico electro Fenton con un sobredimensionamiento de 1,35 veces el caudal promedio del efluente (Crites y Tchobanoglous, 2002, pp. 229-230).

### **2.5.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL REACTOR ELECTRO-FENTON**

El diseño del reactor electro-Fenton se realizó con base en los resultados obtenidos. Los parámetros de diseño que se consideraron fueron el tiempo de residencia, la geometría del reactor, el volumen del efluente a tratar y la densidad de corriente de alimentación necesaria. Las ecuaciones utilizadas se detallan en el Anexo IV.



### **2.5.2 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ACONDICIONAMIENTO CON CHAQUETA DE CALENTAMIENTO Y REGULACIÓN DE pH**

Los efluentes que provienen del teñido de las prendas serán recolectados en un tanque pulmón en el que se debe regular el valor de pH. En este tanque se proveerá la dosis de sulfato ferroso y el efluente será calentado hasta 40 °C. Además, se controlará el flujo de ingreso al tratamiento electro-Fenton. Con estas consideraciones, se realizó un diseño con una capacidad de almacenamiento correspondiente a dos días de descarga, debido a que en caso de requerir mantenimiento de la planta de tratamiento se cuente con espacio físico para almacenar la descarga de efluentes, sin comprometer el proceso productivo de la fábrica. Las ecuaciones utilizadas se detallan en el Anexo V.

### **2.5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL EFLUENTE**

Para calentar el efluente se diseñó un sistema independiente de intercambio de calor, el mismo que consta de un tanque aislado con un serpentín de calentamiento. Este tanque proveerá agua a 70 °C para calentar al efluente en el tanque hasta 40 °C. El agua se mantendrá en un circuito cerrado y se recirculará para ser calentada nuevamente.

Al tratarse de un circuito cerrado, se estableció contar con una bomba con control automático que regule el flujo según la temperatura en el tanque de acondicionamiento. Se definió un tanque con capacidad de 3 m<sup>3</sup> de agua. Las ecuaciones utilizadas se detallan en el Anexo V.

### **2.5.4 DIMENSIONAMIENTO DE LAS PISCINAS DE NEUTRALIZACIÓN**

Posterior al tratamiento en el reactor electro-Fenton, se determinó la necesidad de una etapa de neutralización del pH ácido. Para este efecto, se dimensionaron 2

piscinas cementadas, paralelas y conectadas, con una capacidad que se determinó en función del flujo de trabajo. Se diseñaron dos piscinas de neutralización, para trabajaren modalidad batch, de manera de que se pueda contar con una de ellas disponible para cuando se tenga mantenimiento, se produzcan descargas mayores a las esperadas o variaciones no previstas. Las ecuaciones utilizadas se detallan en el Anexo V.

### **2.5.5 DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO DE ARENA**

Debido a la presencia de sólidos insolubles, generados en el proceso electro-Fenton, se diseñó un filtro de arena para remover estas partículas. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del área, altura y el número de filtros se presentan en el Anexo V.

### **2.5.6 DIMENSIONAMIENTO DEL LECHO DE SECADO DE LODOS**

Los lodos que se obtendrán en el proceso de filtrado previo a su procesamiento deben ser secados. Para ello se dimensionó un lecho de secado; los datos para el porcentaje de lodos, que se refieren a la cantidad de sólidos insolubles presentes en el efluente, se obtuvieron de los análisis de sólidos llevados a cabo con el efluente tratado. En cuanto a los materiales, se eligió un medio de soporte formado por ladrillos de 0,15 m de espesor, una capa de arena de 0,2 m (altura efectiva entre 0,3 y 1,3 mm) y una capa de grava de 0,2 m (altura efectiva entre 1,6 y 51 mm). Las ecuaciones utilizadas se detallan en el Anexo V.

## **2.6 ANÁLISIS DE COSTOS PRELIMINAR**

Para el análisis de costos del proceso básico electro-Fenton, aplicado a la descontaminación de los efluentes de la empresa textil PAREDSUR, se realizó el perfil económico sobre la base de las cotizaciones que proveen las empresas

comercializadoras de equipos para plantas de tratamiento de aguas y, en este caso, de empresas especializadas en materiales para la industria electroquímica y eléctrica.

El costo de la energía eléctrica se calculó sobre la base del consumo eléctrico de los siguientes equipos: reactor electro-Fenton, sistema de calentamiento y las bombas que se utilizaron en el diseño del proceso.

El costo final de la instalación incluyó al material de construcción del reactor electro-Fenton, el tanque de almacenamiento primario, los sistemas eléctricos, los lechos de secado y filtración, las piscinas de neutralización, el tanque para el calentamiento de efluente, las bombas y los demás accesorios utilizados.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DEL EFLUENTE DE LA EMPRESA PAREDSUR

Para llevar a cabo el tratamiento de los efluentes provenientes de la empresa PAREDSUR fue necesaria la caracterización físico-química de los mismos. Los resultados promedio, para cada parámetro en estudio, se reportan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Análisis físico-químico de las muestras del efluente de la empresa PAREDSUR

Parámetro	Límite permisible	Promedio	Cumple norma
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	250	513 ± 42	NO
TOC (mg O <sub>2</sub> /L)	-	191 ± 15	-
DBO (mg O <sub>2</sub> /L)	100	109 ± 9	NO
Color real (Co/Pt)	Inapreciable en dilución 1/20	965 ± 82	NO
Turbidez (NTU)	100	152 ± 10	NO
Ph	5 – 9	6,24 ± 0,30	SI
Sólidos totales (mg/L)	1 600	1833 ± 58	NO
Sólidos disueltos (mg/L)	-	1544 ± 76	-

$\bar{x} \pm s$  (n = 3)  
(TULSMA, 2005, p. 331)

El efluente presentó una coloración azulada, producto de la mezcla de diferentes reactivos utilizados en el proceso de tinción de las prendas. Al comparar los valores obtenidos de los parámetros analizados con los estipulados en la norma ambiental vigente, se encontraron algunos incumplimientos. El valor de la DQO presentó un valor que excedía al máximo permisible para descargas a cuerpos de agua dulce, que en este caso es el río Patate. De la misma manera, la norma establece que el color real debe ser no perceptible en dilución 1/20; pero el efluente mantuvo un color azul claro cuando se hicieron las diluciones, por lo que este parámetro también mostró no conformidad. Tampoco se cumplió la norma

para los parámetros de turbidez y sólidos totales. El pH de la muestra, en cambio, sí se encontró dentro de los valores de la norma. En cuanto al parámetro TOC, no existen valores de referencia en la norma, sin embargo se estudió su variación a lo largo del proceso para establecer el grado de mineralización de la materia orgánica como consecuencia del tratamiento aplicado.

Un parámetro de análisis importante fue la relación  $DBO_5/DQO$ , que caracteriza la naturaleza biodegradable de los efluentes. En el presente estudio, el valor inicial fue de 0,21; este valor fue un indicativo de que los efluentes no podían ser tratados por métodos biológicos, puesto que para ello la relación  $DBO_5/DQO$  debería ser superior a 0,4 (Singhal y Thakur, 2009, p. 21).

El uso de procesos de oxidación avanzada para aumentar la biodegradabilidad del efluente es una de las alternativas de tratamiento, que fue aplicada en este estudio (Aboulhassan, Souabi, y Yaacoubi, 2008, p. 14).

## **3.2 PRUEBAS DE TRATAMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA EN SOLUCIONES SINTÉTICAS PREPARADAS EN LABORATORIO**

### **3.2.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA LOS COLORANTES PUROS**

Para establecer los efectos del tratamiento sobre los colorantes analizados fue necesario construir las curvas de calibración para cada uno de los compuestos a estudiar. El método de análisis utilizado fue una espectrofotometría UV-vis. Se determinó la longitud de onda de máxima absorbancia de las soluciones preparadas con concentraciones de 50 ppm de los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2** Longitud de onda de máxima absorción ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) para los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22

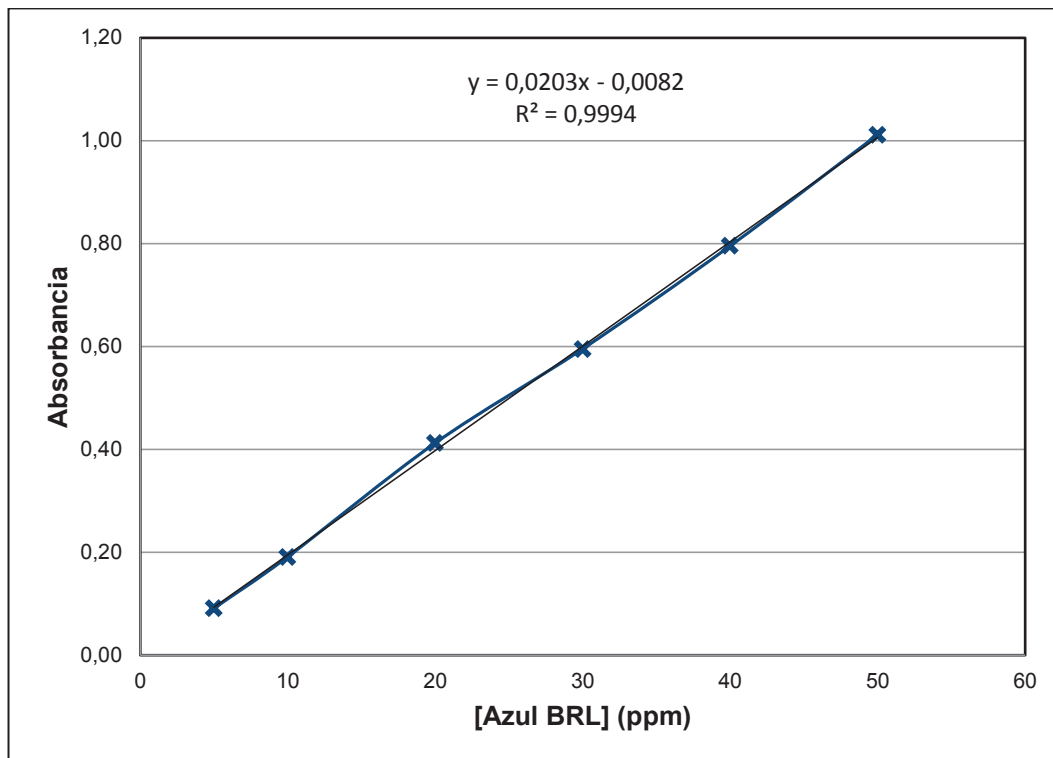
Colorante	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)
Azul BRL	564
Pardo LEGL	418
Negro 22	520

Las Tablas 3.3 y 3.4 presentan los datos de absorción obtenidos al realizar las mediciones espectrofotométricas, a las respectivas longitudes de onda de máxima absorción, para los colorantes azul BRL y pardo LEGL, respectivamente.

Con base en estos datos, se construyeron las curvas de calibración que se presentan en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3. La regresión lineal de los datos permitió obtener las ecuaciones que relacionan el valor de la absorción con la concentración de los colorantes en solución, que se utilizaron para la determinación de las concentraciones residuales posteriores al tratamiento.

**Tabla 3.3** Valores de absorción para diferentes concentraciones del colorante azul BRL a  $\lambda=564$  nm (pH=3)

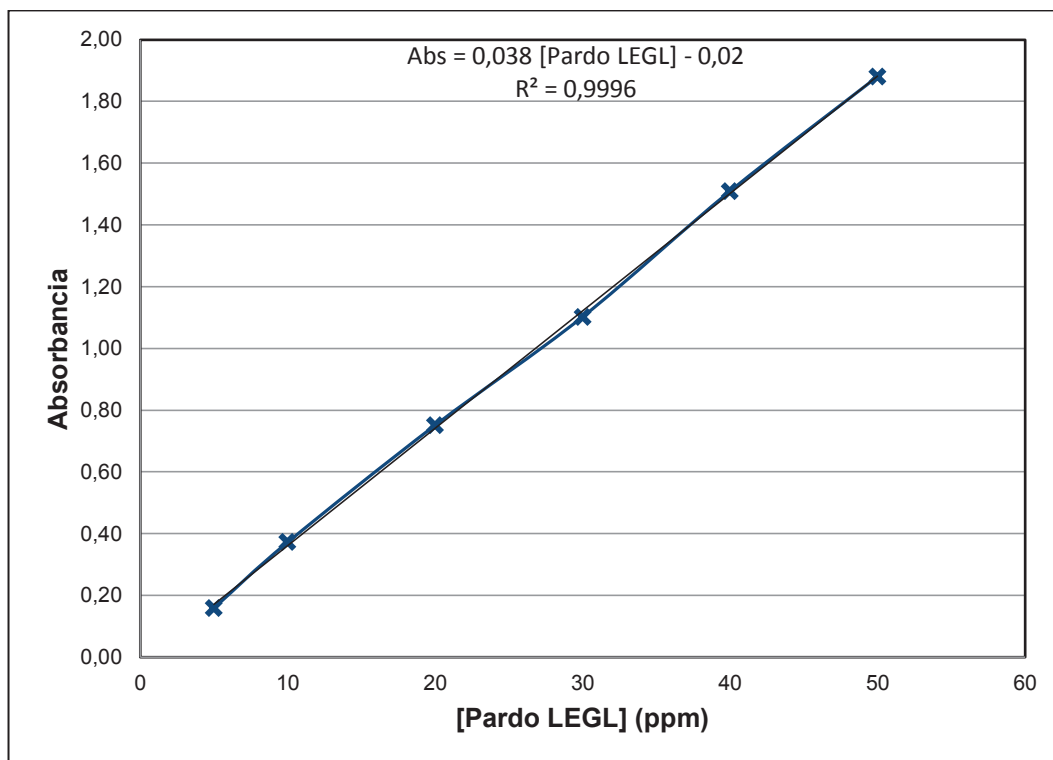
Concentración (ppm)	Absorbancia
5	0,091
10	0,191
20	0,412
30	0,595
40	0,795
50	1,011



**Figura 3.1** Curva de calibración espectrofotométrica para el colorante azul BRL ( $\lambda=564$  nm, pH=3)

**Tabla 3.4** Valores de absorbancia para diferentes concentraciones del colorante pardo LEGL a  $\lambda=418$  nm (pH=3)

Concentración (ppm)	Absorbancia
5	0,159
10	0,372
20	0,751
30	1,102
40	1,509
50	1,880



**Figura 3.2** Curva de calibración espectrofotométrica para el colorante pardo LEGL ( $\lambda = 418 \text{ nm}$ ,  $\text{pH}=3$ )

La Tabla 3.5 presenta las ecuaciones que relacionan la absorbancia con la concentración de cada colorante.

**Tabla 3.5** Ecuaciones obtenidas para el cálculo de la concentración de colorante en función de la absorbancia medida para los colorantes azul BRL y pardo LEGL.

Colorante	Longitud de onda (nm)	Concentración (ppm) en función de la absorbancia
Azul BRL	564	$A = 0,0162 [\text{Azul BRL}] - 0,0091$
Pardo LEGL	418	$A = 0,0299 [\text{Pardo LEGL}] - 0,0007$

Con respecto al colorante negro 22, no fue posible elaborar la curva de calibración respectiva. Esto se debió a que el cambio de pH a medio ácido, por adición de ácido sulfúrico, produjo el cambio de coloración tornándola prácticamente transparente. El comportamiento se puede deber a que el cambio de pH produce el reordenamiento de los átomos en la molécula, además se pueden producir cambios en la forma iónica del compuesto. Este comportamiento se puede



observar en indicadores químicos como la fenolftaleína o en compuestos orgánicos como las antocianinas (Robertson, 2010, p.99; Garzón, 2008, p. 31).

A más de ello, debido a la filtración que se llevó a cabo el resto del colorante fue removido. El tratamiento de las soluciones del colorante negro 22 no se llevó a cabo en la presente investigación por los motivos expuestos.

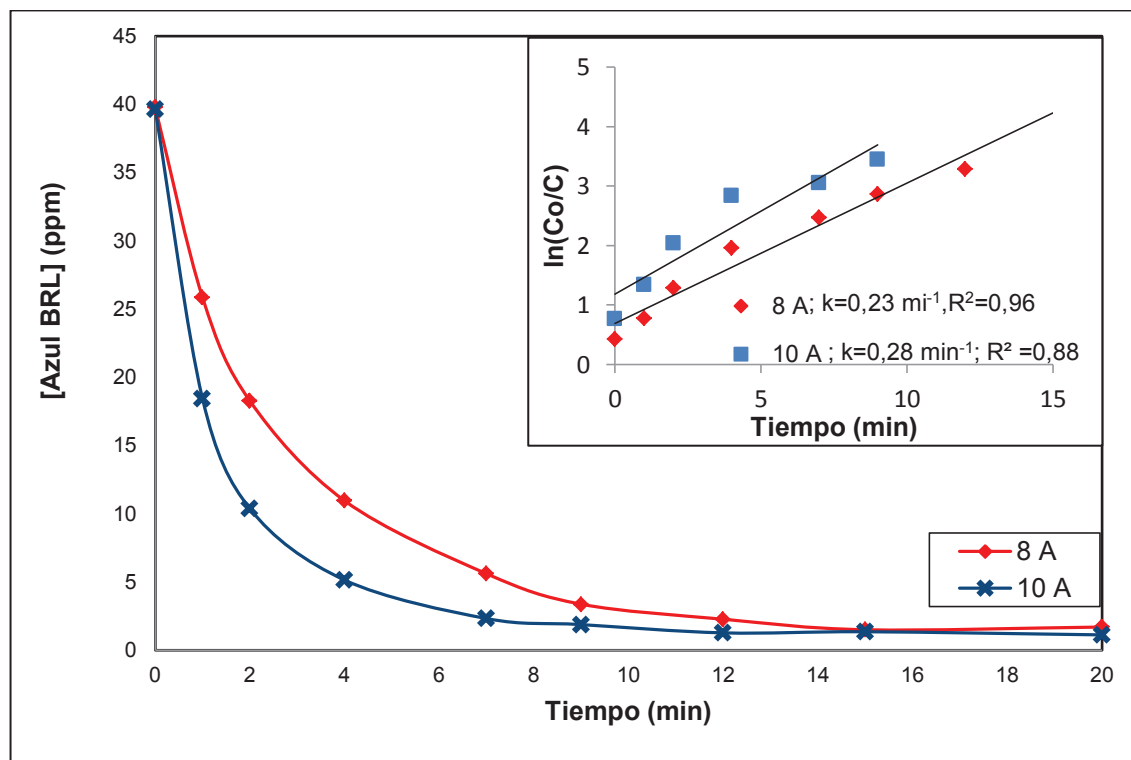
### 3.2.2 TRATAMIENTO DE SOLUCIONES DE COLORANTES PUROS EN EL SISTEMA ELECTRO-FENTON

Se procedió al tratamiento de las soluciones de los colorantes azoicos en estudio en el sistema electro-Fenton. Se trabajó con dos valores de corriente eléctrica que fueron de 8 A y 10 A. Los resultados obtenidos de la degradación de los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22, al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch, se presentan en las Tablas 3.6 y 3.7 y en las Figuras 3.3 y 3.4.

**Tabla 3.6** Resultados comparativos de la variación de concentración del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica

Corriente eléctrica	8 A		10 A	
	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)
0	39,8 ± 0,1	0,0	39,7 ± 0,1	0,0
1	25,9 ± 1,0	35,1	18,4 ± 0,6	53,5
2	18,3 ± 1,1	54,1	10,4 ± 0,5	73,9
4	10,9 ± 0,9	72,5	5,1 ± 1,5	87,1
7	5,6 ± 0,3	86,0	2,3 ± 0,3	94,2
9	3,4 ± 0,4	91,6	1,9 ± 0,2	95,3
12	2,3 ± 0,7	94,3	1,3 ± 0,3	96,8
15	1,5 ± 0,6	96,3	1,3 ± 0,1	96,6
20	1,7 ± 0,3	95,8	1,1 ± 0,1	97,2

$\bar{x} \pm \sigma$  (n = 3)

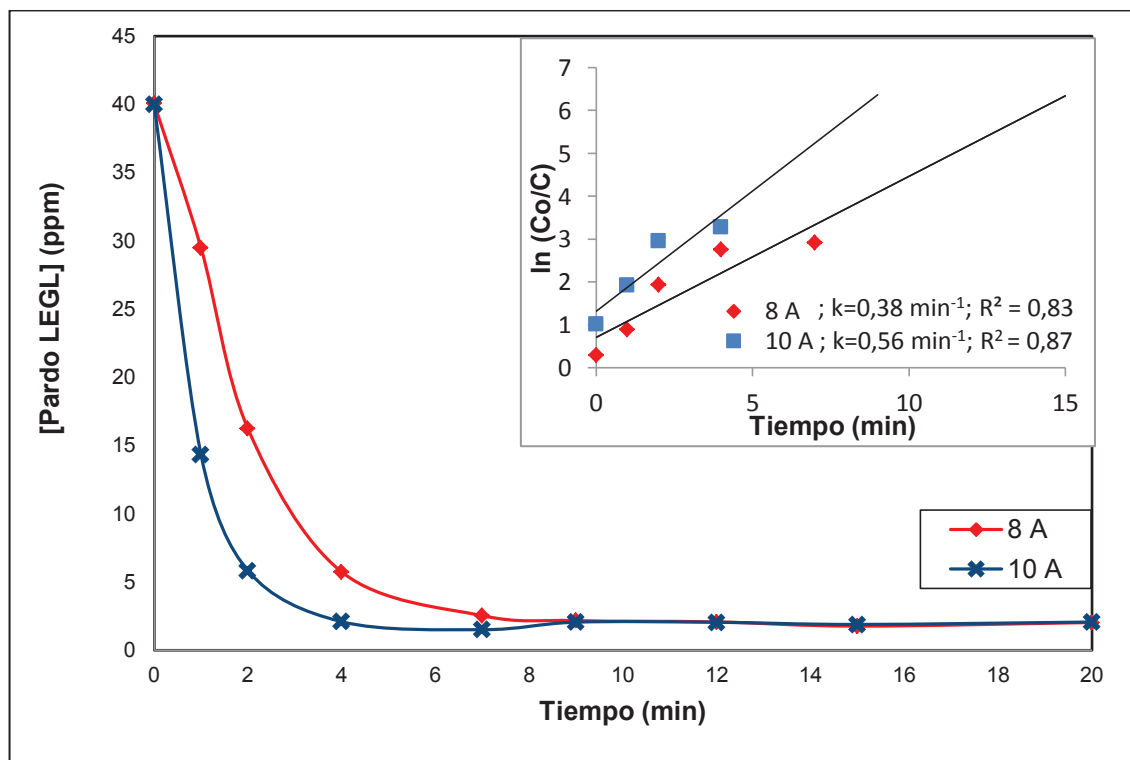


**Figura 3.3** Degradación del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica. Recuadro: Linealización de los datos

**Tabla 3.7** Resultados comparativos de la variación de concentración del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch, a dos condiciones de corriente eléctrica

Corriente eléctrica	8 A		10 A		
	Tiempo (min)	[Pardo LEGL] (ppm)	Remoción (%)	[Pardo LEGL] (ppm)	Remoción (%)
	0	$40,1 \pm 0,3$	0,0	$40,0 \pm 0,1$	0,0
	1	$29,5 \pm 1,7$	26,4	$14,3 \pm 1,0$	64,2
	2	$16,2 \pm 3,8$	59,5	$5,8 \pm 0,3$	85,5
	4	$5,7 \pm 0,9$	85,7	$2,1 \pm 0,2$	94,8
	7	$2,5 \pm 0,1$	93,7	$1,5 \pm 0,4$	96,3
	9	$2,2 \pm 0,6$	94,6	$2,0 \pm 0,6$	94,9
	12	$2,1 \pm 0,4$	94,9	$2,0 \pm 0,1$	94,9
	15	$1,8 \pm 0,3$	95,6	$1,9 \pm 0,4$	95,3
	20	$2,0 \pm 0,3$	95,0	$2,1 \pm 0,4$	94,9

$\bar{x} \pm \sigma$  (n = 3)



**Figura 3.4** Degradación del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica. Recuadro: Linealización de los datos

La linealización de los datos permitió obtener las constantes cinéticas de degradación, para los dos colorantes, con cada valor de corriente utilizado. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.8, la cinética ha sido ajustada a una reacción de pseudo primer orden por las razones explicadas en el apartado 1.3.6.

**Tabla 3.8** Constante cinética de pseudo primer orden para la degradación de los colorantes azul BRL y pardo LEGL al aplicar el proceso electro-Fenton en modalidad batch

Corriente (A)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Constante cinética de pseudo primer orden degradación (min <sup>-1</sup> )	
		Azul BRL	Pardo LEGL
8	5,71	0,23	0,38
10	7,14	0,28	0,56

En las Figuras 3.3 y 3.4 se puede observar que con los dos valores de corriente eléctrica utilizados en este estudio, para los dos colorantes, se logró una rápida decoloración en los primeros minutos de tratamiento en el sistema electro-Fenton.

Para el colorante azul BRL, se consiguió una disminución de la concentración del 54 % con 8 A y del 74 % con 10 A en 2 min de tratamiento. El análisis de la gráfica de medias de los datos de remoción de color de la solución del colorante azul BRL, que se presenta en la Figura AIII.1 del Anexo III, permitió determinar que existieron diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza) entre los tratamientos con 8 A y 10 A. Además, mediante el análisis de la gráfica de interacción, presentada en la Figura AIII.5, se estableció que con la aplicación de corriente de 10 A se alcanzó una remoción de color estadísticamente mayor hasta los 9 min de tratamiento; en este tiempo la remoción fue de 87,48 % con 8 A y 95,74 % con 10 A. Luego de este tiempo de tratamiento, los valores de remoción fueron estadísticamente equivalentes para ambos niveles de corriente. La constante cinética de degradación para la corriente de 10 A fue de  $0,28 \text{ min}^{-1}$ , significativamente mayor que a 8 A, con un valor de  $0,23 \text{ min}^{-1}$ , la variación del valor de la constante cinética, entre los niveles, fue del 22 %.

La degradación del colorante pardo LEGL necesitó un tiempo de tratamiento menor que el empleado en el colorante azul BRL, para lograr disminuciones de color semejantes. Una corriente de 8 A permitió alcanzar una remoción del 60 % del color en 2 min, mientras que con 10 A se alcanzó la misma remoción del color en solo 1 min. El análisis estadístico determinó que la corriente de 10 A permitió obtener una remoción de color estadísticamente mayor hasta los 7 min de tratamiento. La gráfica de interacción se presenta en la Figura AIII.6 del Anexo III. La velocidad de degradación fue mayor con la corriente de 10 A, esto se pudo constatar con la constante cinética, que en el caso de la corriente de 8 A fue de  $0,38 \text{ min}^{-1}$  y para 10 A el valor subió a  $0,56 \text{ min}^{-1}$ , en este caso la variación de la constante cinética de degradación, entre los niveles de estudio fue del 47%.

Los valores mostrados en la Tabla 3.8 confirman que la velocidad de degradación del colorante pardo LEGL es mayor que la que presenta el colorante azul BRL.

Para la corriente de 10 A, el valor de la constante cinética fue de  $0,56 \text{ min}^{-1}$  en el colorante pardo LEGL y  $0,28 \text{ min}^{-1}$  en el colorante azul BRL. Los resultados obtenidos se ajustaron al modelo de pseudo primer orden propuesto (Guivarch et al., 2003, p. 41; Almomani y Baranova, 2013, p. 1476) .

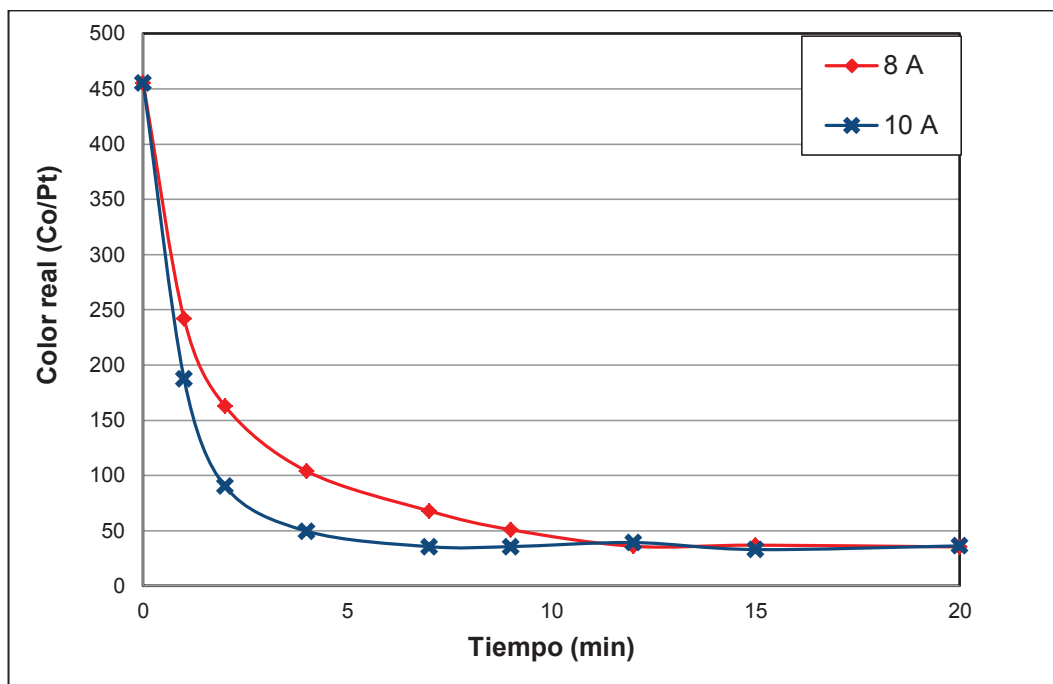
En el tratamiento de las soluciones de los dos colorantes azoicos, la pérdida de color se debe a la acción de los radicales hidroxilos sobre los dobles enlaces de los grupos azoicos mediante una adición electrofílica que determina la ruptura de los mismos. Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia del proceso electro-Fenton en la degradación de los colorantes azoicos en solución acuosa mediante la eliminación del color (Joseph, Destailats, Hung, y Hoffman, 2000, p. 304).

También se cuantificó la disminución del parámetro color real en las soluciones de los colorantes puros, los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10 y Figuras 3.5 y 3.6.

**Tabla 3.9** Resultados comparativos de la variación del parámetro color real del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica

Corriente eléctrica	8 A		10 A	
	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)
0	455 ± 7	0,0	455 ± 6	0,0
1	242 ± 9	46,9	188 ± 3	58,8
2	163 ± 7	64,2	90 ± 7	80,2
4	104 ± 14	77,2	50 ± 2	89,1
7	68 ± 14	85,1	36 ± 5	92,2
9	51 ± 2	88,8	36 ± 5	92,2
12	36 ± 7	92,1	39 ± 3	91,4
15	37 ± 6	91,9	33 ± 7	92,8
20	35 ± 5	92,2	36 ± 9	92,0

$\bar{x} \pm \sigma$  (n = 3)

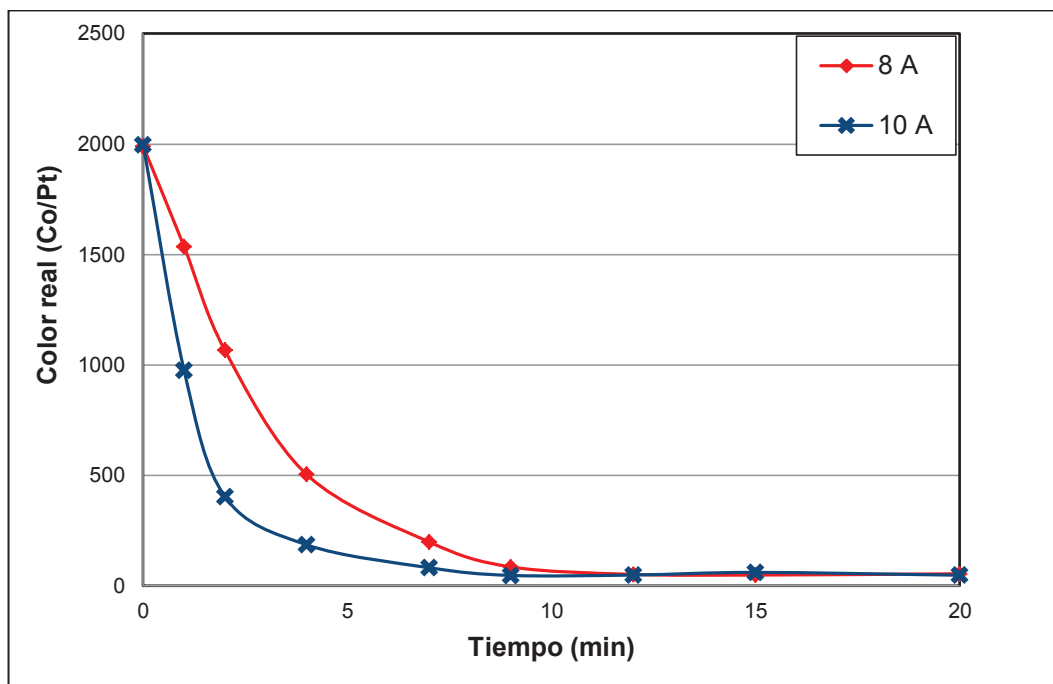


**Figura 3.5** Variación del parámetro color real del colorante azul BRL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica

**Tabla 3.10** Resultados comparativos de la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica

Corriente eléctrica	8 A		10 A		
	Tiempo (min)	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)	[Azul BRL] (ppm)	Remoción (%)
0		1990 ± 20	0,0	1997 ± 21	0,0
1		1537 ± 75	22,8	977 ± 31	51,1
2		1067 ± 86	46,4	405 ± 86	79,7
4		505 ± 7	74,6	187 ± 10	90,7
7		200 ± 9	90,0	83 ± 7	95,8
9		87 ± 9	95,6	48 ± 12	97,6
12		53 ± 11	97,4	50 ± 11	97,5
15		50 ± 16	97,5	62 ± 11	96,9
20		55 ± 19	97,2	49 ± 17	97,5

$\bar{x} \pm \sigma$  (n = 3)



**Figura 3.6** Variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a dos condiciones de corriente eléctrica

Para el colorante azul BRL, con 10 A se logra una remoción del color del 90 % en 4 min de tratamiento y la misma remoción en 9 min con 8 A de corriente eléctrica. Mediante el análisis estadístico de los datos, que se presenta en la gráfica de medias en la Figura AIII.3 del Anexo III, se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de corriente y, con base en el análisis del gráfico de interacción, presentado en la Figura AIII.7 del Anexo III se determinó que hasta los 9 min de tratamiento. Sobre este tiempo, los valores de remoción son equivalentes.

Para el colorante pardo LEGL, con 10 A de corriente, se logró una remoción del 90% en 4 min y la misma remoción con 8 A en 7 min de tratamiento. Se realizó el análisis estadístico de los datos, mediante la gráfica de interacción que se presenta en la Figura AIII.8 del Anexo III, se determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas luego de los 9 min de tratamiento para los dos niveles de corriente eléctrica.

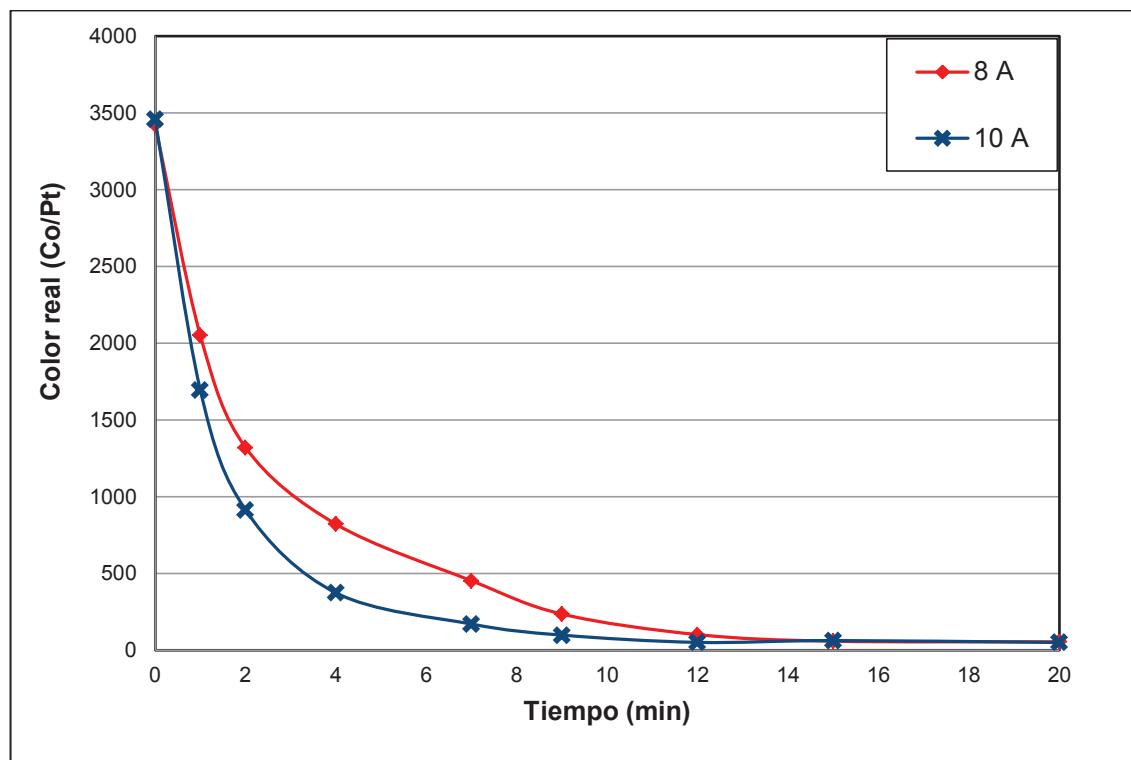
### 3.2.3 TRATAMIENTO DE LA SOLUCIÓN MEZCLA DE COLORANTES EN EL SISTEMA ELECTRO-FENTON

Se trató a la solución mezcla de los colorantes azul BRL y pardo LEGL en el sistema electro-Fenton a 8 A y 10 A. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 3.11 y 3.12 y en la Figura 3.7.

**Tabla 3.11** Variación del parámetro color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton a la solución mezcla de colorantes en modalidad batch  
(I = 8 A y 10 A)

8 A					
Tiempo (min)	Color real (Co/Pt)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	3470	3390	3410	3423 ± 41	0,0
1	2050	2010	2090	2050 ± 40	40,1
2	1350	1290	1320	1320 ± 30	61,4
4	830	790	840	820 ± 26	76,0
7	451	481	421	451 ± 30	86,8
9	251	236	215	234 ± 18	93,2
12	115	89	97	100 ± 13	97,1
15	67	58	47	57 ± 10	98,3
20	51	48	61	53 ± 7	98,4
10 A					
Tiempo (min)	Color real (Co/Pt)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	3460	3510	3410	3460 ± 50	0,0
1	1780	1670	1630	1693 ± 78	51,1
2	890	910	940	913 ± 25	73,6
4	341	402	374	372 ± 31	89,2
7	189	151	167	169 ± 19	95,1
9	99	105	87	97 ± 9	97,2
12	61	49	39	50 ± 11	98,6
15	71	65	49	62 ± 11	98,2
20	65	51	31	49 ± 17	98,6





**Figura 3.7** Comportamiento del parámetro color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton en modalidad batch a la solución mezcla de los colorantes azul BRL y pardo LEGL (I= 8 A y 10 A)

En la Figura 3.7 se puede observar que a los 9 min de tratamiento y 8 A se logró una remoción del 74,95 % y con 10 A una remoción del 87,48 %. El análisis estadístico de los tratamientos mediante la gráfica de medias, que se presenta en la Figura AIII.10, del Anexo III, mostró que, entre los niveles de corriente utilizados en este estudio, existieron diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza). Con el análisis del gráfico de interacción, mostrado en la Figura AIII.11, se determinó que, entre los niveles de corriente, existen diferencias estadísticamente significativas hasta los 15 min de tratamiento.

La mezcla de los colorantes produce que la remoción de color sea más lenta que en los casos de estudio con los colorantes puros. Esto se debe a que la carga contaminante es mayor debido a la mezcla de los compuestos y a que la producción de radicales hidroxilos es limitada por la generación electroquímica del peróxido de hidrógeno. Esto produce que la cantidad de radicales generados en el sistema sea la misma que en el tratamiento de cada uno de los colorantes puros; por tanto, el tiempo en el que se genera la cantidad necesaria de radicales para la

degradación de los colorantes componentes de la mezcla es significativamente mayor que en los casos de estudio con los tres colorantes por separado.

A pesar de la diferencia de tiempo mencionada, con respecto al tratamiento de los colorantes puros, el proceso electro-Fenton permitió la rápida degradación de los colorantes analizados, gracias a que los radicales hidroxilo, altamente reactivos, destruyen los grupos cromóforos. Para los colorantes puros y para la solución compuesta, la corriente eléctrica que permitió obtener los mejores resultados fue de 10 A; por esta razón, esta fue la intensidad de corriente seleccionada para el tratamiento del efluente real.

### **3.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE REAL PARA DISMINUIR LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS EN ESTUDIO A VALORES DENTRO DE LA NORMA AMBIENTAL VIGENTE**

#### **3.3.1 ESTUDIO EN MODALIDAD BATCH**

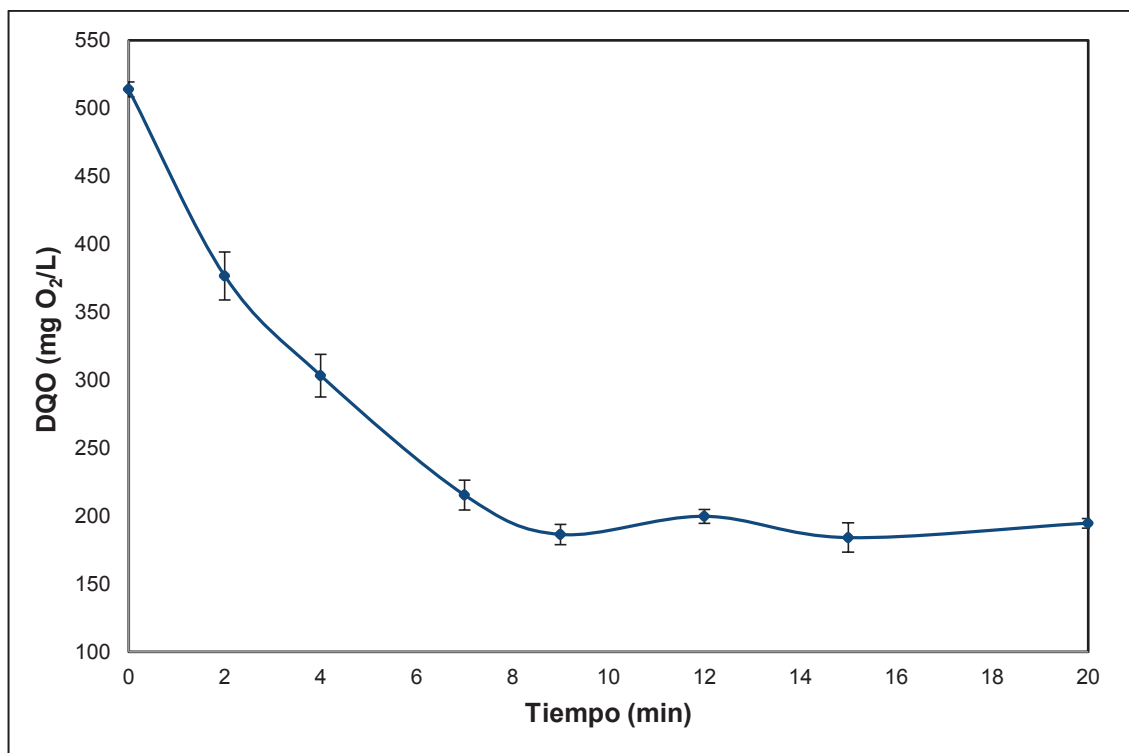
Se procedió al tratamiento del efluente tomado de la empresa PAREDSUR, en modalidad batch. Las condiciones se fijaron con base en los resultados obtenidos en el apartado 3.2, en el cual se encontró que las mejores remociones correspondieron a la aplicación de 10 A.

##### **3.3.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Los resultados obtenidos de la variación de la DQO en el efluente real cuando fue sometido al tratamiento electro-Fenton con una corriente de 10 A, se presentan en la Tabla 3.12 y en la Figura 3.8.

**Tabla 3.12** Variación de la DQO al aplicar el tratamiento electro-Fenton al efluente real en modalidad batch  
(I=10 A, pH=3)

Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	514	519	508	514 ± 5,5	0,0
2	391	357	382	377 ± 17,6	26,7
4	321	291	298	303 ± 15,7	40,9
7	203	219	224	215 ± 10,9	58,1
9	192	178	189	186 ± 7,3	63,7
12	194	204	201	200 ± 5,1	61,1
15	193	172	187	184 ± 10,8	64,2
20	191	198	195	195 ± 3,5	62,1



**Figura 3.8** Disminución de la DQO en el efluente real en un tratamiento electro-Fenton en modalidad batch  
(I = 10 A, pH=3)

Los resultados del tratamiento en modalidad batch indican un decrecimiento de la DQO en un 63 % para 9 min de tratamiento. A tiempos mayores, el proceso mostró una tendencia de pérdida de eficiencia, probablemente, debido a que la concentración de iones ferrosos baja considerablemente y a que la capacidad de reducción de los iones férricos en los cátodos es mucho más lenta por la formación de sólidos insolubles, que interfieren en el proceso. Se pudo constatar este fenómeno por el apareamiento de una coloración amarillenta en la solución final (Boye, Sandona, Giomo, Buso y Farnia, 2009, p. 287).

Se realizó el análisis estadístico de la variación de la DQO, la gráfica de medias se presenta en la Figura AIII.11 del Anexo III. Se determinó que a partir de los 9 min no existieron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al tiempo de tratamiento, para la reducción de este parámetro en modalidad batch.

En el caso del efluente real, la acción de los radicales hidroxilos no se limitó a la destrucción de los enlaces azoicos, sino que también pudo determinar la oxidación de otros grupos funcionales presentes en otros contaminantes que se encontraban en la muestra (Joseph et al., 2000, p. 304).

La DQO del efluente disminuyó regularmente con el avance del proceso; la tasa de decrecimiento fue mayor al inicio del tratamiento y más baja cuando parte de los contaminantes fueron degradados. Oturan, Oturan, Lahitte y Trevin (2001) sugirieron que la pérdida de eficiencia se podría deber a que la mayoría de compuestos presentes en el efluente han sido convertidos en otros con menor reactividad al proceso, de tal forma que la tasa de disminución de la DQO decrece hasta prácticamente cero. En la presente investigación esto ocurre a partir de los 9 min de tratamiento con una corriente eléctrica de 10 A (p.100).

El objetivo del presente estudio, en este apartado, fue tratar el efluente real hasta que los valores finales del parámetro DQO disminuyeran a valores dentro de la norma ( $DQO \leq 250 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ). Valores cercanos a  $190 \text{ mg O}_2/\text{L}$  fueron alcanzados a los 9 min de tratamiento con 10 A de corriente eléctrica. Luego de este tiempo, el valor de la DQO permaneció aproximadamente constante, como lo demuestran

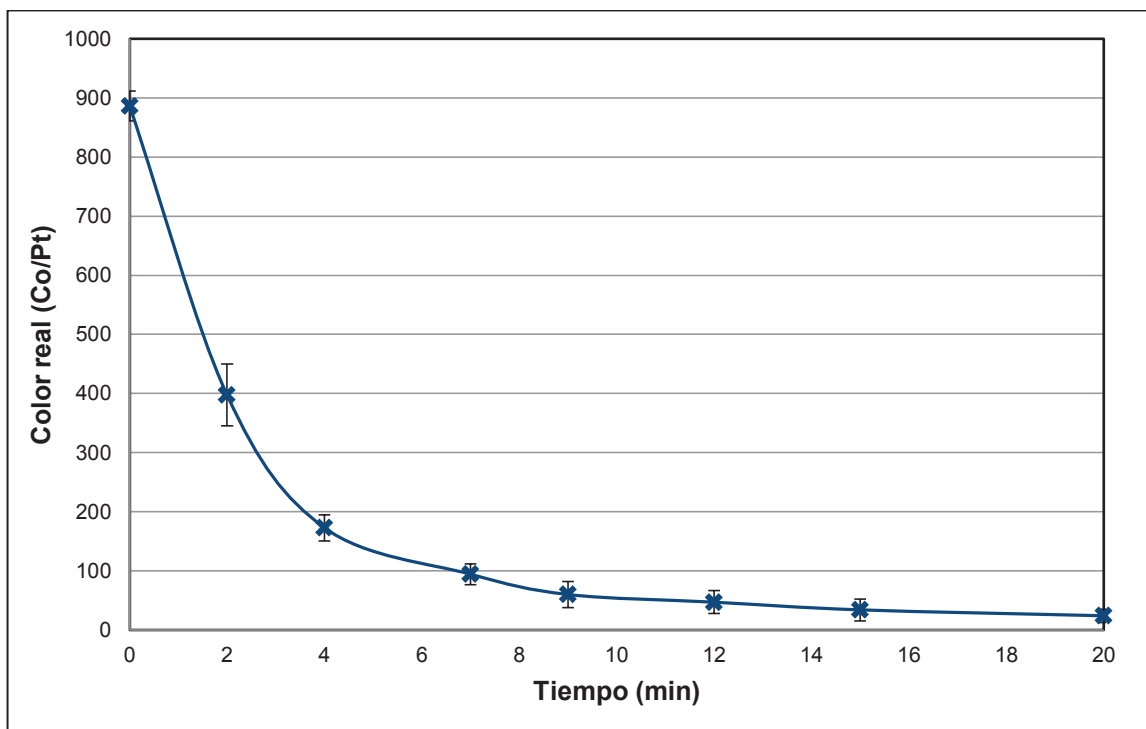
los análisis estadísticos presentados en la Figura AIII.11 del Anexo III. Se estableció, entonces, que el tiempo de residencia en el reactor que permitía una adecuada remoción de los contaminantes en el efluente real fue de 9 min.

### 3.3.1.2 Color real

Los resultados obtenidos de la variación del color real en el efluente, cuando fue sometido al tratamiento electro-Fenton con una corriente de 10 A se presentan en la Tabla 3.13 y en la Figura 3.9.

**Tabla 3.13** Variación del color real al aplicar el tratamiento electro-Fenton al efluente real en modalidad batch  
(I = 10 A, pH=3)

Tiempo (min)	Color real (Co/Pt)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	890	910	894	899 ± 10,1	0,0
2	347	452	394	398 ± 52,6	55,7
4	158	198	163	173 ± 21,9	80,7
7	75	110	98	94 ± 17,7	89,5
9	35	75	70	60 ± 21,8	93,3
12	25	61	55	47 ± 19,2	94,7
15	15	52	35	34 ± 18,5	96,2
20	13	35	24	24 ± 11,0	97,3



**Figura 3.9** Disminución del color real en el efluente en un tratamiento electro-Fenton en modalidad batch  
( $I = 10$  A,  $pH=3$ )

Los resultados presentados en la Figura 3.9 muestran un decrecimiento del color real de 93 % en 9 min de tratamiento con una corriente eléctrica de 10 A. Se realizó el análisis estadístico de estos datos, el cual se presenta en la Figura AIII.12 del Anexo III. Se determinó que a partir de los 7 min de tratamiento no existieron diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza) para la reducción de este parámetro en modalidad batch.

En el tratamiento del efluente real en modalidad batch, se pudo observar una rápida disminución del color debido a la degradación de los grupos cromóforos, en este caso los grupos azoicos. La presencia de hidróxidos y complejos férricos se hizo notoria en el color amarillento de la solución final; sin embargo, estos pudieron ser separados con una filtración, después de la cual se observó un tono prácticamente transparente en el efluente tratado a los 9 min. La evidencia de la formación de precipitados, sirvió para establecer la necesidad de instalación de un filtro para separar los sólidos insolubles presentes en el efluente en el diseño de la planta de tratamiento.

La legislación ecuatoriana no define valores específicos de color real que se deban cumplir para descargas a cuerpos de agua dulce; solo se menciona que en la descarga del efluente, el color real debe ser imperceptible en dilución 1/20. Sin embargo, en el apartado correspondiente a agua destinada para el consumo humano y uso doméstico, se menciona que el valor del parámetro debe ser menor a 100 Co/Pt, El valor alcanzado en la presente investigación fue de 60 Co/Pt a los 9 min de tratamiento en modalidad batch, el cual cumple con la normativa ecuatoriana. Los valores alcanzados confirman que el proceso electro-Fenton fue eficiente para reducir el parámetro color real. (TULSMA, 2005, p. 7)

### 3.3.1.3 Variación del TOC, DBO<sub>5</sub>, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos

Los resultados obtenidos de la caracterización del efluente real tratado en el sistema electro-Fenton, en modalidad batch, se muestran en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14** Variación de los parámetros DQO, TOC, DBO<sub>5</sub>, color real, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos al inicio del proceso y a los 9 min de tratamiento en el sistema electro-Fenton, modalidad batch  
(I = 10 A)

Parámetro	Limite permisible	Valor inicial promedio*	Valor final promedio* (9 min)	Cumple norma	Remoción (%)
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	250	513	186	SI	64
TOC (mg O <sub>2</sub> /L)	-	191	130	-	32
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	100	109	88	SI	16
Color real (Co/Pt)	Inapreciable en dilución 1/20	965	60	SI	94
Turbidez (NTU)	100	152	28	SI	83
Sólidos totales (mg/L)	1 600	1 833	1 350	SI	26
Sólidos solubles (mg/L)	-	1 544	360	-	77

\* $\bar{x} \pm \sigma$  (n = 3)

Se observa que, después del tratamiento aplicado, todos los parámetros en estudio cumplen la normativa ambiental vigente. La relación  $DBO_5/DQO$  calculada con los datos de la Tabla 3.14, que refleja la biodegradabilidad del efluente, alcanzó un valor de 0,47, el cual permite inferir que se podría realizar un tratamiento biológico posterior, en caso de ser necesario (Aboulhassan et al., 2008, p.14).

Los resultados obtenidos, en el tratamiento en modalidad batch, corroboran la elección del tiempo de tratamiento de 9 min, puesto que los parámetros en estudio alcanzaron valores dentro de norma, en este período de tiempo.

### **3.3.2 ESTUDIO EN MODALIDAD CONTINUA**

Se trató el efluente en modalidad continua; las condiciones se establecieron con base en los resultados obtenidos en el tratamiento en modalidad batch, para fijar el tiempo de residencia del efluente en el reactor.

Los valores de los parámetros fijados para el tratamiento en modalidad continua se detallan en la Tabla 2.3.

#### **3.3.2.1 Determinación del flujo de trabajo**

En la sección 3.3.2 se determinó que un tiempo de residencia del efluente en el reactor de 9 min permitió que los parámetros en estudio alcanzaran valores que cumplan la normativa ambiental vigente. Con base en este dato, se eligieron tres flujos de trabajo de 60, 70 y 85 mL/min. Los resultados obtenidos en cuanto a la disminución de la DQO se presentan en las Tablas 3.15, 3.16 y 3.17 y en la Figura 3.10.



**Tabla 3.15** Variación de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 60 mL/min)

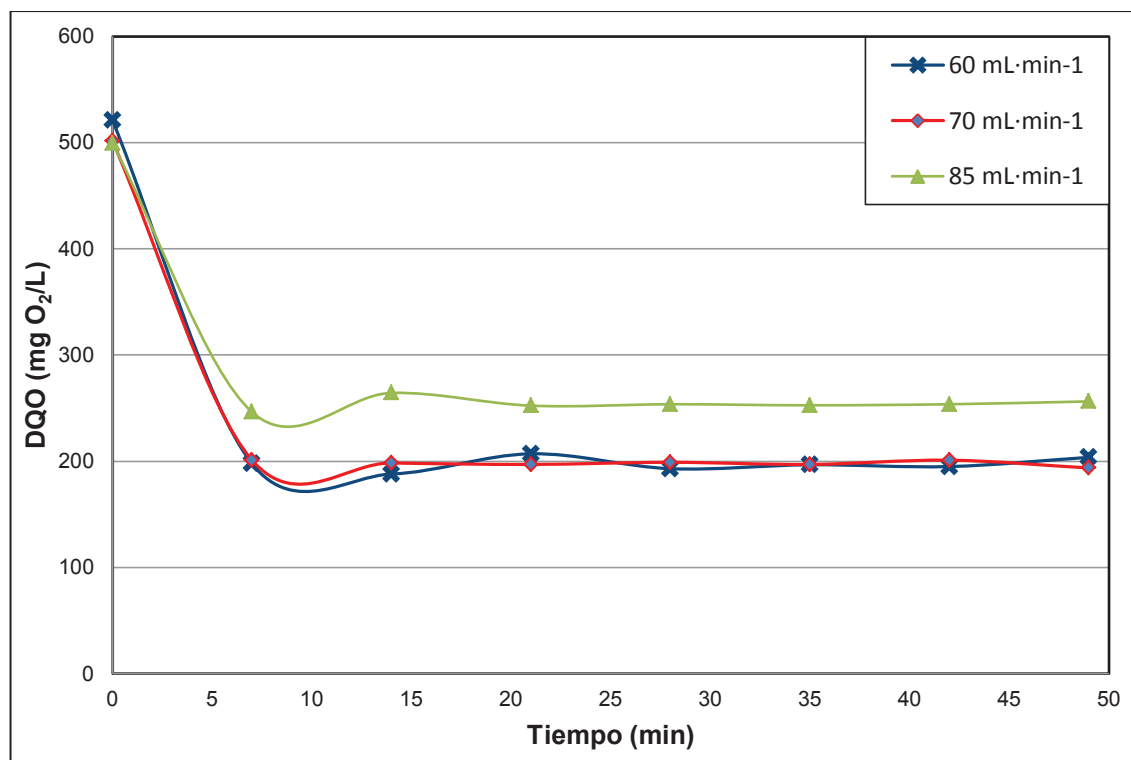
Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	537	519	507	521 ± 15	0,0
7	196	205	192	197 ± 07	62,0
14	198	179	187	188 ± 10	63,9
21	213	207	201	207 ± 06	60,2
28	201	189	189	193 ± 07	62,9
35	202	197	191	196 ± 06	62,2
42	185	193	207	195 ± 11	62,5
49	199	202	210	203 ± 06	60,9

**Tabla 3.16** Disminución de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)

Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	505	501	498	501 ± 04	0,0
7	205	207	191	201 ± 09	59,9
14	197	194	204	198 ± 05	60,4
21	195	193	203	197 ± 05	60,7
28	193	207	197	199 ± 07	60,3
35	201	209	181	197 ± 14	60,7
42	203	197	203	201 ± 03	59,9
49	189	187	205	194 ± 10	61,3

**Tabla 3.17** Disminución de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 85 mL/min)

Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	501	487	510	499 ± 12	0,0
7	231	241	267	246 ± 19	50,6
14	238	273	282	264 ± 23	47,0
21	245	237	275	252 ± 20	49,4
28	261	245	255	254 ± 08	49,2
35	251	236	271	253 ± 18	49,4
42	247	237	277	254 ± 21	49,2
49	265	241	263	256 ± 13	48,6



**Figura 3.10** Monitoreo del parámetro DQO del efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 60, 70 y 85 mL/min)

Con base en los resultados de la medición de la DQO, se realizó un análisis estadístico de varianza simple, mediante el cual se logró determinar que los flujos de 60 y 70 mL/min no presentaron diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza) en cuanto a la disminución de la DQO. Este no fue el caso para el tratamiento a 85 mL/min, el cual si presentó diferencias estadísticamente significativas tanto con el tratamiento a 60 mL/min, como con el tratamiento a 70 mL/min. Los resultados del análisis estadístico se presentan en la Figura AIII.13 del Anexo III.

El flujo de 85 mL/min no permitió obtener valores de DQO que cumplieran la norma. Los tratamientos realizados en condiciones de flujo de 60 y 70 mL/min generaron efluentes con parámetros dentro de la normativa ambiental vigente. Además, gracias al análisis estadístico de los datos de DQO para ambos flujos, se pudo determinar que no existieron diferencias significativas entre los valores a lo largo del tiempo; por este motivo, la elección correspondió al flujo equivalente a una mayor velocidad de procesamiento de efluente, el mismo que correspondió a 70 mL/min. Con este valor de flujo, los resultados obtenidos del decrecimiento de la DQO en modalidad continua se asemejan a los que se obtuvieron en el tratamiento en modalidad batch del efluente real.

### **3.3.2.2 Constatación del estado estacionario en el tratamiento en modalidad continua**

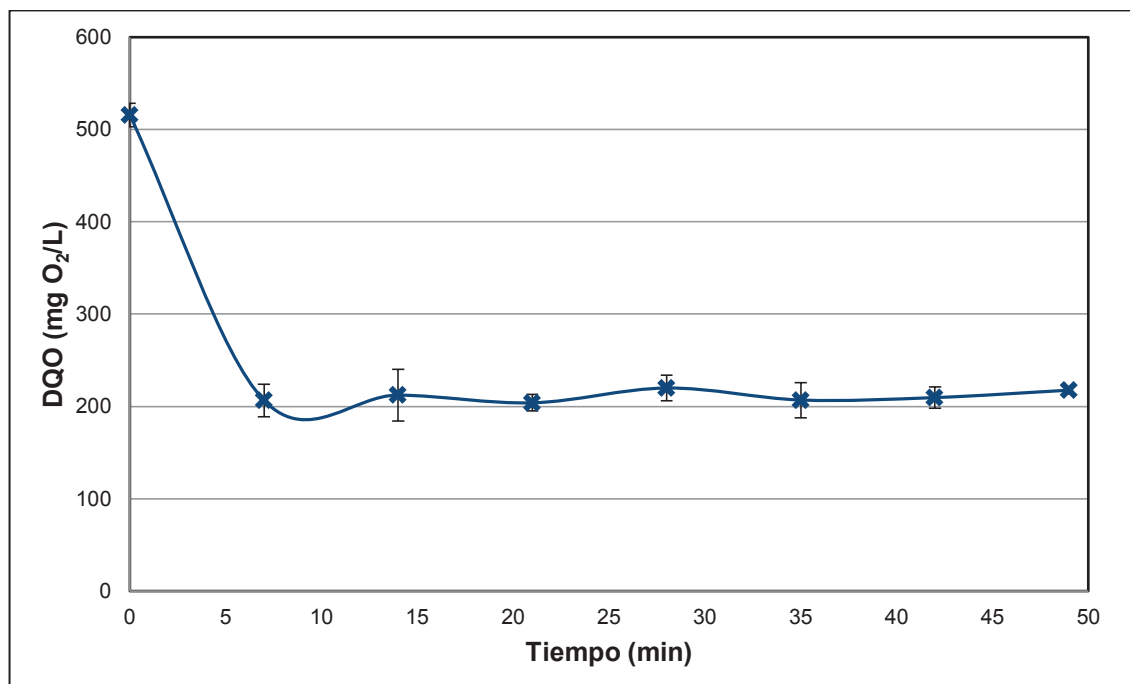
Con base en la selección del flujo de trabajo, presentada en la sección 3.3.2.1, se procedió a medir los valores de los parámetros DQO y color real durante 50 min de tratamiento en el proceso electro-Fenton en modalidad continua, con la finalidad de constatar el estado estacionario del sistema. Los resultados se muestran en las Tablas 3.18 y 3.19 y en las Figuras 3.11 y 3.12.

**Tabla 3.18** Comportamiento de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)

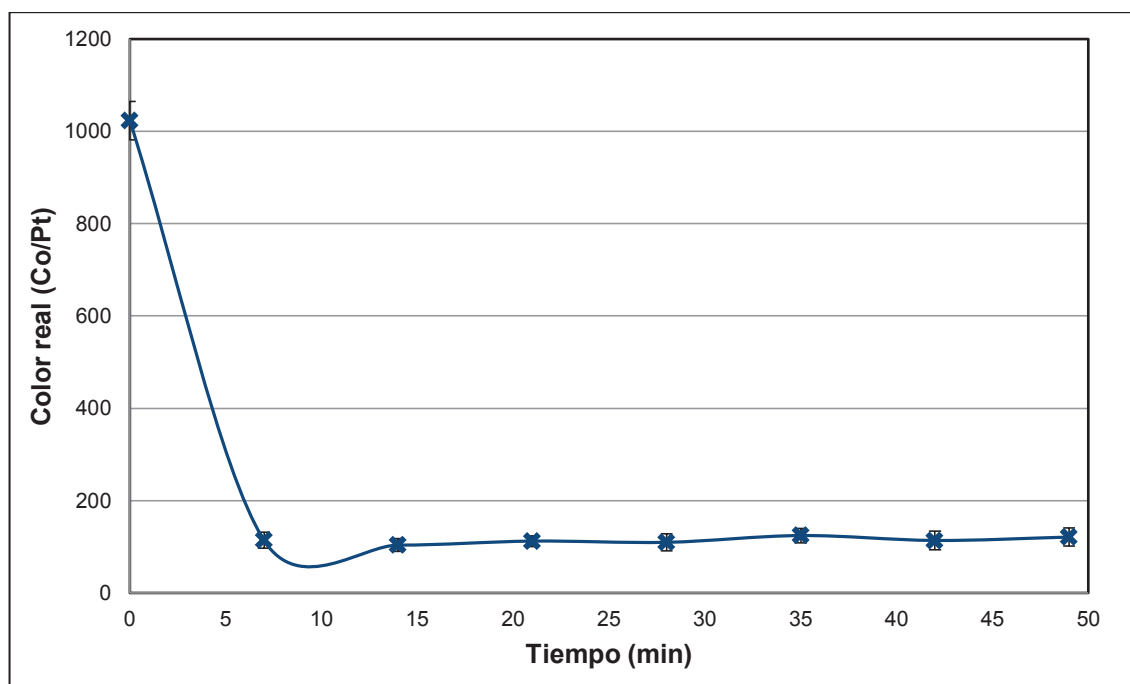
Tiempo (min)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	518	527	502	516 ± 13	0,0
7	212	221	187	207 ± 18	59,9
14	244	202	191	212 ± 28	58,8
21	213	195	204	204 ± 09	60,4
28	235	208	217	220 ± 14	57,3
35	227	205	189	207 ± 19	59,8
42	220	212	197	210 ± 12	59,3
49	222	216	215	218 ± 04	57,7

**Tabla 3.19** Comportamiento del color real en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua  
(I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)

Tiempo (min)	Color real (Co/Pt)				Remoción (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	990	1070	1010	1023 ± 42	0,0
7	97	115	131	114 ± 17	88,8
14	91	102	119	104 ± 14	89,8
21	105	107	126	113 ± 12	88,9
28	110	91	129	110 ± 19	89,2
35	120	112	142	125 ± 16	87,8
42	105	100	137	114 ± 20	88,8
49	102	121	141	121 ± 20	88,1



**Figura 3.11** Monitoreo de la DQO en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)



**Figura 3.12** Monitoreo del parámetro color real en el efluente real al ser sometido a tratamiento en el sistema electro-Fenton en modalidad continua (I = 10 A, Flujo = 70 mL/min)

Se realizó un análisis estadístico para cada uno de los parámetros en estudio, las gráficas de medias se presentan en las Figuras AIII.14 y AIII.15. Se constató que no existieron diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza) entre los datos tomados a los distintos tiempos de tratamiento; esto permitió comprobar la estacionalidad del sistema en un tratamiento en modalidad continua.

La DQO se mantuvo en valores cercanos a 210 mg O<sub>2</sub>/L, valor que confirma el cumplimiento de la norma ecuatoriana. La remoción de la DQO alcanzó valores cercanos al 60 %. El parámetro color real alcanzó valores aproximados a 100 Co/Pt.

### 3.4 DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO QUE CONSIDERE EL SISTEMA APLICADO A UNA INDUSTRIA DEL CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, PARA EL TRATAMIENTO DE UN FLUJO DE 3 m<sup>3</sup>/DÍA

#### 3.4.1 DISEÑO DEL REACTOR ELECTRO-FENTON

En la Tabla 3.20, se presentan las dimensiones del reactor electro-Fenton utilizado en los experimentos, a escala de laboratorio. Estos parámetros sirvieron como referencia para el diseño a escala piloto de una planta de tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR.

**Tabla 3.20** Dimensiones del reactor electro-Fenton utilizado en la experimentación a escala de laboratorio

Dimensión	Simbología	Magnitud (m)
Altura total del reactor	H	0,152
Nivel del efluente en el reactor	H	0,105
Longitud del reactor	L	0,095
Ancho del reactor	A	0,092
Altura efectiva de los electrodos	$h_e$	0,071
Espesor de los electrodos	$e_e$	0,003
Ancho de los electrodos	$a_e$	0,092

##### 3.4.1.1 Volumen total del reactor electro-Fenton a escala de laboratorio

El volumen total del reactor electro-Fenton ( $V_T$ ) se calculó a partir de la Ecuación AIV.1 del Anexo IV, con base en las dimensiones detalladas en la Tabla 3.21.

$$V_T = 0,00133 \text{ m}^3 = 1,33 \text{ L}$$

#### **3.4.1.2 Volumen efectivo del reactor electro-Fenton a escala de laboratorio**

El volumen efectivo del reactor electro-Fenton ( $V_{ef}$ ) se calculó a partir de la Ecuación AIV.2 del Anexo IV, con base en las dimensiones detalladas en la Tabla 3.21.

$$V_{ef} = 0,00092 \text{ m}^3 = 0,92 \text{ L}$$

#### **3.4.1.3 Volumen ocupado por los electrodos**

El volumen ocupado por los electrodos ( $V_e$ ) se calculó a partir de la Ecuación AIV.3 del Anexo IV, con base en las dimensiones detalladas en la Tabla 3.21.

$$V_e = 0,06 \text{ L}$$

#### **3.4.1.4 Volumen del reactor ocupado por el efluente**

El volumen ocupado por el efluente a tratar se calculó a partir de la Ecuación AIV.4 del Anexo IV, con los valores obtenidos en las secciones 3.4.1.2 y 3.4.1.3.

$$V_w = 0,86 \text{ L}$$

#### **3.4.1.5 Dimensionamiento del reactor electro-Fenton a escala piloto**

Las relaciones entre las dimensiones del reactor electro-Fenton a escala de laboratorio se presentan en la Tabla 3.21, las mismas que sirven como base para el escalado en el diseño del reactor piloto.



**Tabla 3.21** Relación de dimensiones en el reactor electro-Fenton del sistema a escala de laboratorio

Relación	Simbología	Valor
Volumen de efluente a tratar sobre volumen efectivo	$V_w/V_{ef}$	0,93
Volumen efectivo sobre volumen total del reactor	$V_{ef}/V_T$	0,69
Largo sobre ancho del reactor	$l/a$	1,03
Altura total sobre ancho del reactor	$H/a$	1,65
Altura efectiva sobre ancho del reactor	$h/a$	1,14

A partir de las relaciones presentadas en la Tabla 3.21, se obtuvo el volumen y las dimensiones del reactor electro-Fenton a escala piloto para el tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR de acuerdo con los cálculos que se detallan a continuación.

Se definió el caudal de diseño, para el cual se consideró un sobredimensionamiento de seguridad del 35 % ( $f_s$ ) (Crites y Tchobanoglous, 2002, pp. 229-230).

$$Q_p = 4,05 \frac{m^3}{día}$$

Para el cálculo del volumen del reactor, se utilizó la Ecuación AIV.5, presentada en el Anexo IV.

El volumen del reactor de la planta piloto tendrá un volumen de:

$$V_w = 0,0764 m^3 = 76,4 L$$

Con el volumen del reactor a escala piloto y las relaciones presentadas en la Tabla 3.21 se calcularon las dimensiones del reactor electro-Fenton para el

tratamiento de los efluentes provenientes de la empresa PAREDSUR. Los resultados se detallan en la Tabla 3.22.

**Tabla 3.22** Dimensiones del reactor electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes provenientes de la descarga de la empresa PAREDSUR

Parámetro	Simbología	Valor
Volumen efectivo	$V_{ef}$	76,4 L
Volumen total	$V_T$	110,6 L
Largo	L	0,43 m
Ancho	A	0,41 m
Altura total	H	0,68 m
Altura efectiva	$H_e$	0,47 m

### 3.4.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS

Con los datos obtenidos del reactor a escala de laboratorio que se muestran en la Tabla 3.20 y las relaciones determinadas en la Tabla 3.21, se dimensionaron los electrodos a ser utilizados en la planta piloto de tratamiento para la empresa PAREDSUR. Estos datos se muestran en la Tabla 3.23.

**Tabla 3.23** Dimensiones de los electrodos del reactor electro-Fenton utilizado para el tratamiento de los efluentes provenientes de la empresa PAREDSUR

Parámetro	Simbología	Valor (m)
Altura efectiva	$h_e$	0,32
Espesor	$e_e$	0,01
Ancho	$a_e$	0,41

Un resumen con las medidas del reactor electro-Fenton y los electrodos que se utilizarán en el dimensionamiento del sistema de tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR se presenta en la Tabla 3.24.

**Tabla 3.24** Dimensiones del reactor electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR

<b>DIMENSIONES DEL REACTOR (m)</b>	Largo	0,43
	Ancho	0,41
	Altura	0,68
<b>DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS (m)</b>	Largo	0,32
	Ancho	0,01
	Altura	0,41

### **3.4.3 DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA NECESARIA PARA EL REACTOR ELECTRO-FENTON A ESCALA PILOTO**

Con la Ecuación AIV.6, presentada en el Anexo IV, se calculó la densidad de corriente utilizada en el sistema a escala de laboratorio. Con base en este dato y el área de los electrodos del reactor a escala piloto, se calculó la intensidad de corriente eléctrica necesaria para el reactor electro-Fenton.

$$I = 100,42 \text{ A}$$

### **3.4.4 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ACONDICIONAMIENTO CON CHAQUETA DE CALENTAMIENTO Y DE REGULACIÓN DE pH**

Se dimensionó un tanque cilíndrico construido en acero inoxidable. Se utilizó la Ecuación AV.1, presentada en el Anexo V, para determinar el volumen del tanque, con una capacidad de almacenamiento para dos días de descarga. Si se considera un diseño con el triple de alto que de diámetro, recomendado para tanques que trabajan a menos de 250 psi (Esquivel, 200, p.67), se determinó el volumen del tanque de acondicionamiento, que se presenta a continuación.

$$V_{TA} = 4,05 \text{ m}^3$$

Las dimensiones del tanque reservorio se presentan resumidas en la Tabla 3.25:

**Tabla 3.25** Dimensiones del tanque de acondicionamiento previo al tratamiento electro-Fenton

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
Material de construcción	Acero inoxidable
Diámetro	1,51 m
Altura	4,53 m

### 3.4.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL EFLUENTE

Los cálculos para el dimensionamiento de un tanque aislado de provisión de agua caliente se realizaron mediante la Ecuación AV.2, presentada en el Anexo V. El tanque tiene una capacidad de almacenamiento de 3 m<sup>3</sup> y tiene el triple de alto que de diámetro, como se recomienda para tanques que trabajan a menos de 250 psi (Esquivel, 299, p.67).

Las dimensiones del tanque de calentamiento se presentan en la Tabla 3.26.

**Tabla 3.26** Dimensiones del tanque de calentamiento de agua

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
Material de construcción	Acero inoxidable
Diámetro (m)	1,08
Altura (m)	3,24

### 3.4.6 DIMENSIONAMIENTO DE LAS PISCINAS DE NEUTRALIZACIÓN

Se dimensionaron las piscinas de neutralización mediante los cálculos que se presentan en el Anexo V. Las medidas de las piscinas de neutralización se calcularon con dimensiones iguales de largo, ancho y altura (Sainz, 2005, p. 337). Las dimensiones determinadas se presentan en la Tabla 3.27.

**Tabla 3.27** Dimensiones de las piscinas de neutralización

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (m)</b>
Largo	1,59
Ancho	1,59
Profundidad	1,59

### 3.4.7 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE FILTRADO

Se diseñó el sistema de filtrado de arena necesario en el proceso electro-Fenton. Se determinó tanto el área de filtrado como el número de filtros según las ecuaciones AV.4 y AV.5 presentadas en el Anexo V. En la Tabla 3.28 se resumen las dimensiones del tanque de filtración y el número de filtros.

**Tabla 3.28** Dimensiones del tanque de filtración y número de filtros

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Ancho (m)	0,65
Largo (m)	1,30
Altura (m)	1,75
Número de filtros	1

### 3.4.8 DIMENSIONAMIENTO DEL LECHO DE SECADO DE LODOS

En el diseño del lecho de secado de lodos se utilizaron las Ecuaciones AV.6, AV.7, AV.8 y AV.9, para el cálculo del área de secado.

$$A_{\text{sec}} = 0,35 \text{ m}^2$$

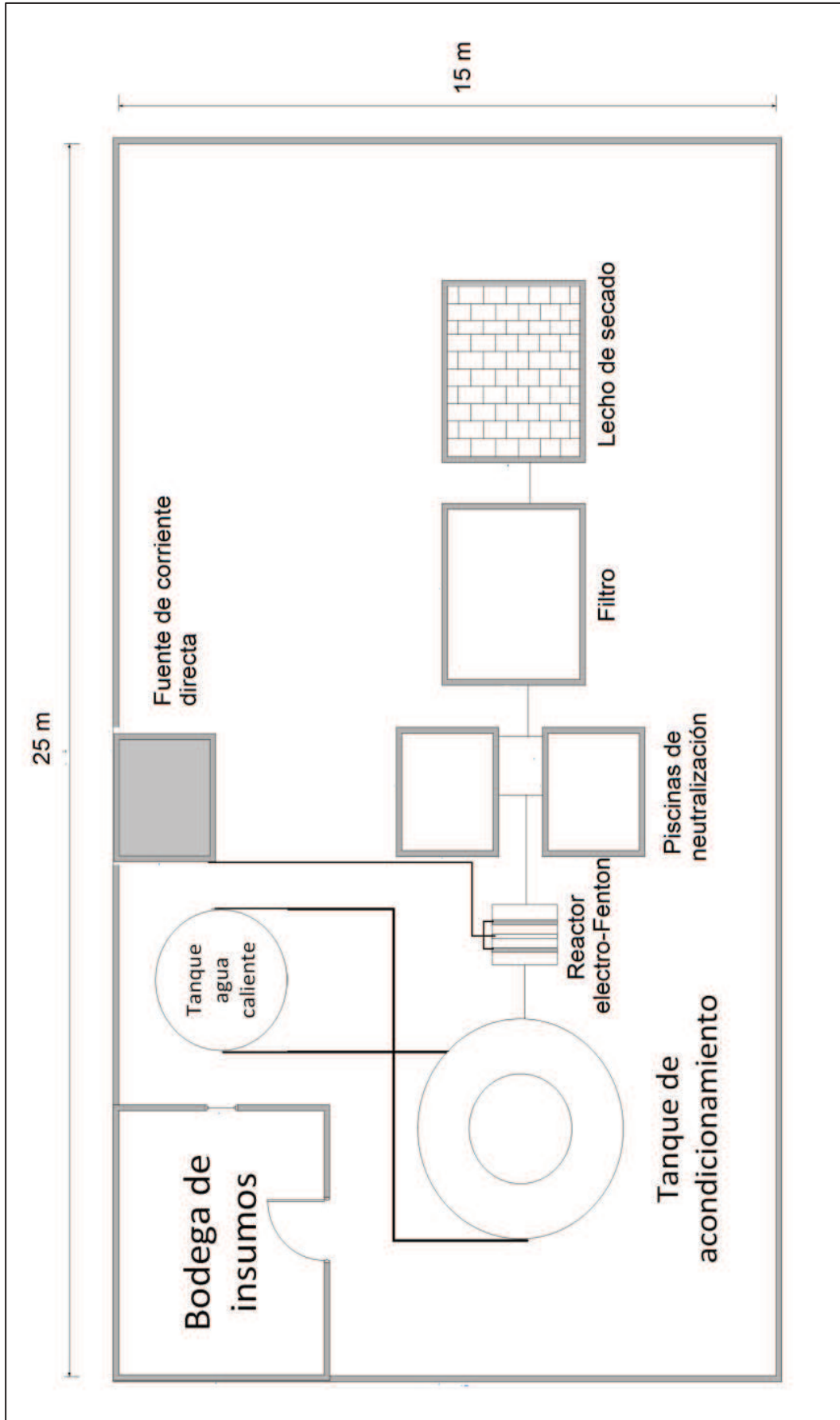
Con el área de secado se procedió al dimensionamiento del lecho. Las ecuaciones utilizadas se presentan en el Anexo V. Las dimensiones del lecho de secado se detallan en la Tabla 3.29

**Tabla 3.29** Dimensiones del lecho de secado

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
Ancho (m)	0,41
Largo (m)	0,82
Medio de soporte	Ladrillos de 15 cm de altura
Espesor capa de arena (m)	0,20
Espesor capa de grava (m)	0,20

#### **3.4.8.1 Vista en planta del sistema de tratamiento de efluentes electro-Fenton para la empresa PAREDSUR**

El sistema de tratamiento de efluentes de la empresa PAREDSUR se muestra en la Figura 3.14, mediante su vista en planta.



**Figura 3.13** Vista en planta del sistema de tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR

### 3.5 ANÁLISIS DE COSTOS PRELIMINAR

#### 3.5.1 COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRO-FENTON PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA EMPRESA PAREDSUR

##### 3.5.1.1 Costo del reactor electro-Fenton

Los costos de la implementación del reactor electro-Fenton se pueden dividir en los costos de la implementación física y el costo de los electrodos y provisión de energía eléctrica. El detalle de costos de la implementación física se presenta en la Tabla 3.30.

**Tabla 3.30** Costos de implementación física del reactor electro-Fenton

Concepto	Costo (USD)
Excavación, recubrimiento de concreto con aditamentos para la ubicación de electrodos, cableado y mano de obra	1 200
Fuente de corriente continua*	7 500
<b>TOTAL</b>	<b>8 700</b>

\*(Peipower, 2014, p.4)

Los costos generados en la implementación física del reactor y la adquisición de una fuente de corriente eléctrica continua son de 8 700 USD. El 86 % de los costos corresponden a la adquisición de una fuente de corriente trifásica continua.

Además, es necesaria la adquisición de los electrodos para el proceso electroquímico. Los volúmenes de los electrodos fueron calculados según las dimensiones detallados en la Tabla 3.24. El costo del ánodo de titanio se obtuvo gracias la empresa Roberto Cordes mientras que los cátodos de grafito se presupuestaron por la empresa Ecuacarbones. Un resumen de los costos de adquisición de los electrodos se presenta en la Tabla 3.31.



**Tabla 3.31** Costo de los electrodos para el reactor electro-Fenton

<b>Concepto</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo (USD)</b>
Ánodo de titanio recubierto de platino	0,000394	13 120
Cátodos de grafito	0,0624	1 050
<b>TOTAL</b>		<b>14 170</b>

La Tabla 3.31 presenta los costos de los electrodos para el reactor electro-Fenton. El 92,59 % del costo total corresponde al ánodo de titanio recubierto de platino, esto se debe a que en la industria siderúrgica del país no es posible la adquisición de este material y el costo calculado corresponde al presupuestado en el caso de importación. Los gastos en que se debe incurrir para la adquisición de los electrodos, equiparan a los utilizados para la implementación física del reactor.

### 3.5.1.2 Costo de equipos complementarios

Para la instalación del sistema de tratamiento de efluentes, además del reactor electro-Fenton, se necesita la implementación de un sistema de filtración, un tanque pulmón de efluentes, la construcción de dos piscinas de neutralización y un lecho de secado de lodos.

Los costos de adquisición del tanque reservorio de acero inoxidable y del tanque con serpentín de calentamiento fueron obtenidos de proformas provenientes de la empresa Hidroagua S.A., mientras que los costos de construcción de las piscinas de neutralización, lechos de filtrado y secado se obtuvieron de proformas de la empresa CVA. Un resumen de los gastos en los que se incurre se presenta en la Tabla 3.32.

**Tabla 3.32** Costos de implementación de equipos complementarios

<b>Cantidad</b>	<b>Concepto</b>	<b>Costo unitario (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
2	Tanque reservorio primario de acero inoxidable con chaqueta de calentamiento	2 500	5 000
2	Bomba centrífuga	2 000	4 000
1	Tanque con serpentín de calentamiento	3 500	3 500
1	Bomba con control automático	3 000	3 000
2	Piscinas de neutralización	500	1 000
1	Tanque de filtrado y materiales para el filtro de arena	850	850
1	Lecho de secado y materiales necesarios	670	670
-	Accesorios (válvulas, tubería)	750	750
<b>TOTAL</b>			<b>18 770</b>

El costo de implementación de los procesos complementarios asciende a 18 770 USD. El costo total de la instalación del sistema de tratamiento de efluentes de la empresa PAREDSUR se calculó mediante la Ecuación 3.1.

$$C_{\text{instalación}} = C_{\text{imp. física}} + C_{\text{electrodos}} + C_{\text{sist. complementarios}} \quad [3.1]$$

$$C_{\text{instalación}} = 8\,700 \text{ USD} + 14\,170 \text{ USD} + 18\,770 \text{ USD}$$

$$C_{\text{instalación}} = 41\,640 \text{ USD}$$

### 3.5.1.3 Capital de trabajo:

Se consideraron los costos de adquisición de los reactivos en forma mensual. Además, los costos correspondientes a energía eléctrica se calcularon con los datos de las potencias de la bomba y de la fuente de corriente continua. Se

consideró un trabajo de 8 h al día con un uso total de 240 h al mes. Finalmente, se consideró la necesidad de la contratación de un trabajador encargado de la operación de la planta y su limpieza.

En la Tabla 3.33 se resumen los gastos por concepto de capital mensual de trabajo. Los costos de reactivos fueron obtenidos de proformas provistas por la empresa Asoquim S.A., distribuidora de productos químicos para la industria ecuatoriana.

**Tabla 3.33** Costos del capital de trabajo

Detalle	Costo	Gasto mensual	Costo mensual (USD)
Ácido sulfúrico	0,86 USD/L	10 L	4,30
Sosa cáustica	0,91 USD/kg	10 kg	4,50
Sulfato ferroso heptahidratado	0,35 USD/kg	1,89 kg	0,67
Energía eléctrica	0,051 USD/kWh	51,54 kWh	630,85
Sueldo empleado (incluido seguro y bonificaciones)			400,00
<b>TOTAL</b>			<b>1 195,62</b>

### 3.5.2 COSTO DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE

Con los datos obtenidos en la sección 3.5.1, que corresponden a los costos de implementación del sistema de tratamiento de efluentes, fue posible calcular el costo de tratamiento por metro cúbico. Se realizaron las siguientes consideraciones (Méndez, 2012, p. 247):

- Duración del proyecto: 10 años a partir de la fecha de inicio de operación.
- Costo de salvamento de los activos fijos: 20 % del costo inicial.
- El valor de salvamento relacionado con la construcción de tanques y piscinas es cero al final del proyecto.

- Se considera que el terreno empleado actualmente forma parte del espacio que utiliza la fábrica, lo que implica no incurrir en este gasto.
- Se considera una operación de 12 meses al año y 30 días de trabajo al mes.
- Se considera un cambio anual de los cátodos de grafito y que el ánodo de titanio recubierto de platino funciona los 5 años de duración del proyecto.
- Los costos de activos fijos y equipos se obtuvieron de datos provistos por empresas comercializadoras de equipos para plantas de tratamiento de efluentes.

Los costos asociados al tratamiento del efluente se detallan en las Tabla 3.34, 3.35 y 3.36.

**Tabla 3.34** Detalle de costos de los activos fijos del sistema de tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR  
(Duración del proyecto = 10 años)

<b>Detalle</b>	<b>Costo anual (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
Reactor electro-Fenton	1 200,00	1 200,00
Fuente de corriente eléctrica	7 500,00	7 500,00
Ánodo de titanio platinizado	13 120,00	13 120,00
Cátodos de grafito	1 050,00	5 250,00
Tanque reservorio primario de acero inoxidable con chaqueta de calentamiento	2 500,00	5 000,00
Bomba centrífuga	2 000,00	4 000,00
Tanque con serpentín de calentamiento	3 500,00	3 500,00
Bomba con control automático	3 000,00	3 000,00
Piscinas de neutralización	500,00	1 000,00
Tanque de filtrado y materiales para el filtro de arena	850,00	850,00
Lecho de secado y materiales necesarios	670,00	670,00
Accesorios (válvulas, tubería)	750,00	750,00
<b>TOTAL ACTIVOS FIJOS</b>		<b>39 340,00</b>

**Tabla 3.35** Detalle de costos del capital de trabajo del sistema de tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR

<b>Detalle</b>	<b>Costo anual (USD)</b>	<b>Costo total (USD)</b>
Ácido sulfúrico	51,60	516,00
Sosa caústica	54,00	540,00
Sulfato ferroso heptahidratado	8,04	80,40
Energía eléctrica	7 570,20	75 702,00
Sueldo empleado	4 800,00	48 000,00
<b>TOTAL CAPITAL DE TRABAJO</b>		<b>124 838,40</b>

**Tabla 3.36** Detalle de costos de implementación del sistema de tratamiento electro-Fenton para los efluentes de la empresa PAREDSUR

Total activos fijos	39 340,00
Total capital de trabajo	124 838,40
<b>TOTAL EGRESOS</b>	<b>164 178,40</b>
Recuperación de salvamento	- 8 674,00
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>155 504,40</b>
Volumen de efluente tratado (5 años de tratamiento)	10 800
<b>COSTO POR METRO CÚBICO (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>14,39</b>

El costo total de activos alcanzó el valor de 39 340 USD, mientras que el capital de trabajo tuvo un costo más alto, de 124 838,40 USD, debido principalmente a los gastos en que se incurre por consumo de energía eléctrica. El análisis de costos arrojó que se invierten 14,39 USD por m<sup>3</sup> de efluente tratado.

Gran parte de los costos generados por el proceso electro-Fenton se deben al consumo de energía eléctrica y a la adquisición de los electrodos. El uso de materiales alternativos como carbón activado, en el caso del cátodo, puede mejorar la generación de peróxido de hidrógeno con un menor consumo eléctrico. Además, se podrían utilizar mallas de titanio recubierto de platino, como ánodo, que podrían disminuir significativamente el costo de adquisición de los activos fijos (Jiang & Zhang, 2007, pp. 1120, 1121).

Estudios similares sugieren que los costos generados por el proceso electro-Fenton son mayores que los generados por sus similares Fenton y foto-Fenton. Sin embargo, el tiempo que se necesita para la degradación de contaminantes con la alimentación de corriente eléctrica es considerablemente menor. De esta forma, el proceso electro-Fenton, a pesar de su alto costo, es competitivo debido a los bajos tiempos de tratamiento que supone para lograr la misma remoción de contaminantes (Priambodo, Shih, Huang y Huang, 2010, p. 392).

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

1. La caracterización del efluente real, proveniente de la empresa PAREDSUR, permitió establecer que los valores de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, color real, turbidez y sólidos totales se encontraban sobre los establecidos en la norma ambiental vigente TULSMA.
2. En el tratamiento de las soluciones de los colorantes puros azul BRI, pardo LEGL, negro 22 y su mezcla, en un sistema electro-Fenton, se determinó que el valor de corriente que permitió obtener los mejores resultados fue de 10 A y el tiempo de tratamiento de 9 min. La remoción de color fue del 95 % para los colorantes azul y pardo. Con la solución en la que se mezclaron los tres colorantes, se consiguió una remoción del color real del 95 %.
3. Para el efluente real, en condiciones batch, se determinó un tiempo de residencia de 9 min para la remoción de los contaminantes a valores bajo la norma. Los mejores resultados correspondieron a una disminución de la DQO en un 63 % y del color real en un 95 %.
4. Se estudiaron tres valores de flujo de trabajo en modalidad continua. El valor de 70 mL·min<sup>-1</sup> permitió la disminución de los parámetros a valores dentro de la norma en el menor tiempo. Se constató el estado estacionario del sistema con este valor de flujo.
5. En el diseño propuesto para el proceso básico electro-Fenton para la planta de tratamiento de efluentes de la empresa PAREDSUR se incluyó un reactor electro-Fenton de 76,4 L de capacidad, un filtro de arena, dos piscinas de neutralización, una marmita, un lecho de secado de lodos y las bombas y accesorios necesarios en el sistema.

6. El costo total aproximado de implementación de este proceso fue de 39 340,00 USD para los activos fijos, 124 838,40 USD para el capital de trabajo y un costo global de 164 178,40 USD para un proyecto a 10 años. El montaje del sistema electro-Fenton en función del volumen tratado tuvo un costo de 14,39 USD/m<sup>3</sup> tratado.



## 4.2 RECOMENDACIONES

1. Diseñar una planta de tratamiento para un flujo de efluente que contenga las aguas residuales de al menos 20 empresas artesanales de la zona, lo que permitiría disminuir el costo por metro cúbico y la contribución que cada empresario debe hacer para la planta.
2. Realizar un estudio que incluya la implementación de un sistema de enfriamiento en el reactor, como una chaqueta o un serpentín, con la finalidad de evitar el sobrecalentamiento de la solución en el reactor. Esto podría permitir trabajar con valores de corriente eléctrica más altos y ayudaría en el procesamiento de flujos mayores.
3. Estudiar el uso de otros materiales como ánodo y cátodo. En el caso del ánodo se podrían usar mallas de platino o rubidio y boro dopado con diamante. Como cátodos se sugieren materiales porosos como láminas de carbón activado.
4. Estudiar la implementación de un reactor tubular con adaptación para los electrodos, de tal manera que se pueda estudiar un perfil de concentraciones en un proceso continuo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C., Estados Unidos de América: American Public Health Association.
2. Aboulhassan, M., Souabi, S. y Yaacoubi, A. (2008). Pollution reduction and biodegradability index improvement of tannery effluents; 1. *Int. J. Environ. Sci. Tech*, 5(1), 11-16. Recuperado de: <http://goo.gl/wwyqW9> (Noviembre, 2013).
3. Albarrán, E. (2008). El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones electroquímicas. *Latin-American Journal of Physics Education*, 336-345. Recuperado de: <http://goo.gl/tUnNY2> (Diciembre, 2013).
4. Almomani, F. y Baranova, E. (2013) Kinetic study of electro-Fenton oxidation of azo dyes on boron-doped diamond electrode. *Environmental Technology*. 34(11), 1473–1479. doi: 10.1080/09593330.2012.758644
5. Anglada, A., Urtiaga, A. y Ortiz, I. (2009) Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. *Wiley Interscience*, 1(84). doi: 10.1002/jctb.2214
6. Atkins, P. (2006). *Química Física* (Sexta edición ed.). (E. Omega, Ed.) Barcelona, España: Oxford University Press.
7. Atkins, W. y Jones, L. (2006). *Principios de Química: Los caminos del descubrimiento* (Segunda ed.). México: Médica Panamericana. Recuperado de: <http://goo.gl/juUAlx> (Octubre 2013).
8. Barbusiński, K. (2009). Henry John Horstman Fenton-Short biography and brief history of Fenton reagent discovery. *Chemia, Dydaktyka, Ekologia*,

- Metrologia*, 1(14), 111,112. Recuperado de: <http://goo.gl/rzKmCt> (Enero, 2014).
9. Boye, B., Sandonà, G. Giomo, M., Buso, A. y Farnia, G. (2009). Electro-fenton-based treatments of real effluents from tanning processes and landfills. *Journal of environmental engineering manage*, 19(5), 283-289. Recuperado de: [http://ser.cienve.org.tw/download/19-5/jeeam19-5\\_283-289.pdf](http://ser.cienve.org.tw/download/19-5/jeeam19-5_283-289.pdf)
  10. Brillas, E. y Casado, J. (1996). Iron (II) catalysis of the mineralization of aniline using a carbon - PTFE O<sub>2</sub> - fed cathode. *J. Electrochemistry Society*, L49-L53. doi: 10.1149/1.1836528.
  11. Brillas, E., Boye, B., Sirés, I., Garrido, J., Rodríguez, R., Arias, C. y Comninellis, C. (2004). Electro-chemical destruction of chlorophenoxy herbicides by anodic oxidation and electro-Fenton using a boron-doped diamond electrode. *Electrochimica Acta*, 4487-4496. doi:10.1016/j.electacta.2004.05.006.
  12. Casado, J. y Fornaguera, J. (2005). Pilot-Scale Degradation of organic contaminants in a continuous-flow reactor by the helielectro-Fenton method. *Environmental Science and Technology*, 1(36), 1843. doi: 10.1002/clen.200700091.
  13. Castells, X. (2012). *Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos: Reciclaje de residuos industriales*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de: <http://goo.gl/iMxmKJ> (Enero, 2014).
  14. Chang, R. (2002). *Química* (Séptima ed.). México: Mc Graw Hill. Recuperado de: <http://goo.gl/rQzz9H> (Noviembre, 2013).
  15. Christie, R. (2001). *Colour Chemistry*. Cambridge, Reino Unido: Bookcraft Ltd. Recuperado de: <http://goo.gl/BFdK13> (Diciembre, 2013).

16. Chung, K.-T. y Cerniglia, C. (1992). Mutagenicity of azo dyes: structure activity relationship. *Mutat Res*, 227(3), 201-220. doi: 10.1016/0165-1110(92)90044-A.
17. Clavijo, A. (2002). *Fundamentos de química analítica: equilibrio iónico y análisis químico*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://goo.gl/XfpA78> (Febrero, 2014).
18. Clearsynth. (2013). *Material safety data sheet: Acid brown 83*. Recuperado de: <http://www.clearsynth.com/docs/MSD-CS-AC-23146.pdf> (Marzo, 2014).
19. Comninellis, C. (1994). Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochimica Acta*, 39(12), 1857-1862. doi: 10.1016/0013-4686(94)85175-1
20. Comninellis, C., Kapalka, A., Malato, S., Parsons, S., Poullos, I. y Mantzavinos, D. (2008). Perspective Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (83), 769-776. doi: 10.1002/jctb.1873.
21. Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2002). *Sistema de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados Tomo 2*. (1ra. Edición). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Editorial McGraw – Hill.
22. Davis, R. y Whitten, K. (2008). *Química* (Octava ed.). México: Cengage Learning. Recuperado de: <http://goo.gl/Zwd9nV> (Noviembre, 2013).
23. Denisov, E. (2003). *Handbook of free radicals initiators*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley and sons. doi: 10.1002/0471721476

24. Edelahe, M., Oturan, N., Oturan, M., Padellec, Y., Bermond, A. y Kacemi, K. (2003). Degradation of diuron by the electro-Fenton process. *Environ. Chem. Lett*, 1(4), 233-236. doi: 10.1007/s10311-003-0052-5
25. Ege, S. (2004). Química orgánica. (1ra. Edición). España: Editorial Reverté. Recuperado de: <http://goo.gl/BhYZtl> (Octubre, 2013)
26. Esquivel, A. (2009). *Capítulo 3. Dimensionamiento de los equipos*. Puebla, México. Recuperado de: <http://goo.gl/XwvD4S> (Marzo, 2014).
27. Flox, C., Ammar, S., Arias, C., Brillas, E., Vargas-Zavala, A. y Abdelhedi, R. (2006). Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradation of indigo carmine in acidic aqueous medium. *Appl. Catal. B: Environ.*, 1(67), 93-104. doi: 10.1016/j.apcatb.2006.04.020.
28. Fockedey, E. y Lierde, A. (2002). Coupling of anodic and cathodic reactions for phenol electro-oxidation using three-dimensional electrodes. *Water Research*, 16(36), 4169-4175. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00103-3.
29. Garzón, G. (2008) Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: revisión. *Acta biol. Colombia*, 13(3), 27-36. Recuperado de: <http://goo.gl/zPbU0h> (Mayo, 2014).
30. Guivarch, E., Trevin, S. y Lahitte, C. (2003). Degradation of azo dyes in water by Electro-Fenton process. (S. Verlag, Ed.) *Environmental*, 1, 38. doi: 10.1007/s10311-002-0017-0.
31. Gung, B. y Taylor, R. (2004). The Synthesis of Azo Dyes. *J. Chem. Ed.*, 81, 1630. Recuperado de: <http://goo.gl/Khc3pP> (Diciembre, 2013).
32. Helmenstine, A. (2014). Direct Blue 1. Recuperado de: <http://goo.gl/313cp7> (Marzo, 2014).

33. Hildenbrand, S., Winfried, S., Wodarz, R., Kimmel, R., y Dartsch, P. (1999). Azo dyes and carcinogenic aromatic amines in cell cultures. *Int Arch Occup Environ Health*(72), M52. doi: 10.1007/PL00014217.
34. Isaev, A., Aliev, Z. y Adamadzieva, N. (2011). *Photoelectrochemical Oxidation of C.I. Direct Black 22 Azo Dye under Elevated Oxygen Pressure*. Applied electrochemistry and corrosion protection of metals, 85(5), 765-769. doi: 10.1134/S107042721205014X.
35. Jiang, C. y Zhang, J. (2007). Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 7(8), 1118-1125. doi: 10.1631/jzus.2007.A1118.
36. Joseph, J., Destailats, H., Hung, H., y Hoffman, M. (2000). The sonochemical degradation of azobenzene and related azo dyes. *J Phys Chem A*, 1(104), 301-307. doi: 10.1021/jp992354m.
37. Juttner, K., Galla, U. y Schmieder, H. (2000). Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. *Electrochimica Acta*, 1(45), 2575–2594. Recuperado de: <http://goo.gl/mYuQac> (Mayo, 2014).
38. Khan, R. y Banerjee, U. (2010). The handbook of environmental chemistry, Biodegradation of azo dyes. En H. A. Erkurt (Ed.). 9. Berlin: Springer-Verlag. Recuperado de: <http://goo.gl/k8afAC> (Noviembre, 2013).
39. Kotz, J., Treichel, P. y Weaver, G. (2005). *Química y reactividad química* (Sexta ed.). México: Cengage Learning. Recuperado de: <http://goo.gl/5ZKaDt> (Octubre, 2013).
40. Lahkimi, A., Oturan, M., Oturan, N. y Chaouch, M. (2007). Removal of textile dyes from water by the electro-Fenton process. *Environmental Chemical Letter*, 1(5), 35-39. Doi: 10.1007/s10311-006-0058-x

41. Li, Y., Guan, Y. y Cuicui, T. (2011). Influencing Factors Research of Phenol Wastewater Treatment by Cathode Electro-Fenton Method. *Applied Informatics and Communication, International Conference, ICAIC 2011, Xian, China, August 20-21, 2011, Proceedings, Part I* (págs. 726-733). Shenyang: Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-23214-5\_92.
42. López, C., Moreira, T., Feijoo, G. y Lema, J. (2007). Tecnologías para el tratamiento de efluentes de industrias textiles. *Afinidad*, 64, 561. Recuperado de: <http://goo.gl/u93RPu> (Febrero, 2014).
43. Méndez, R. (2012). *Formulación y evaluación de proyectos* (Séptima edición). (ICONTEC) Bogotá, Colombia.
44. Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos. (2006). *EU legislation: Azo dyes in textile and leather products*. Amsterdam, Holanda. Recuperado de: <http://goo.gl/xD1aI8> (Octubre, 2013)
45. Municipio de Pelileo. (2014). *Plan de desarrollo local*. Recuperado de: <http://goo.gl/JR45OS> (Marzo, 2014)
46. Mohanty, N., y Wei, I. (1993). Oxidation of 2,4-DNT using Fenton's Reagent: Reaction. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 10(2), 171. doi: 10.1089/hwm.1993.10.171.
47. Mohajerani, M., Mehrvar, M. y Ein-Mozaffari, F. (2010). An overview of the integration of advanced oxidation technologies and other processes for water and wastewater treatment. *International Journal of Engineering*, 3(2). Recuperado de: <http://goo.gl/qbghnL>
48. Muff, J. (2014). Electrochemical oxidation – A versatile technique for aqueous organic contaminant degradation. En Sogaard, E. (Ed.). *Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water:*

Fundamentals and Applications, (pp. 75-134). Polonia: Elsevier.  
Recuperado de: <http://goo.gl/6EwTDT> (Mayo, 2014)

49. Neyens, E. y Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98, 33-35. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00282-0.
50. Nordin, N., Mohd Amir, S., Riyanto y Othman, M. (2013) Textile Industries Wastewater Treatment by Electrochemical Oxidation Technique Using Metal Plate. *International Journal of Electrochemical Science*, 1(8).  
Recuperado de: <http://goo.gl/rzHH6U> (Mayo, 2014).
51. Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Biblioteca virtual en salud, Desarrollo sostenible en salud*. Obtenido de Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización: <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/sanea/163esp-diseno-ti.pdf> (Diciembre, 2013).
52. Osorio, F., Torres, J. y Mercedes, S. (2011). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de <http://goo.gl/yagHwf> (Enero, 2014).
53. Oturan, M., Oturan, N., Lahitte, C. y Trevin, S. (2001). Production of hydroxyl radicals by electrochemically assisted Fenton's reagent application to the mineralization of an organic micropollutant, pentachlorophenol. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 507(1-2), 96-102. doi:10.1016/S0022-0728(01)00369-2.
54. Peipower. (2014). Rectificador cargador PEI REC300. Recuperado de: [http://peipower.com/pdf/catalogo\\_upstrifasicoo.pdf](http://peipower.com/pdf/catalogo_upstrifasicoo.pdf) (Marzo, 2014)



55. Pignatello, J., Oliveros, E. y Mackay, A. (2006). Advanced Oxidation Processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Environmental Science and Technology*, 35, 84. doi: 10.1080/10643380500326564.
56. Priambodo, R., Shih, Y., Huang Y. y Huang Y. (2010). *Treatment of real wastewater using semi batch (Photo)-Electro-Fenton Method*. *Environmental Sustainability Research*, 21(6), 389-393. Recuperado de: <http://ser.cienve.org.tw/download/21-6/21-6-8.pdf> (Febrero, 2014).
57. Pineda, L. y Jara, M. (2010) *Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena fibra textil confecciones*. (1ra edición). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad del Rosario. Recuperado de: <http://goo.gl/67zZ4S>
58. Puntener, A. y Page, C. (2004). *European Ban on Certain Azo Dyes*. Recuperado de: <http://www.tfl.com/web/files/eubanazodyes.pdf> (Abril, 2014).
59. Quiroz, M., Bandala, E. y Martínez, C. (2011). Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Removal of Pesticides from Aqueous Media. En M. Stoytcheva, *Pesticides Formulations, Effects, Fate*. México: Intech. doi: 10.5772/13597
60. Ramesh, B., Seeni, K., Venkatesan, P., y Sumandha, D. (2010). Removal of Fatty Acids from Palm Oil Effluent by Combined Electro-Fenton and Biological Oxidation process. *Water Air Soil Pollut*(211), 203-210. doi: 10.1007/s11270-009-0292-5
61. Rajeshwar, K. e Ibanez, J. (1997). *Environmental electrochemistry, fundamentals and applications in pollution abatement*. (1ra. Edición). Londres, Inglaterra: Editorial Academic Press Limited. Recuperado de: <http://goo.gl/QhsUQS> (Mayo, 2014).

62. Robertson, W. (2010). *More chemistry basics*. (1ra. Edición). Estados Unidos: NSTA Press. Recuperado de <http://goo.gl/sjYjqK> (Mayo, 2014).
63. Sainz, J. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. (1ra. Edición). Madrid, España: Editorial Fundación EOI. Recuperado de <http://goo.gl/2XSWaW> (Abril, 2014)
64. Singhal, A. y Thakur, I. S. (2009). Decolourization and detoxification of pulp and paper mill effluent by *Cryptococcus* sp. *Biochemical Engineering Journal*, 46(1), 21–27. doi: 10.1016/j.bej.2009.04.007.
65. Skoog, D. y West, D. (1986). *Introducción a la química analítica*. Barcelona, España: Reverté. Recuperado de: <http://goo.gl/RLoLNT> (Noviembre, 2013)
66. Torrades, F., Núñez, L., García-Hortal, J. y Peral, J. (2008). Fenton and Photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes - overall kinetic analysis. *Coloration Technology*, 1(2), 124, 370-374. doi: 10.1111/j.1478-4408.2008.00165.x
67. Texto Unificado de Legislación y Saneamiento Medioambiental (TULSMA). (2005). *Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes: Recurso agua*. Recuperado de <http://goo.gl/A1apHa> (Octubre, 2013).
68. Valenzuela, C. (1995). *Química General: Introducción a la Química teórica*. Salamanca: Ediciones Universidad Salamanca. Recuperado de; <http://goo.gl/gA8ZTQ> (Enero, 2014)
69. Vasudevan, S. y Oturan, M. (2013). Electrochemistry and Water Pollution. En E. Lichtfouse, J. Schwarzbauer, & D. Robert, *Green Materials for Energy, Products and Depollution*. Dijon, Francia: Springer Science. doi: 10.1007/s10311-013-0434-2

70. Von Sonntag, C. (2006). The basics of oxidants in water treatment. Part A: OH radical reactions, *4th. International Conference on Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment*, (pp. 37-40). Goslar, Alemania: CUTEC Serial Publication.
71. Wang, A., Qu, J., Ru, J., Liu, H. y Ge, T. (2005). Mineralization of an azo dye acid red 14 by electro-Fenton's reagent using an activated carbon filter cathode. *Dyes and pigments*, 3(65), 227-233. Recuperado de: [10.1016/j.dyepig.2004.07.019](https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.07.019)
72. Weber, W. (2003). *Control de la calidad del agua*. Barcelona, España: Reverté. Recuperado de <http://goo.gl/3o7PIh> (Febrero, 2014)
73. Zhou, H. y Smith, D. (2002). Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 1(4), 247-264. doi: 10.1139/s02-020
74. Zollinger, H. (2003). *Color Chemistry: Syntheses, Properties, and Applications of Organic Dyes and Pigments*. Zúrich, Suiza: Verlag Helvetica Chimica Acta. Recuperado de: <http://goo.gl/40r6jq> (Octubre, 2013)

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE LOS EFLUENTES TRATADOS

Los parámetros en estudio siguieron la metodología sugerida por la APHA, AWWA, WEF (2005), los mismos se detallan a continuación.

#### 1. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

El método propuesto para el análisis de la DQO permite analizar muestras cuyo valor del parámetro varíe entre 1 mg O<sub>2</sub>/L y 1 000 mg O<sub>2</sub>/L con una sensibilidad de 1 mg O<sub>2</sub>/L.

##### Procedimiento

- Se tomaron 2 mL de agua HPLC con una pipeta y se colocaron sobre un vial de reactivo de DQO. Se agitó la mezcla por unos segundos.
- Se tomaron 2 mL de la muestra y se colocaron sobre un vial de reactivo de DQO. Se agitó la mezcla por unos segundos.
- Se colocaron el blanco y la muestra en el reactor de DQO durante 120 min a 150 °C.
- Se retiraron los viales de reactor de DQO y se enfriaron a temperatura ambiente.
- Se fijó el espectrofotómetro HACH a 600 nm, programa 954 y se enceró con el blanco.
- Se realizó la medición de la DQO de la muestra y se reportó la concentración en mg O<sub>2</sub>/L.

## 2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>)

El método propuesto permite determinar la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en muestras líquidas.

### Procedimiento

- Se homogenizó la muestra y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado.
- Se reguló el pH de la muestra contenida en el vaso a un valor de 7 con hidróxido de sodio contenido en un vaso de precipitación adecuado.
- Se seleccionó el volumen de muestra según indica la Tabla A1.1, el criterio de selección fue que el valor de la demanda química de oxígeno era el doble que la demanda biológica de oxígeno.

**Tabla A1.1** Selección de la muestra de análisis de DBO<sub>5</sub>.

Rango (mg O <sub>2</sub> /L)	Muestra (mL)	Factor	Gotas de inhibidor de bacterias nitrificantes
0 – 40	428	1	10
0 – 80	360	2	10
0 – 200	244	5	5
0 – 400	157	10	5
0 – 8000	94	20	3
0 – 2000	56	40	3
0 – 4000	21,7	100	1

- Se transfirió la muestra contenida en la probeta a un frasco oscuro de análisis de DBO<sub>5</sub>.
- Se agregaron gotas de inhibidor de bacterias nitrificantes al capuchón negro de análisis de DBO<sub>5</sub> de acuerdo al volumen de muestra seleccionado.

Nota: Realizar esta actividad sin colocar el capuchón negro en el frasco.

- Se pipetearon 2 mL de la muestra contenida en el frasco a un vaso de precipitación adecuado, utilizando una pipeta graduada de 2 mL.
- Se pipetearon 2 mL de la muestra con microorganismos contenido en un vaso de precipitación adecuado al frasco de  $\text{DBO}_5$ , utilizando una pipeta graduada de 2 ml.
- Se agregaron 3 gotas de KOH al capuchón negro de análisis de  $\text{DBO}_5$ .
- Se introdujo el agitador magnético al interior y se colocaron el capuchón negro y el azul sobre el frasco.
- Se enceró pulsando los dos botones del capuchón azul y se anotó el número mostrado en el capuchón.
- Se introdujo el frasco en el termostato.
- Luego de 5 días se sacó el frasco del termostato y se observa la lectura del capuchón azul, multiplicar la lectura del capuchón por el factor de la muestra seleccionada.

Nota: El capuchón azul de análisis de  $\text{DBO}_5$  lee la cantidad de  $\text{CO}_2$  que se desprende de las bacterias al interior del frasco.

- Expresar la  $\text{DBO}_5$  como  $\text{mg O}_2/\text{L}$  de  $\text{DBO}_5$ .

### **3. DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC)**

Este método se basa en la combustión de la materia orgánica presente en el agua a  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , en presencia de un catalizador. El  $\text{CO}_2$  producido es transportado por el gas de arrastre hacia el analizador de infrarrojos para su cuantificación.

#### **Procedimiento**

- Se filtró la muestra y se colocaron 5 mL en una celda.

- Se ajustó la temperatura a 900 °C en el equipo TOC 5000 A.
- Se colocaron 5 mL de agua HPLC en una celda.
- Se corrió el blanco.
- Se inyectó la muestra y se realizaron las mediciones de TOC reportadas en mg/L.

#### **4. DETERMINACIÓN DEL COLOR REAL**

La determinación del color real se basó en el método Cobalto/Platino Standard Method 8025. La diferencia entre los métodos consiste en que en el caso del color real se utiliza una muestra filtrada.

##### **Procedimiento**

- Se tomaron 15 mL de agua HPLC con una pipeta y se colocaron en una celda para la medición.
- Se tomaron 15 mL de muestra con una pipeta y se colocaron en una celda para la medición.
- Se fijó el espectrofotómetro HACH en el programa color a 455 nm y se encendió con el blanco.
- Se realizó la medición del color real de la muestra y se reportó la concentración en unidades de Pt/Co.

#### **5. DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES Y DISUELTOS**

La determinación de los sólidos totales y disueltos se realizó con base en el método Gravimetric Method 8271. La diferencia entre los métodos consiste en que en el caso de los sólidos disueltos se utiliza una muestra filtrada.



## Procedimiento

- Se utilizaron cápsulas lavadas, secadas, enfriadas y posteriormente taradas para este procedimiento.
- Sobre la cápsula se colocan 100 mL de muestra homogenizada.
- Se pesó la muestra y posteriormente se evaporó en un baño María.
- Una vez que el agua fue evaporada se introdujo la cápsula en la estufa por un lapso de 2 h.
- Las cápsulas se retiraron de la estufa y se colocaron en un desecador por 30 min y, posteriormente, fueron pesadas.
- Se determinó la concentración de sólidos con la igualdad presentada a continuación:

$$[S] = \frac{P_i - P_f}{V} \quad [A1.0.1]$$

Donde:

[S] = concentración de sólidos (totales o disueltos)

Pf = peso final de la muestra

Pi = peso inicial de la muestra

V = volumen de muestra

## ANEXO II

### RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS COLORANTES PUROS EN EL SISTEMA ELECTRO-FENTON

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos llevados a cabo en el tratamiento de las soluciones de colorantes comerciales utilizados en la experimentación se presentan en las siguientes Tablas.

#### 1. Colorante azul BRL

**Tabla AII.1** Variación de la concentración del colorante azul BRL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad Batch  
(I = 8 A)

Tiempo (min)	[Azul BRL] (ppm)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	39,88	39,73	39,83	39,8 ± 0,1	0,0
1	26,87	24,90	25,79	25,9 ± 1,0	35,1
2	19,48	17,71	17,61	18,3 ± 1,1	54,1
4	10,51	11,99	10,32	10,9 ± 0,9	72,5
7	5,29	5,592	5,88	5,6 ± 0,3	86,0
9	2,93	3,57	3,57	3,4 ± 0,4	91,6
12	1,55	2,93	2,29	2,3 ± 0,7	94,3
15	2,14	0,96	1,35	1,5 ± 0,6	96,3
20	1,94	1,35	1,74	1,7 ± 0,3	95,8

**Tabla AII.2** Variación de la concentración del colorante azul BRL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch  
(I = 10 A)

Tiempo (min)	[Azul BRL] (ppm)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	39,58	39,78	39,63	39,7 ± 0,1	0,0
1	19,09	18,00	18,20	18,4 ± 0,6	35,1
2	10,81	9,82	10,47	10,4 ± 0,5	54,1
4	5,59	6,38	3,42	5,1 ± 1,5	72,5
7	2,58	2,24	2,09	2,3 ± 0,3	86,0
9	1,94	1,99	1,65	1,9 ± 0,2	91,6
12	0,96	1,35	1,45	1,3 ± 0,3	94,3
15	1,25	1,30	1,45	1,3 ± 0,1	96,3
20	0,96	1,10	1,25	1,1 ± 0,1	95,8

## 2. Colorante pardo LEGL

**Tabla AII.3** Variación de la concentración del colorante pardo LEGL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch  
(I = 8 A)

Tiempo (min)	[Pardo LEGL] (ppm)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	40,34	40,11	39,74	40,1 ± 0,3	0,0
2	27,99	31,30	29,17	29,5 ± 1,7	26,4
4	12,18	19,83	16,68	16,2 ± 3,8	59,5
7	4,93	6,69	5,56	5,7 ± 0,9	85,7
9	2,37	2,51	2,66	2,5 ± 0,1	93,7
12	1,51	2,40	2,56	2,2 ± 0,6	94,6
15	1,64	2,40	2,14	2,1 ± 0,4	94,9
20	1,61	1,56	2,09	1,8 ± 0,3	95,6
25	3,77	1,04	5,20	2,0 ± 0,3	95,0

**Tabla AII.4** Variación de la concentración del colorante pardo LEGL al aplicar la solución al tratamiento electro-Fenton modalidad batch  
(I = 10 A)

Tiempo (min)	[Pardo LEGL] (ppm)				Remoción del colorante (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0	39,90	40,00	40,16	40,0 ± 0,1	0,0
2	15,44	13,52	14,00	14,3 ± 1,0	64,2
4	6,16	5,74	5,56	5,8 ± 0,3	85,5
7	2,06	1,88	2,30	2,1 ± 0,2	94,8
9	1,61	1,09	1,77	1,5 ± 0,4	96,3
12	2,37	1,35	2,40	2,0 ± 0,6	94,9
15	2,09	2,14	1,88	2,0 ± 0,1	94,9
20	2,30	1,56	1,77	1,9 ± 0,4	95,3
25	2,14	2,40	1,61	2,1 ± 0,4	94,9

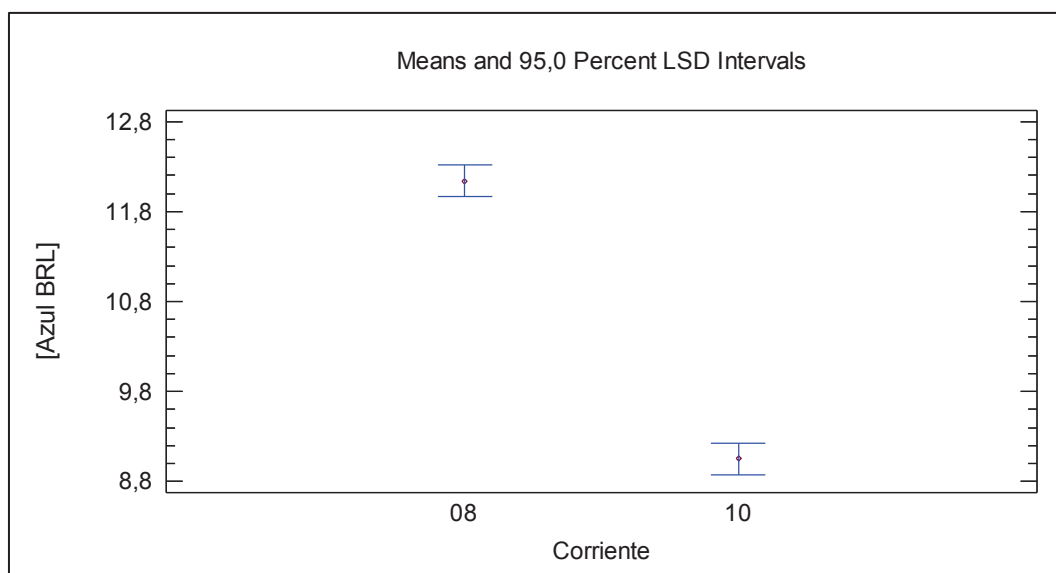
## ANEXO III

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

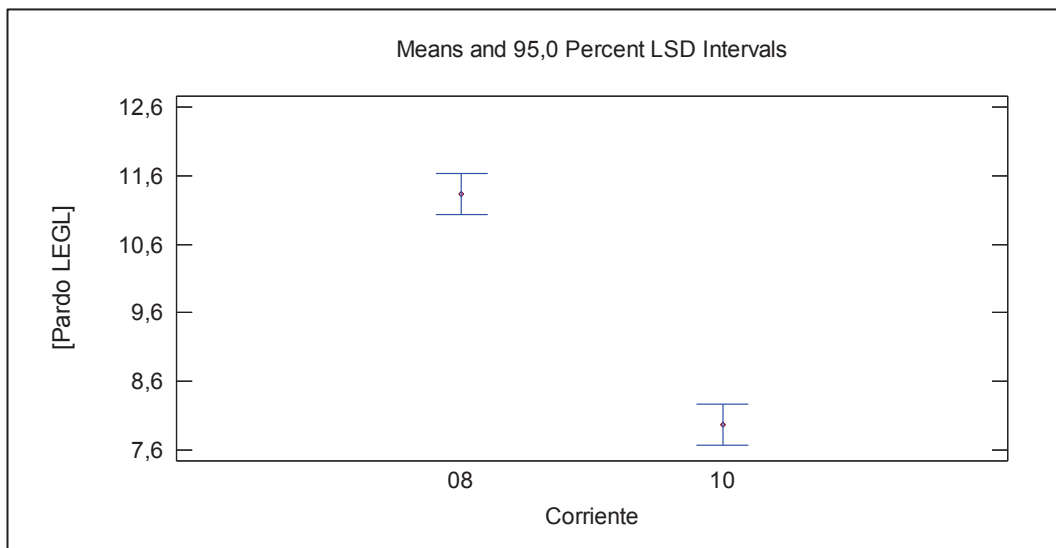
#### 1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS SOLUCIONES DE COLORANTES PUROS

##### 1.1 Efecto de la intensidad de corriente eléctrica en la degradación de los colorantes puros en solución

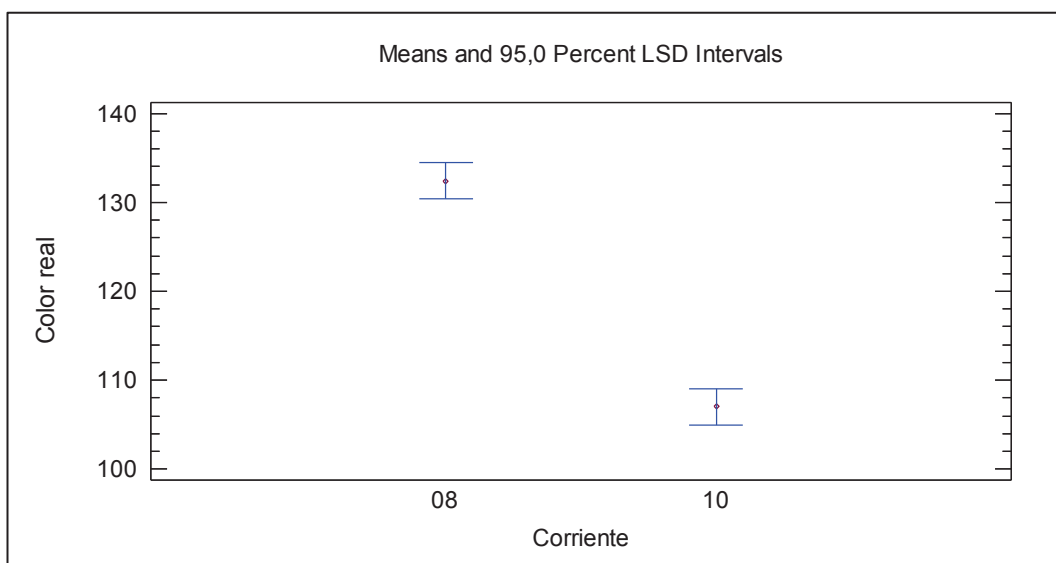
Se utilizó el software StatGraphics para determinar las diferencias significativas entre los niveles de experimentación (95% de confianza). En las Figuras AIII.1, AIII.2, AIII.3 y AIII.4 se presentan las gráficas de medias del tratamiento en donde se muestra el efecto de la corriente eléctrica sobre la variación de concentración y el color real de las soluciones de los colorantes azul BRL y pardo LEGL respectivamente.



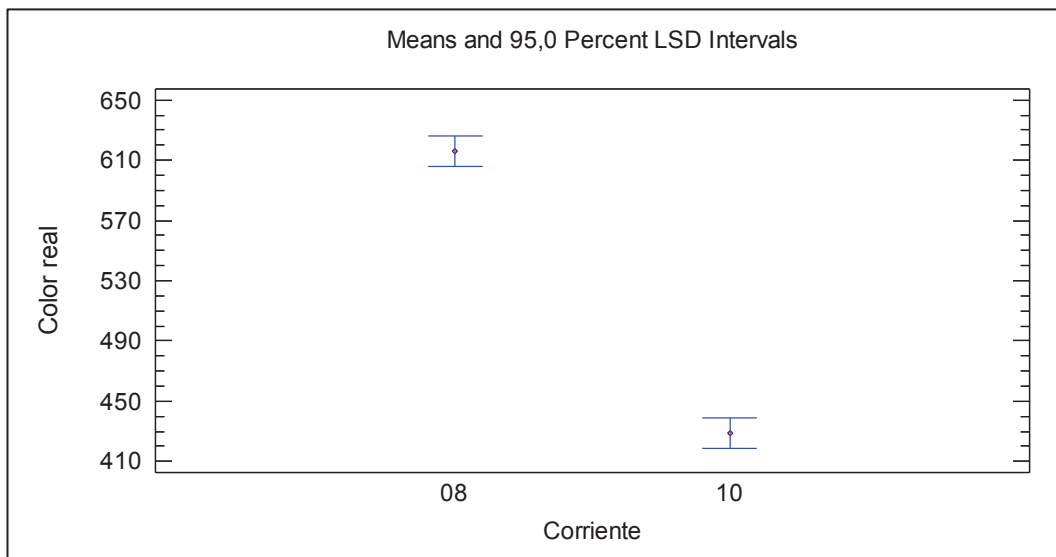
**Figura AIII.1** Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la degradación del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)



**Figura AIII.2** Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la degradación del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)



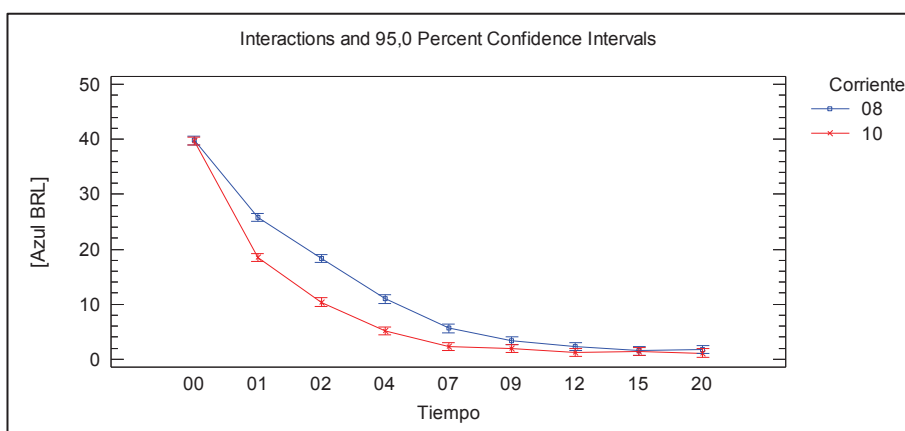
**Figura AIII.3** Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica sobre la variación del parámetro color real del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton (I = 8 A y 10 A)



**Figura AIII.4** Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica sobre la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton ( $I = 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )

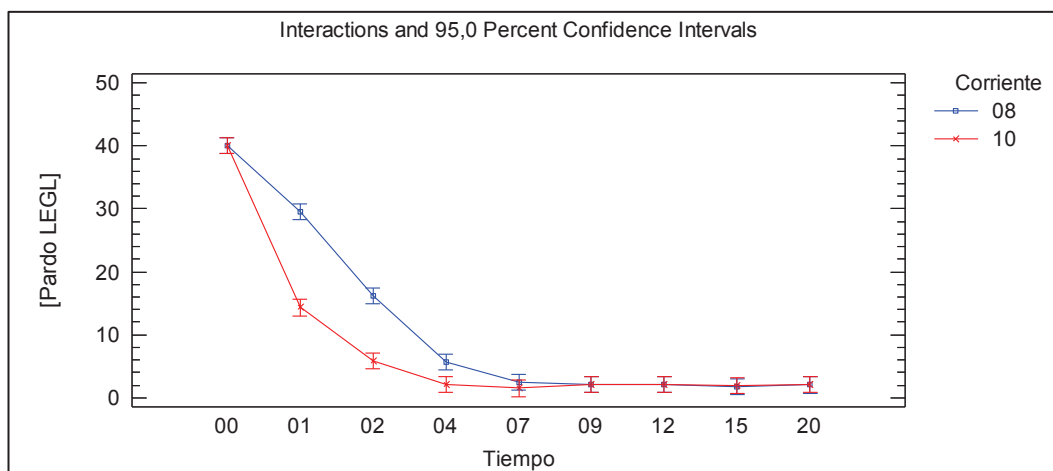
### 1.1 Efecto del tiempo de tratamiento en la degradación de los colorantes puros en solución.

En las Figuras AIII.5, AIII.6, AIII.7 y AIII.8 se presentan las gráficas de medias del tratamiento de los colorantes azul BRL, pardo LEGL y negro 22, en donde se muestra el efecto del tiempo de tratamiento sobre la degradación de los colorantes en solución, cuando se provee una corriente continua de  $8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ .

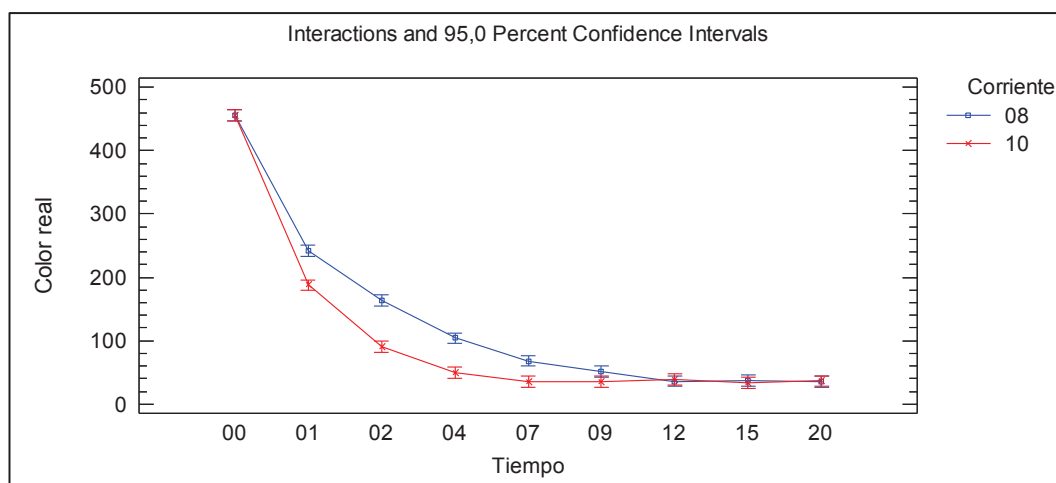


**Figura AIII.5** Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento para la degradación del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton ( $I = 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )

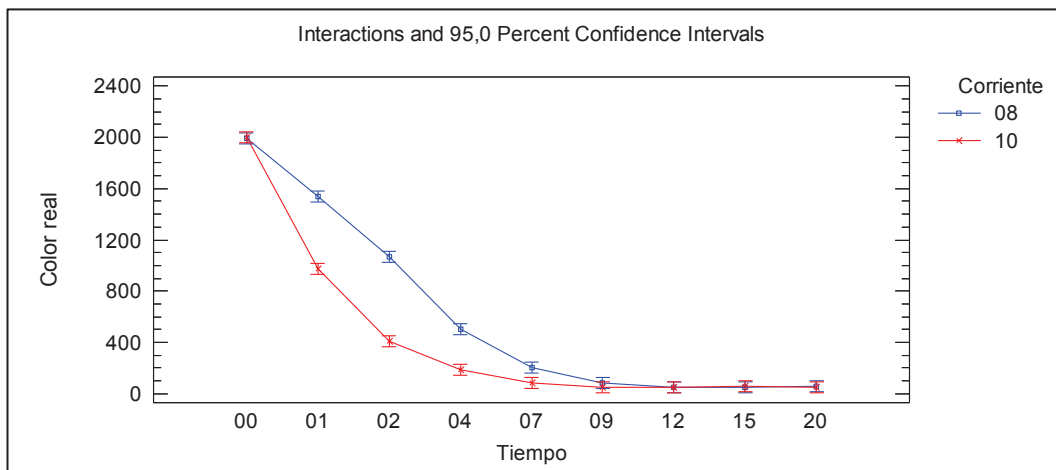




**Figura AIII.6** Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento para la degradación del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton ( $I = 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )



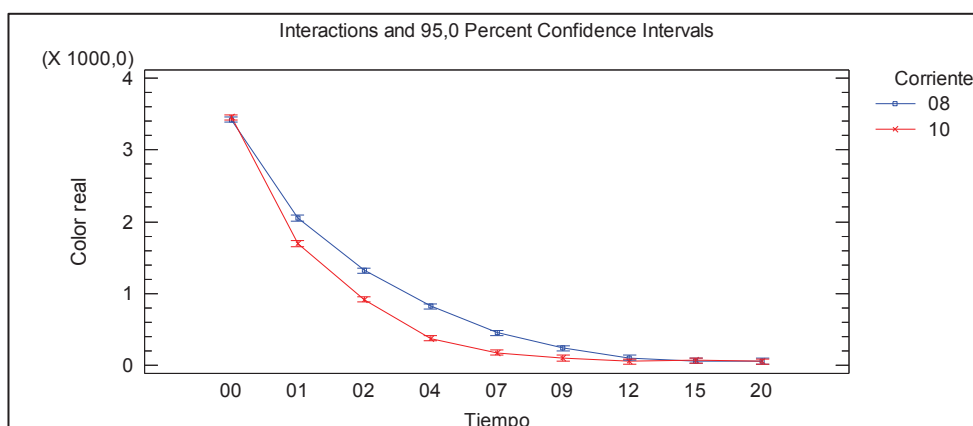
**Figura AIII.7** Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento sobre la variación del parámetro color real del colorante azul BRL en el proceso electro-Fenton ( $I = 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )



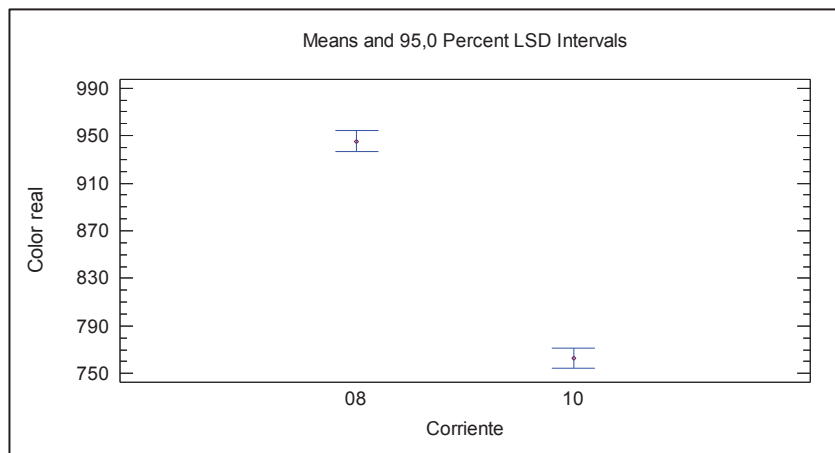
**Figura AIII.8** Gráfico de interacción del efecto del tiempo de tratamiento sobre la variación del parámetro color real del colorante pardo LEGL en el proceso electro-Fenton ( $I = 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )

## 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SOLUCIÓN MEZCLA DE COLORANTES

Se realizó el análisis estadístico (95% de confianza) para determinar las diferencias significativas entre los niveles de experimentación con la solución mezcla de los tres colorantes. En las Figuras AIII.9 y AIII.10, se presentan las gráficas de medias del tratamiento en donde se muestra el efecto de las variables corriente eléctrica y tiempo de tratamiento sobre el decrecimiento del color real de la solución.



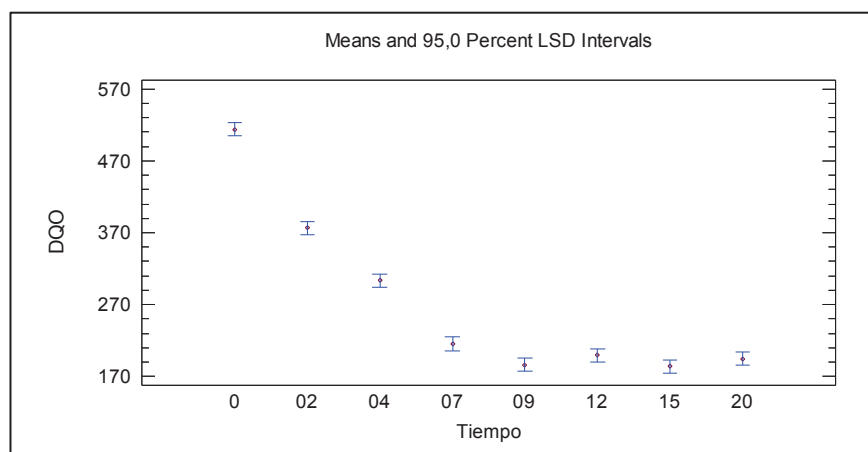
**Figura AIII.9** Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento para la remoción del color real de la solución mezcla de colorantes en el proceso electro-Fenton ( $I = 10 \text{ A}$ )



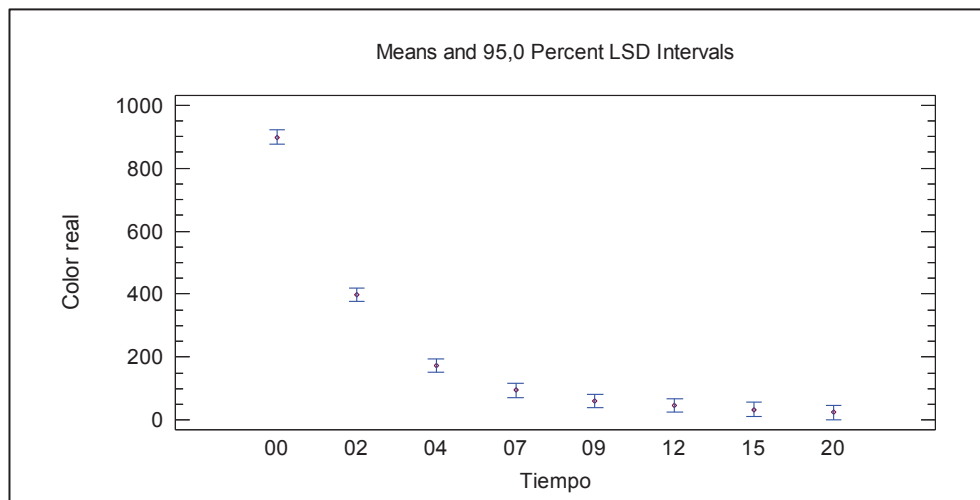
**Figura AIII.10** Gráfico de medias del efecto de la corriente eléctrica para la remoción del color real de la solución mezcla de colorantes en el proceso electro-Fenton ( $I= 8 \text{ A}$  y  $10 \text{ A}$ )

### 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIACIÓN DE LA DQO EN EL TRATAMIENTO EN MODALIDAD BATCH DEL EFLUENTE REAL

En el tratamiento del efluente real, se realizó el análisis estadístico (95% de confianza) para determinar las diferencias significativas con respecto al factor de diseño tiempo de tratamiento y su influencia sobre las variables de respuesta DQO y color real. En las Figuras AIII.11, AIII.12 y AIII.13, se presentan las gráficas de medias obtenidas del mencionado análisis.



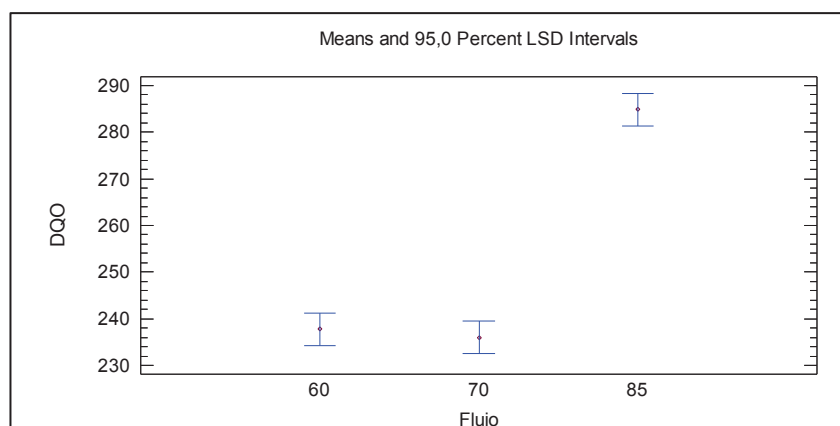
**Figura AIII.11** Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton ( $I = 10 \text{ A}$ )



**Figura AIII.12** Gráfico de medias del efecto del tiempo de tratamiento para la disminución del color real del efluente real en el proceso electro-Fenton ( $I = 10 \text{ A}$ )

#### 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIACIÓN DE LA DQO EN EL TRATAMIENTO EN MODALIDAD CONTINUA DEL EFLUENTE REAL

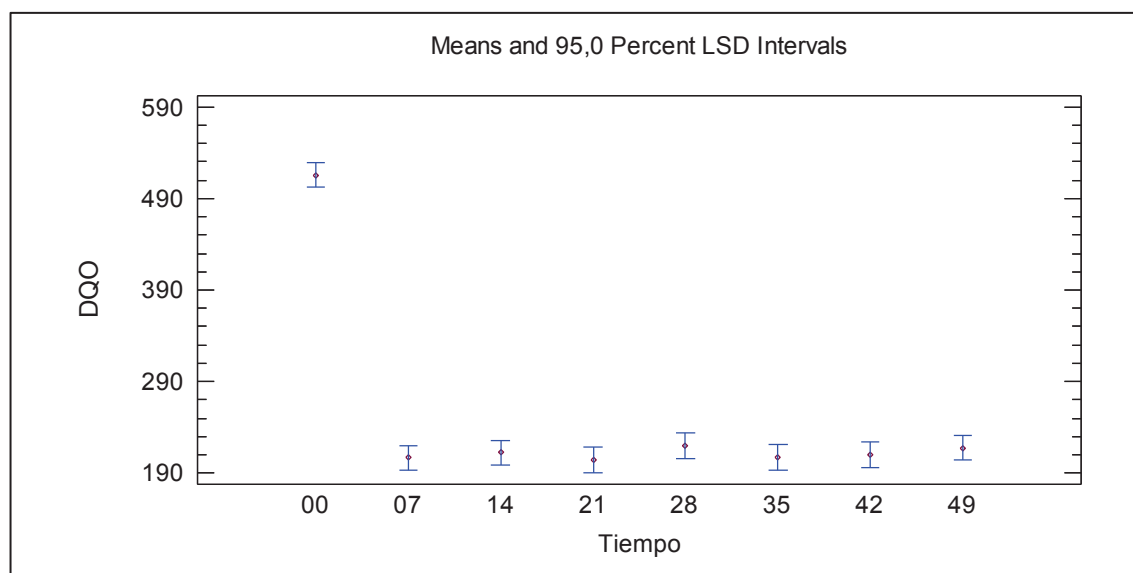
Se trató al efluente real en modalidad continua. Se realizó el análisis estadístico (95% de confianza) para determinar las diferencias significativas con respecto al factor de diseño flujo de trabajo y su influencia sobre la variable de respuesta DQO. En la Figura AIII.13, se presentan la gráfica de medias obtenida del mencionado análisis.



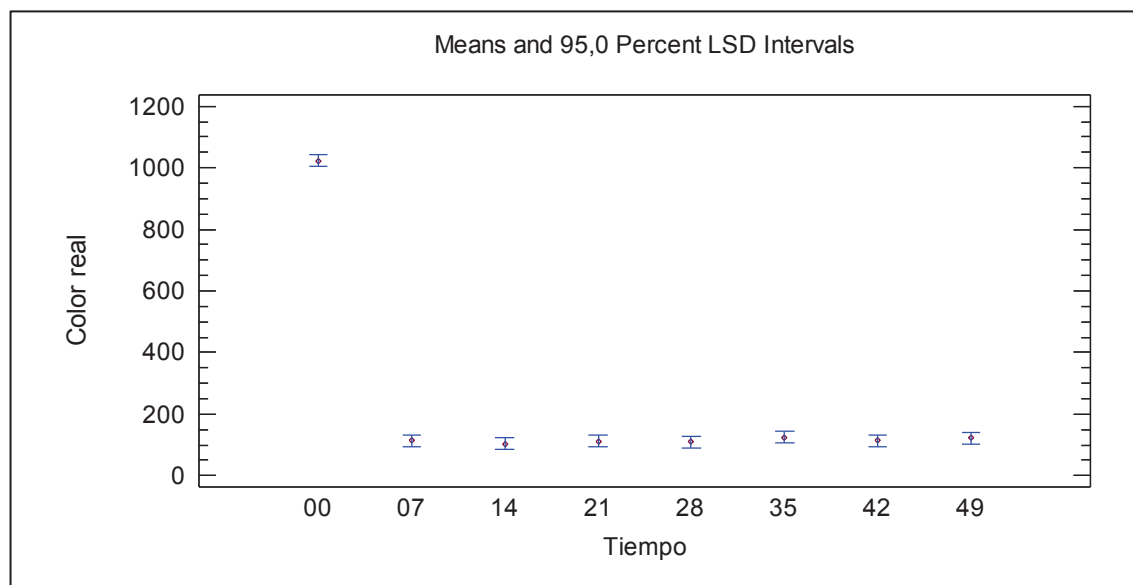
**Figura AIII.13** Gráfico de medias del efecto del flujo de trabajo para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua ( $I = 10 \text{ A}$ )

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DQO Y COLOR REAL EN EL TRATAMIENTO EN MODALIDAD CONTINUA DEL EFLUENTE REAL

Finalmente, se constató el estado estacionario del proceso en modalidad continua. Para ello, se realizó el análisis estadístico (95% de confianza) para determinar las diferencias significativas con respecto al factor de diseño volumen de efluente tratado y su influencia sobre las variables de respuesta DQO y color real. En las Figuras AIII.14, AIII.15 y AIII.16 se presentan las gráficas de medias obtenidas del análisis para las variables mencionadas.



**Figura AIII.14** Gráfico de medias del efecto del volumen de efluente tratado para la disminución de la DQO del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua (I = 10 A)



**Figura AIII.15** Gráfico de medias del efecto del volumen de efluente tratado para la disminución del color real del efluente real en el proceso electro-Fenton, modalidad continua (I = 10 A)

## ANEXO IV

### CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR ELECTRO-FENTON

#### 1. Tiempo de residencia necesario en el reactor electro-Fenton

Con base en los resultados obtenidos al aplicar los procedimientos descritos en la sección 2.4.1 se determinó el tiempo de residencia necesario en el reactor para una disminución adecuada del valor de los parámetros a valores dentro de norma.

#### 2. Geometría del reactor electro-Fenton

El diseño del reactor electro-Fenton se llevó a cabo con base en las dimensiones del reactor utilizado para el estudio a escala de laboratorio. Se establecieron, para ello, relaciones matemáticas entre las dimensiones del reactor a escala de laboratorio y el reactor a escala piloto, que permitieran obtener un reactor con las mismas proporciones geométricas.

El volumen total del reactor electro-Fenton se calculó con la Ecuación AIV.1:

$$V_T = l \times H \times a \quad \text{[AIV.1]}$$

Donde:

l: longitud del reactor

H: altura total del reactor

a: ancho del reactor

Los cálculos para determinar el volumen total del reactor, se detallan a continuación:

$$V_T = H \times l \times a$$

$$V_T = (0,152 \times 0,095 \times 0,092) \text{ m}^3$$

El volumen efectivo se refiere al volumen del reactor ocupado por el efluente a tratar, el mismo que se calculó con la Ecuación AIV.2:

$$V_{ef} = l \times h \times a \quad [AIV.2]$$

Donde:

l: longitud del reactor

h: altura efectiva del reactor, nivel de agua.

a: ancho del reactor

$$V_{ef} = h \times l \times a$$

$$V_{ef} = (0,105 \times 0,095 \times 0,092) \text{ m}^3$$

$$V_{ef} = 0,00092 \text{ m}^3 = 0,92 \text{ L}$$

El volumen que ocupan los electrodos dentro del reactor se calculó mediante la Ecuación AIV.3:

$$V_e = esp_e \times a_e \times h_e \quad [AIV.3]$$

Donde:

esp<sub>e</sub>: espesor de los electrodos

a<sub>e</sub>: ancho de los electrodos

h<sub>e</sub>: altura cubierta por efluente de los electrodos



El volumen neto ocupado por el efluente dentro del reactor fue determinado por medio de la Ecuación AIV.4:

$$V_w = V_{ef} - V_e \quad [AIV.4]$$

Donde:

$V_w$  = volumen neto

$V_{ef}$  = volumen efectivo

$V_e$  = volumen electrodos

$$V_w = V_{ef} - V_e$$

$$V_w = (0,92 - 0,06) \text{ L}$$

$$V_w = 0,86 \text{ L}$$

Los datos de volumen ocupados tanto por los electrodos como el volumen efectivo del reactor fueron obtenidos del sistema construido a escala de laboratorio. Con estos parámetros fue posible la determinación de las relaciones  $V_w/V_{ef}$  y  $V_{ef}/V_T$ , necesarias para el dimensionamiento del reactor electro-Fenton.

### 3. Cálculo del volumen del reactor electro-Fenton

El volumen de efluente a tratar se determinó con el tiempo de residencia con el que se trabajó en los estudios a escala de laboratorio y con el caudal de diseño. La Ecuación AIV.5 permite el cálculo de este parámetro.

$$V_w = t_r \times Q_p \quad [AIV.5]$$

Donde:

$V_w$ : volumen a tratar en el reactor electro-Fenton

$t_r$ : tiempo de residencia necesario para el tratamiento del efluente en el sistema electro-Fenton en el sistema a escala de laboratorio

$Q_p$ : caudal pico de trabajo

$Q_m$ : caudal medio de trabajo ( $3 \text{ m}^3/\text{día}$ )

$$V_w = t_r \times Q_p$$

$$V_w = 0,15 \text{ h} \times 0,51 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$V_w = 0,077 \text{ m}^3 = 77 \text{ L}$$

#### **4. Dimensionamiento del reactor electro-Fenton para el tratamiento de los efluentes de la empresa PAREDSUR**

A partir del volumen de efluente a tratar ( $V_w$ ) y con la relación  $V_w/V_{ef}$  del reactor en el sistema a escala de laboratorio se calculó el volumen efectivo ( $V_{ef}$ ) del reactor real. Además, con la relación  $V_{ef}/V_T$  se determinó el volumen total ( $V_T$ ) del reactor electro-Fenton. Con este volumen total y las proporciones obtenidas con las medidas del reactor prototipo se dimensionó el reactor para el sistema de tratamiento de la empresa PAREDSUR.

#### **5. Densidad de corriente eléctrica**

Mediante el resultado obtenido acerca de la corriente eléctrica al sistema, se calculó la densidad de corriente del sistema mediante la Ecuación AIV.6.

$$D = \frac{I}{A}$$

[AIV.6]

Donde:

D: densidad de corriente ( $A/m^2$ )

I: intensidad de corriente (A)

A: área útil del electrodo ( $m^2$ )

La densidad de corriente sirvió, además, para fijar el tamaño de los electrodos y la fuente de alimentación de corriente eléctrica continua al sistema.

$$D = \frac{I}{A}$$

$$D = \frac{10 \text{ A}}{2 \times (0,071 \text{ , } 00,092) \text{ m}^2}$$

$$D = 765 \text{ A/m}^2$$

A partir de este dato se puede calcular la intensidad de corriente necesaria para el sistema propuesto:

$$I = D \times A_e$$

$$I = D \times a_e \times h_e$$

$$I = 765 \times 0,32 \times 0,41 \text{ A}$$

$$I = 100,42 \text{ A}$$

## ANEXO V

### CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS COMPLEMENTARIOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

#### 1. Tanque de acondicionamiento

Se puede calcular el volumen del tanque con la Ecuación AV.1:

$$V_{TA} = \pi \times r^2 \times h \quad [AV.1]$$

Donde:

$V_{TA}$ : volumen tanque de acondicionamiento

$$V_{TR} = 4,05 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 2 \text{ días}$$

$$V_{TR} = 8,10 \text{ m}^3$$

$$V_{TR} = \pi \times r^2 \times h$$

$$V_{TR} = \frac{\pi}{4} D^2 \times h$$

$$V_{TR} = \frac{\pi}{4} D^2 \times 3 \times D$$

$$V_{TR} = \frac{3\pi}{4} D^3 = 8,1 \text{ m}^3$$

$$D=1,51 \text{ m}$$

## 2. Tanque de calentamiento

El cálculo del volumen del tanque se realiza con la Ecuación AV.2 (Esquivel, 2009, p.67).

$$V_{TC} = \pi \times r^2 \times h \quad [AV.2]$$

$$V_{TR} = \frac{\pi}{4} D^2 \times h$$

$$V_{TR} = \frac{\pi}{4} D^2 \times 3 \times D$$

$$V_{TR} = \frac{3\pi}{4} D^3 = 3 \text{ m}^3$$

$$D = 1,08 \text{ m}$$

## 3. Piscinas de neutralización

Las piscinas, en cuanto a sus dimensiones, serán las mismas para ancho, largo y altura, el cálculo se realizó con la Ecuación [AV.3].

$$V_{pis} = l \times a \times h \quad [AV.3]$$

Donde:

l: largo (m)

a: ancho (m)

h: altura (m)

$$V_{pis} = 3 \times l = 4,05 \text{ m}^3$$

$$l = 1,59 \text{ m}$$

#### 4. Filtro de arena

Se calculó el área de filtrado y el número de filtros para la operación con el caudal de diseño, estos parámetros se determinaron con las Ecuaciones AV.4 y AV.5. Se seleccionó una tasa de filtrado para procesos de tratamiento de aguas residuales con un valor de  $4,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , para el diseño de filtros con base de grava (Weber, 2003, pág. 57; Organización Panamericana de la Salud, 2005, p.52):

$$A_{\text{filtro}} = \frac{Q_p}{t_f} \quad [\text{AV.4}]$$

$$n = \frac{1}{4} \times \sqrt{Q_p} \quad [\text{AV.5}]$$

Donde:

$Q_p$ : caudal de filtración ( $\text{m}^3/\text{día}$ )

$t_f$ : tasa de filtración ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ )

$n$ : número de filtros

$$\text{Área} = \frac{4,14 \text{ m}^3/\text{día}}{4,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}}$$

$$\text{Área} = 0,86 \text{ m}^2$$

$$n_{\text{filtros}} = \frac{1}{4} \times \sqrt{Q}$$

$$n_{\text{filtros}} = \frac{1}{4} \times \sqrt{0,5175 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$n_{\text{filtros}}=1$$

### 5. Dimensionamiento del tanque de filtrado

Para el proceso de filtrado se seleccionó un filtro de arena, conformado por dos capas, una de arena de 0,9 m y otra de grava de 0,15 m. Para cumplir con este fin se utilizó la Ecuación AV.6 (Weber, 2003, p.170).

$$A_{\text{tanque}} = \text{Largo} \times \text{ancho} = l \times a \quad [\text{AV.6}]$$

$$A_{\text{tanque}} = 2 \times a \times a$$

$$A_{\text{tanque}} = 0,86 \text{ m}^2$$

$$a = 0,65 \text{ m} \quad \text{y} \quad l = 1,3 \text{ m}$$

### 6. Determinación de la altura de la capa sobrenadante de efluente

Se calculó la altura del efluente sobrenadante del filtro, mediante la Ecuación AV.7, el proceso se detalla a continuación.

$$H_{\text{sobrenadante}} = \frac{t_f}{k} \times L \quad [\text{AV.7}]$$

$$H_{\text{sobrenadante}} = \frac{4,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}}{6 \frac{\text{m}}{\text{día}}} \times 0,9\text{m}$$

$$H_{\text{sobrenadante}} = 0,7 \text{ m}$$

Finalmente, se calculó la altura del tanque de filtración, el mismo que se obtiene al sumar las alturas de los lechos y la altura de efluente sobrenadante.

$$H_{\text{tanque}} = H_{\text{grava}} + H_{\text{arena}} + H_{\text{sobrenadante}}$$

$$H_{\text{tanque}} = 1,75 \text{ m}$$

Además se considera un factor de seguridad del 20%, por lo que la altura del tanque será de 2,1 m. En la Tabla 3.28 se resumen las dimensiones del tanque de filtración y el número de filtros.

## 7. Lecho de secado

Se realizó un análisis de sólidos sedimentables a los 9 min de tratamiento, en el que se determinó que su valor corresponde a 48 mL/L. Además se conocía que la concentración de sólidos suspendidos fue de 990 mg/L. Al relacionar ambos parámetros, asumiendo que todos los sólidos suspendidos son sedimentables, se determinó que la descarga de lodos corresponde al 5% del caudal total alimentado de efluente. Este dato permitió determinar el volumen de lodos a secar. Además, se puede calcular el área de secado para un lecho de 0,5 m de altura recomendado por la Organización Panamericana de la Salud (2005, p.19). Los cálculos se realizan con las Ecuaciones AV.8 y AV.9.

$$V_{\text{lodos}} = Q_p \times t \times \% \text{ lodos} \quad [\text{AV.8}]$$

$$A_{\text{secado}} = \frac{V_{\text{lodos}}}{H_{\text{secado}}} \quad [\text{AV.9}]$$

Donde:

$V_{\text{lodos}}$ : volumen de lodos ( $\text{m}^3$ )

$Q_p$ : caudal de alimentación de lodos ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )

$t$ : tiempo de tratamiento (días)

$H_{\text{secado}}$ : altura del lecho de secado (m)



$$A_{\text{sec}} = \frac{V_{\text{Iodos}}}{H_{\text{secado}}}$$

$$A_{\text{sec}} = \frac{(4,14 \times 0,05 \times 1)\text{m}^3}{0,6 \text{ m}}$$

$$A_{\text{sec}} = 0,35 \text{ m}^2$$