

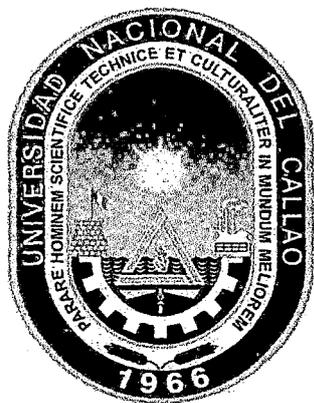
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA QUIMICA



FEB 2015

1110
Mary
06/01/2015
09.00h
403.

1110
Mary
09/02/2015
10.30h.
403.



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“REDUCCION DE CONCENTRACIÓN DE
HIERRO EN AGUA, MEDIANTE LA
ELECTROCOAGULACION”

AUTOR: AGÉRICO PANTOJA CADILLO

R E C I B I D O	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
	VICE-RECTORADO DE INVESTIGACIÓN
	13 FEB 2015
	HORA: 16.00
	FIRMA:

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de Octubre del 2013 al 30 de Setiembre del 2014)

Resolución de aprobación N° 973-2013-R

Callao, 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
VICE-RECTORADO DE INVESTIGACION
RECIBIDO
076
13 FEB. 2015
CENTRO DE DOCUMENTACION CIENTIFICA Y TRADUCCIONES

INDICE.

	Pág.
I. INDICE.	1
1.1. Lista de figuras	4
1.2. Lista de gráficos	5
1.3. Lista de cuadros	6
II. RESUMEN Y ABSTRACT	8
III. INTRODUCCIÓN	10
3.1 Exposición del problema.	10
3.2 Importancia y la Justificación de la Investigación.	11
IV. MARCO TEÓRICO	12
4.1 Hierro y su remoción.	12
4.1.1 Métodos para la remoción de hierro.	13
4.1.2 Oxidación química del Hierro	13
4.2 La electrocoagulación.	15
4.2.1 Coagulación química.	15
4.2.2 Definición de electrocoagulación	18
4.2.3 Reacciones Químicas asociadas a la electrocoagulación.	19
4.2.4 Mecanismo de Electrocoagulación	22
4.2.5 Aplicaciones de la electrocoagulación	23
4.2.6 Componentes de un sistema de electrocoagulación.	23
4.2.7 Principio de funcionamiento de la electrocoagulación.	25
4.2.8 Ventajas de la electrocoagulación.	28
4.2.9 Mecanismos de reacción del ánodo y cátodo de aluminio	29
4.3 Factores que influyen en la electrocoagulación	29
4.3.1 El pH en la electrocoagulación.	29
4.3.2 Conducción de corriente eléctrica en medios líquidos.	31
4.3.2.1 Densidad de corriente.	32
4.3.2.2 Potencial de reducción.	33
4.3.2.3 Reducción de la concentración de hierro	33



4.4	Agua sintética.	35
V.	MATERIALES Y METODOS	36
5.1	Materiales, Insumos y equipos.	36
5.1.1	Materiales.	34
5.1.2	Insumos.	34
5.1.3	Equipos.	37
5.2	Población de investigación.	38
5.2.1	Población de Estudio..	39
5.2.2	Tamaño de Muestra.	39
5.2.3	Técnicas de Recolección de Datos.	40
5.2.4	Módulo de prueba	42
5.2.5	Determinación de Hierro total por absorción atómica.	43
5.2.5.1	Calibración del equipo Analytik Jena modelo A_300_ENG. Contra	43
5.2.5.2	Expresión de resultados.	45
5.2.6	Determinación de pH.	47
5.2.7	Determinación de Amperaje y Voltaje	47
5.3	Métodos estadísticos	47
VI.	RESULTADOS	48
6.1	Resumen de los resultados de la experimentación.	48
6.2	Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=6, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.	49
6.3	Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=7, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.	51
6.4	Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=8, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.	53
6.5	Cuadros y gráficos resumen obtenidos en la experimentación a diferentes pHs, diferentes densidades de corriente y tiempos variables.	55

VII. DISCUSION	67
VIII. REFERENCIALES	69
IX. APENDICE	71
9.1 Cuadro de recolección de datos experimentales.	71
9.2 Curva de calibración de Cobre, Hierro, Aluminio.	72
X. ANEXO	82
10.1 Cuantificación por absorción atómica de la concentración total de Hierro.	82
10.2 Cuantificación por absorción atómica de la concentración total de aluminio	83
10.3 Matriz de Consistencia	85



1.1 Lista de figuras

	Pág.
FIGURA N°: 4.1: FUERZAS DE INTERACCIÓN SOBRE UNA PARTÍCULA EN SUSPENSIÓN.	17
FIGURA N°: 4.2: MECANISMOS DE COAGULACIÓN DE PARTÍCULAS COLOIDALES.	18
FIGURA N°: 4.3: CONCENTRACIÓN DE ESPECIES MONÓMICAS DE ALUMINIO EN EQUILIBRIO CON EL HIDRÓXIDO AMORFO, EN CONDICIONES DE FUERZA IÓNICA CERO Y T=25°C Y PH VARIABLE.	22
FIGURA N° 4.4: INTERACCIONES EN EL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN..	25
FIGURA N° 4.5: DIAGRAMA DE UN EQUIPO DE ELETROCOAGULACION	26
FIGURA N°: 4.6: DIAGRAMA DE SOLUBILIDAD DE AL(OH) ₃ CONSIDERANDO SOLO ESPECIES DE ALUMINIO MONOMÉRICAS.	30
FIGURA N° 5.1: EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA PRUEBA	37
FIGURA N° 5.2: EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA PRUEBA DE ELECTROCOAGULACIÓN	42
FIGURA N° 5.3: CURVA DE CALIBRACIÓN DE CU: 0.5, 1.0, 2.0 ppm	45
FIGURA N° 5.4: CURVA LINEAL DE CALIBRACIÓN DE FE: 0.5, 1.0, 2.0 ppm	46
FIGURA N° 5.5: CURVA DE CALIBRACIÓN DE AL, 5, 10, 20 ppm	46

1.2 Lista de gráficos

	Pág.
GRÁFICO N° 6.1: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m ² , Y PH=6.0	49
GRÁFICO N° 6.2: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m ² . Y PH=6.0	50
GRÁFICO N° 6.3: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m ² . Y PH=6.0	50
GRÁFICO N° 6.4: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m ² . Y PH=7.0	51
GRÁFICO N° 6.5: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m ² . Y PH=7.0	52
GRÁFICO N° 6.6: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m ² . Y PH=7.0	52
GRÁFICO N° 6.7: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m ² . Y PH=8.0	53
GRÁFICO N° 6.8: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m ² . Y PH=8.0	54
GRÁFICO N° 6.9: CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m ² . Y PH=8.0	54
GRÁFICO N° 6.10: % DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m ² Y PHs=6.0,7.0,8.0	56
GRÁFICO N° 6.11: % DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m ² Y PHs=6.0,7.0,8.0.	56
GRÁFICO N° 6.12: % DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m ² Y PHs=6.0,7.0,8.0.	57
GRÁFICO N° 6.13: % REDUCCIÓN DE HIERRO VS DENSIDAD DE CORRIENTE(A/m ²)	57

1.3 Lista de cuadros

	Pág.
CUADRO N°: 4.1: MÉTODOS PARA LA REMOCIÓN DE HIERRO	14
CUADRO N° 4.2: REACCIONES DE METALES EN AGUA Y HIDROLISIS DEL AL III.	20
CUADRO N°: 4.3: DESCRIPCIÓN DE REACCIONES EN EL ELECTROFLOCULADOR	24
CUADRO N° 4.4: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.	27
CUADRO N°: 4.5: MECANISMO DE REACCIÓN DEL ALUMINIO.	29
CUADRO N° 4.6: POTENCIALES DE REDUCCIÓN DE ESPECIES INTERVINIENTES EN LA ELECTROCOAGULACIÓN.	34
CUADRO N° 5.1: CUADRO DE EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS	40
CUADRO N° 5.2: INTERVALOS DE ALIMENTACIÓN DE GAS EN EQUIPO: CONTRA A_300_ENG ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETER.	43
CUADRO N° 6.1: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	48
CUADRO N° 6.2: RESUMEN DE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE HIERRO EN LA EXPERIMENTACIÓN	55
CUADRO DE FIERRO N° 6.3: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 4min	58
CUADRO N° 6.4: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 8min	59
CUADRO N° 6.5: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS	60

DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 12min

CUADRO N° 6.6: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y pH=6.0 CONSTANTE

61

CUADRO 6.7: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y pH=7.0 CONSTANTE

62

CUADRO N° 6.8: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y pH=8.0 CONSTANTE

63

CUADRO N° 6.9: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 10 A/m². CONSTANTE.

64

CUADRO N° 6.10: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 20 A/m². CONSTANTE

65

CUADRO N° 6.11: DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 30 A/m². CONSTANTE

66



II. RESUMEN

La electro floculación se genera suministrando corriente continua sobre el cátodo y el ánodo en una solución que tenga constituyentes capaces de formar floculó, este proceso depende principalmente del tipo de electrodo, pH, densidad de corriente, tiempo de reacción. Algunas investigaciones consideran a la electrocoagulación como una tecnología capaz de reducir metales pesados.

Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo la reducción de concentración del Hierro en agua mediante la electrocoagulación, para ver tal efecto, se ha usado el método experimental, de 3 variables con 3 niveles de estudio, y el promedio de los resultados obtenidos en términos de reducción de concentración de hierro, han sido analizados estadísticamente utilizando el análisis de varianza.

Del estudio se encontró que las condiciones óptimas para la reducción del Hierro hasta un 88.76% fueron utilizando pH = 8.00; t = 4 min; Densidad de corriente = 30 A/m², con electrodos de aluminio

Palabras claves: Electrocoagulación, Hierro, Densidad de Corriente.

ABSTRACT

The electro flocculation is generated by supplying direct current to the cathode and anode in a solution that has constituents capable to flocculate; this process depends mainly on the type of electrode, pH, current density and reaction time.

Therefore, the aim of this work is to seek and investigate to reduce the iron concentration in water. Applied the electrocoagulation.

The method used in this work is experimental, 3 variables with 3 levels of study, and the average of the results obtained were statistically analyzed using analysis of variance.

With the results obtained after the experiment, it is concluded that the pH influences significantly the level of Fe removal for different times of applying induced current density. The highest percentage levels of Fe removal are achieved at a higher pH, and given that for the fixed pH values there are no significant differences when induced current density are correlated with times of application, therefore the optimum conditions for the removal of Iron would be at: pH = 4; t = 4 min, induced current density = 30 A/m².

Keywords: Electroagulation, Iron, current density.

III. INTRODUCCIÓN.

La electro floculación si bien es cierto ha sido ampliamente estudiado en otros países, como España, Brasil, México, EE.UU, se presenta en las investigaciones como un proceso capaz hasta de retirar metales pesados. Sobre ello, se sabe que en el país existe una carencia tecnológica de alternativas de tratamiento de agua, puesto que en la actualidad solo se utilizan los tratamientos convencionales a base de adición de sales de aluminio y de fierro.

Bajo ese enfoque se estudió el comportamiento y la influencia de las variables de operación en los procesos de tratamiento de agua sintética y de este modo estudiar la reducción de concentración de fierro.

3.1 Exposición del problema.

El 77% del agua que bebe Lima viene del Rio Rímac; pero empresas, municipios y familias arrojan sus efluentes y residuos: cada segundo el caudal del rio hablador recibe 3.189 litros de desagües y residuos industriales, según el Ministerio del Ambiente (Minam, 2010).

En evaluaciones recientes en la cuenca del rio Rímac se ha encontrado que tiene: 6 veces más de fierro, 83 veces más de manganeso, 12 veces más de aluminio, 5 veces más de cadmio, 2 veces más de arsénico y el doble de zinc del permitido. Metales nocivos para un río que tiene la categoría poblacional y recreacional.

Po ello en el presente estudio nos hemos enfocado en la reducción de fierro, toda vez que es un elemento que excede los valores permisibles en la cuenca del rio Rimac; aunque su remoción se realiza básicamente por sedimentación convencional y filtración de arena que no garantiza su remoción total, un problema más grave aún es que las empresas prestadores de servicio de agua, no poseen alternativas tecnológicas para su remoción.



Por ello en la intención de reducir la concentración de hierro, y con el antecedente de estudios que vienen realizando con la electrocoagulación para la remoción de DBO_5 , BQO, y metales el presente trabajo se desglosa en un objetivo general: Reducir la concentración del fierro en agua sintética, utilizando el proceso de electrocoagulación.

3.2 Importancia y la Justificación de la Investigación.

AL determinar experimentalmente los parámetros de operación del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua con contenido de hierro, se podrá dimensionar y hacer el escalamiento y permitir de esta forma operativizar el proceso.

Actualmente las plantas de tratamiento de agua utilizan sistemas convencionales para la remoción de hierro, básicamente por sedimentación convencional y filtración de arena que no garantiza su remoción total, además estos sistemas convencionales involucran costos operacionales altos, debido a que los controles lo realiza un operario y algunos sistemas mecánicos de dosificación.

Muy al contrario con la electrocoagulación es una tecnología que puede ser usada como alternativa para la eliminación del hierro en agua, con la ventaja de que la correcta regulación eléctrica generará un adecuado proceso de coagulación y por ende la remoción de metales nocivos

IV. MARCO TEÓRICO.

4.1. Hierro y su remoción.

El hierro y el manganeso son elementos comunes en la superficie de la tierra. A medida que el agua se filtra por el suelo y las piedras puede disolver estos minerales y acarrearlos hacia el agua subterránea. Además, los tubos de hierro pueden corroerse y lixiviar (disolver) hierro dentro del abastecimiento. Los resultados de la prueba probablemente van a ser reportados como mg/L (miligramos por litro). La Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU. ha establecido que los Niveles Máximos de Contaminantes Secundarios para hierro y manganeso son 0.3 mg/L y 0.5 mg/L respectivamente, estándares para sustancias que no son peligrosas para la salud. El agua que contiene menos de 0.3 mg/L de hierro y 0.5 mg/L de manganeso no debe de tener un olor, sabor o apariencia indeseable y no debe de requerir tratamiento.

El hierro y el manganeso pueden darle al agua un sabor, olor y color indeseable. El hierro causa manchas rojizos-cafés en la ropa, porcelana, platos, utensilios, vasos, lavaplatos, accesorios de pvc y otros. El manganeso causa manchas cafés negras en los mismos materiales. Los detergentes no remueven estas manchas. El cloro casero y los productos alcalinos (tales como el sodio y el bicarbonato) pueden intensificar las manchas. Los depósitos de hierro y manganeso se acumulan en los tubos de cañerías, tanques de presión, calentadores de agua y equipo ablandador de agua. Estos depósitos restringen el flujo del agua y reducen la presión del agua. Más energía se requiere para bombear agua a través de tubos tapados y para calentar agua si los rodos de los calentadores están cubiertos con depósitos minerales. Esto aumenta los costos de la energía y el agua. El agua contaminada con hierro y manganeso usualmente contiene bacterias de hierro o manganeso. Estas bacterias se alimentan de los minerales que hay en el agua. No causan

problemas de salud, pero sí forman una baba rojiza-café (hierro) o café-negra (manganeso) en los tanques de los inodoros y pueden tapan los sistemas de agua.

4.1.1 Métodos para la remoción de hierro.

Existen diversos métodos para la remoción del hierro, como se puede ver en el cuadro N°: 4.1.

4.1.2 Oxidación química del Hierro

Los oxidantes químicos son utilizados en el tratamiento de aguas por muchos propósitos entre los cuales están incluidos:

- ✓ Control del crecimiento biológico en tubos y tanques.
- ✓ Remoción de color.
- ✓ Control del olor y sabor.
- ✓ Reducción de compuestos orgánicos específicos
- ✓ Desinfección.

Los oxidantes más comúnmente utilizados en el tratamiento de agua: son el cloro, las cloro aminas, ozono, dióxido de cloro, y permanganato de potasio. El oxidante más común en el tratamiento de aguas es el cloro, pero el uso alternativo de otros oxidantes aumenta debido a que los productos generados de la reacción del cloro con compuestos orgánicos presentes en algunas aguas afecta la salud. El ozono es un agente oxidante extremadamente fuerte y tiene diferentes aplicaciones en el tratamiento de agua. Aunque el ozono es más caro que el cloro, los altos costos asociados con el uso del ozono puede ser compensado por la precipitación de manganeso y hierro, además de la eficiencia en el control del olor, remoción del color y como auxiliar en la floculación.

CUADRO N°: 4.1
MÉTODOS PARA LA REMOCIÓN DE HIERRO.

Tratamiento para remoción de hierro	Problemas que origina	Componentes asociados
<ul style="list-style-type: none"> • Filtro oxidante - de arena verde de manganeso o zeolita (útese para concentraciones combinadas de hierro y manganeso > 15 mg/L) • Aireación/filtración (útese para concentraciones combinadas de hierro y manganeso > 25 mg/L) • Oxidación y filtración química (útese para concentraciones combinadas de hierro y manganeso > 10 mg/L) • Compuestos de fosfato (útese para < 3 mg/L) • Suavizador de agua (útese para concentraciones combinadas de hierro y manganeso > 5 mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> • El agua está clara cuando es tomada pero aparecen partículas rojizas o negruzcas cuando se estanca Manchas rojizas-café o negras en los accesorios de plomería o en la ropa lavada 	<ul style="list-style-type: none"> • Hierro y manganeso disueltos
<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación y filtración química 	<ul style="list-style-type: none"> • El agua del grifo está rojizo negruzco y el color se mantiene por más de 24 horas (no hay precipitación de partículas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hierro o manganeso disueltos (coloidal) (complejos orgánicos de estos minerales)
<ul style="list-style-type: none"> • Filtro de partículas 	<ul style="list-style-type: none"> • El agua del grifo contiene partículas rojizas - café que se asientan cuando el agua se estanca 	<ul style="list-style-type: none"> • Hierro oxidado en el suministro de agua
<ul style="list-style-type: none"> • Eleve el pH del agua y use un filtro de partículas 	<ul style="list-style-type: none"> • El agua del grifo contiene partículas rojizas-café que se asientan cuando el agua se estanca 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de tubería y equipo
<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de shock y filtración 	<ul style="list-style-type: none"> • Babas rojizas-café en los tanques de los inodoros, y drenajes de los lavamanos y las tinas 	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias de hierro o manganeso

Fuente: Mark L. McFarland (2010)

El dióxido de cloro es un oxidante muy fuerte preparado al momento y en el lugar por la reacción entre el cloro y el clorito de sodio a un pH bajo. El dióxido de cloro es capaz de oxidar hierro y manganeso, remover color, controlar el olor y desinfectar. Sin embargo se ha recomendado que los niveles residuales de dióxido de cloro y sus productos, clorito y clorato, estén limitados a 0.1 mg/l. Como consecuencia, esto limita su aplicación en el tratamiento de agua. El permanganato de potasio ha sido ampliamente utilizado en el tratamiento industrial de aguas para la precipitación de hierro y manganeso. El permanganato de potasio es también utilizado para controlar el sabor y el olor y la remoción del color; sin embargo, dosis relativamente altas son indispensables para resolver problemas difíciles de sabor y olor o tratar aguas altamente coloreadas. En suma, las dosis de permanganato de potasio deben ser cuidadosamente controladas para prevenir el desarrollo del color rosado en aguas.

4.2. La electrocoagulación.

4.2.1 Coagulación química.

Para Barbechea (2000) y otros, La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- ✓ El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- ✓ El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

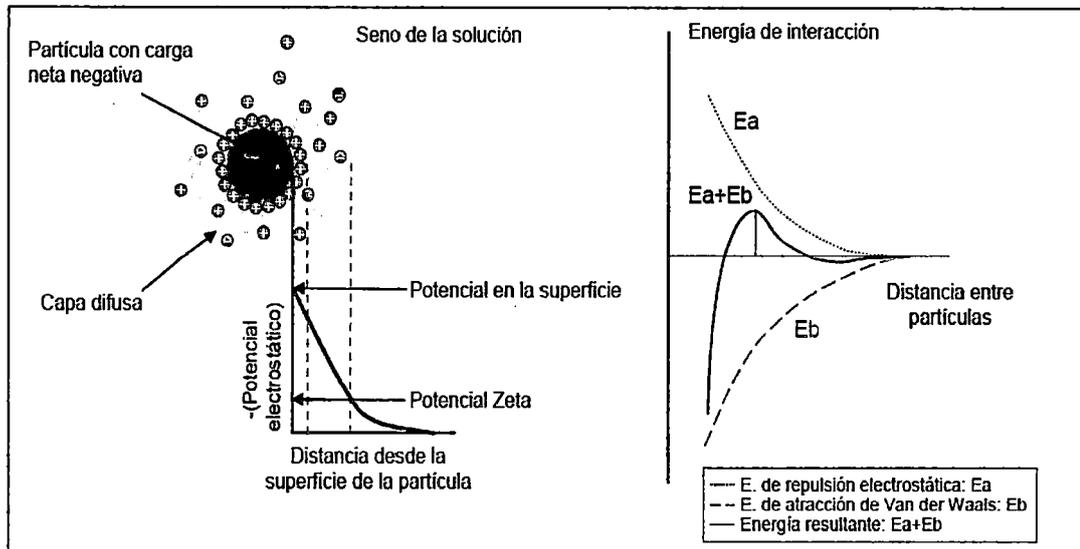


Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. Posteriormente se necesita una agitación lenta, en equipos floculadores. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

Según Martínez (2008), La coagulación puede ser definida, en principio, como la desestabilización de las partículas para conseguir que las fuerzas de atracción tipo Van der Waals que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, de manera que las partículas se unan y den lugar a la formación de sólidos de mayor tamaño. Como consecuencia del mayor tamaño, la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa, posibilitando el uso de la decantación como tecnología de tratamiento. La coagulación es un proceso químico complejo que implica la combinación de numerosos procesos sencillos. Comienza con la adición a una dispersión coloidal de un reactivo químico (normalmente una sal de catión polivalente) que activa simultáneamente varios mecanismos de desestabilización coloidal, siendo los más importantes (Ver figura N°: 4.1 y 4.2) la compresión de la doble capa eléctrica (como consecuencia del aumento en la fuerza iónica del medio que provoca este nuevo reactivo) y la neutralización de la carga superficial de las partículas coloidales (que está asociada a la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas coloidales).

Además de estos procesos, la adición de sales de aluminio o hierro puede dar lugar también a la formación de precipitados a partir de sus hidróxidos, que atrapan en su interior a las partículas coloidales. La inmersión de los coloides dentro de un precipitado es un mecanismo muy efectivo de eliminación de la materia coloidal conocido como coagulación o floculación de barrido

FIGURA N°: 4.1
FUERZAS DE INTERACCIÓN SOBRE UNA PARTÍCULA EN
SUSPENSIÓN.



Fuente: Martínez (2008)

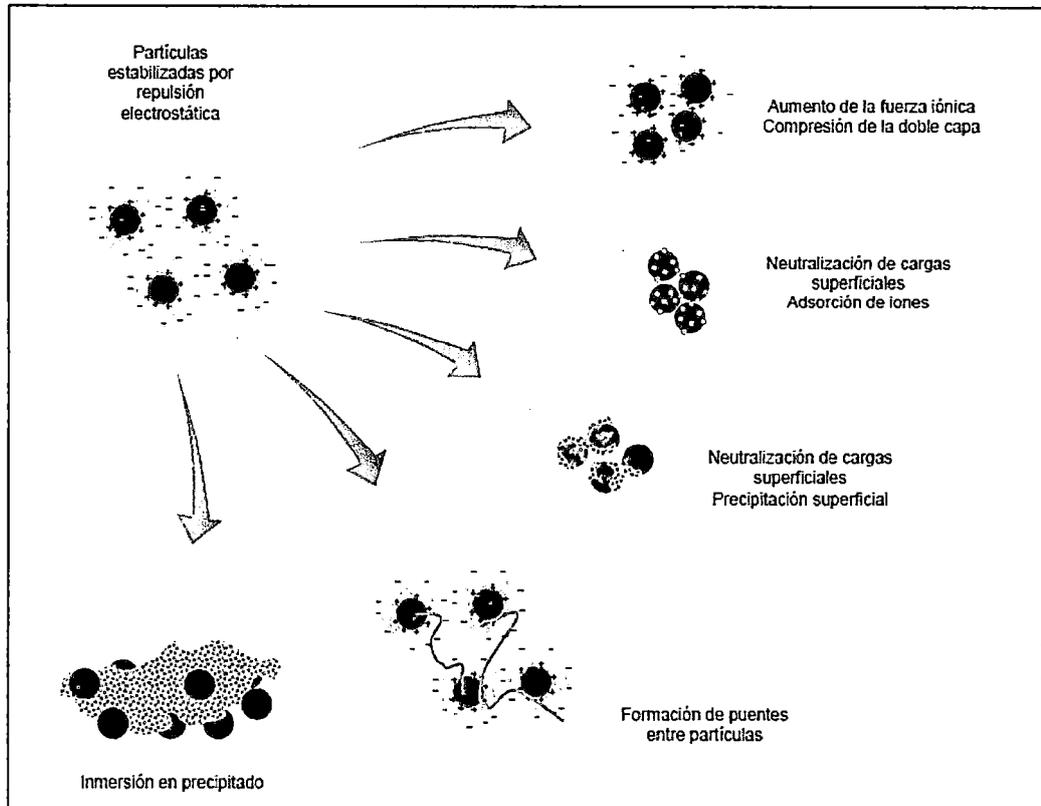
Asimismo, la adsorción de grupos activos de un mismo agente coagulante sobre diferentes partículas coloidales permite la formación de enlaces tipo puente entre partículas. Este mecanismo puede ser conseguido por polímeros formados de forma natural tras la hidrólisis de sales de aluminio o hierro, pero su eficacia aumenta notablemente si se añaden polímeros orgánicos especiales (iónicos o no) con una cadena de gran tamaño.

Como consecuencia del proceso de coagulación por aumento de la fuerza iónica o por neutralización, las fuerzas de repulsión electrostáticas se hacen menores que las correspondientes fuerzas de atracción de Van der Waals, y cuando las partículas coloidales chocan se unen para formar partículas de mayor tamaño.

Al proceso físico mediante el que se favorece que estas partículas choquen se le denomina floculación. Normalmente, en el tratamiento de un agua el proceso de floculación se consigue agitando suavemente el agua residual para favorecer el movimiento interno de las partículas coloidales.

FIGURA N°: 4.2

MECANISMOS DE COAGULACIÓN DE PARTÍCULAS COLOIDALES.



Fuente: Martínez (2008)

En este sentido, la coagulación o floculación de barrido, y la resultante de la formación de enlaces interpartículas, son mecanismos que no están claramente englobados en el concepto de coagulación y/o floculación, sino en ambos simultáneamente, y como tal aparecen mezclados en la bibliografía.

4.2.2 Definición de electrocoagulación.

Restrepo y otros .(2006) define la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas

paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados.

Morante y otros (2002) La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional.

Se han desarrollado importantes avances en la electrocoagulación, el investigador; Morales (2010) estudió con 10 Litros de agua residual de vertimiento de una empresa de recubrimiento, Los análisis se hicieron, mediante la confrontación de parámetros de Cr, Cr⁺⁶, Ni, Pb y Zn, antes y después del tratamiento de electrocoagulación. Se obtuvo una reducción en Cr del 51.65%, donde el valor arrojado está por debajo de los estándares establecidos en materia de vertimientos y para el: Ni del 18.09%, Pb del 50%, Zn del 47.37%, los cuales a pesar de la remoción producida tienen valores superiores a lo estipulado en esta normativa.

4.2.3 Reacciones Químicas asociadas a la electrocoagulación.

Martínez (2008), En disolución acuosa todos los metales se encuentran hidratados hasta cierto punto y, por tanto, es razonable pensar en la existencia de una capa de hidratación primaria alrededor del ión metálico, donde las moléculas de agua están en contacto con el ión metálico central, y una segunda capa de hidratación alrededor de la primera. Debido a la carga del ión metálico, las moléculas de agua de la primera capa de hidratación pueden estar polarizadas, y esto puede originar la pérdida de uno o más protones de algunas de las moléculas de agua presentes en la capa de hidratación primaria (en función del pH de la disolución), lo que se traduce en que las moléculas de agua en la capa de hidratación son progresivamente reemplazadas por iones hidroxilo, dando

lugar a una carga positiva más baja de la especie hidratada. De forma genérica, esto se observa en la secuencia de reacciones de un ión metálico trivalente que se muestra a continuación (Ver figura N° 4.3), en las que se han omitido, intencionadamente, las moléculas de hidratación:

CUADRO N° 4.2
REACCIONES DE METALES EN AGUA Y HIDROLISIS DEL AL III.

	Reacciones de ión metálico	Constantes de Hidrolisis, con fuerza iónica cero Me = Al
1	$\text{Me}^{+3} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}(\text{OH})^{+2} + \text{H}^{+1}$	$\text{pK}_1 = 4.9$ (Bajas concentraciones)
2	$\text{Me}(\text{OH})^{+2} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}(\text{OH})_2^{+} + \text{H}^{+1}$	$\text{pK}_2 = 5.6$ (Bajas concentraciones)
3	$\text{Me}(\text{OH})_2^{+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}(\text{OH})_3 + \text{H}^{+1}$	$\text{pK}_3 = 6.7$ (Bajas concentraciones)
4	$\text{Me}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}(\text{OH})_4^{-} + \text{H}^{+1}$	$\text{pK}_4 = 5.6$ (Bajas concentraciones)
5	$\text{Me}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Me}^{+3} + \text{H}^{+1}$	$\text{pK}_5 = 31.5$

Fuente: Martínez (2008)

En el caso del ión aluminio, es conocido que la capa de hidratación primaria consiste en seis moléculas de agua en coordinación octaédrica Richens, (1997), y que la química acuosa del ion aluminio es muy compleja, y sobrepasa el nivel de complejidad de las especies monoméricas, ya que éstas se pueden combinar para dar especies de mayor peso molecular. Así, es conocido que, como productos de la hidrólisis del Aluminio (III), pueden formarse especies de peso molecular intermedio (oligómeros), tales como los dímeros y trímeros, y también especies de elevado peso molecular (polímeros) entre las que la más conocida es el tridecámero. Sin embargo, para bajas concentraciones de metal puede ignorarse la formación de estas especies, y considerar solamente la formación de especies monoméricas.

En el esquema de reacciones mostrado se enumeran consecutivamente las especies que se forman con el aumento del pH. En el caso del

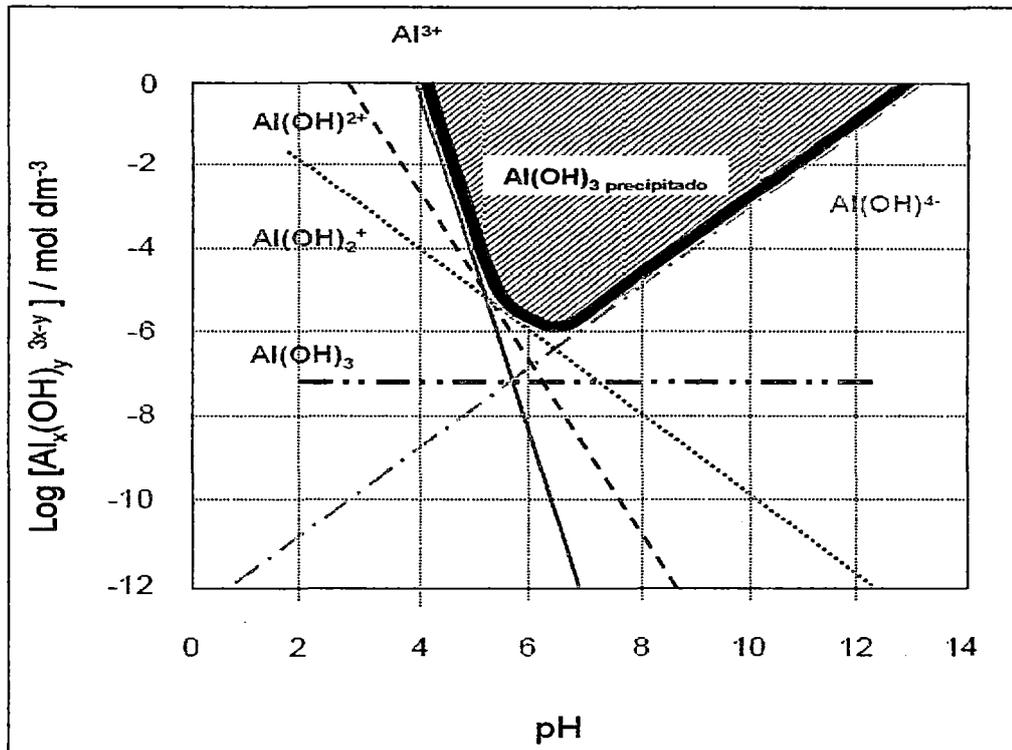
aluminio, el hidróxido que se forma tiene una solubilidad muy baja (Ver figura N° 4.3), y, por tanto, se forma un precipitado amorfo para pHs cercanos a la neutralidad, siendo de una gran importancia en la utilización de este metal en los procesos de coagulación. Debido a la formación de hidróxidos insolubles y de especies poliméricas, la determinación de las constantes de hidrólisis es complicada, y existen diferencias importantes entre los valores publicados por distintos autores. (Ver figura N° 4.3), se muestran los valores de las constantes de equilibrio obtenidos por Wesolowski y Palmer (1994).

A partir de los valores mostrados en cuadro se puede construir el diagrama de especies monoméricas de aluminio en función de la concentración y del pH, que se muestra en la figura 4.4.

Como se ha comentado anteriormente, este diagrama es una aproximación que considera únicamente especies monoméricas, y que puede asumirse acertado cuando se trata de sistemas diluidos, sin embargo para concentraciones de aluminio elevadas es necesario tener en cuenta la formación de diferentes especies poliméricas de aluminio.

Los productos poliméricos de hidrólisis de aluminio se forman en concentraciones significativas bajo determinadas condiciones. Numerosas técnicas han empleado para demostrar la existencia de especies poliméricas y el compuesto más referenciado es el tridecámero ($\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})^{+7}_{24}$ o "Al¹³"), que puede ser generado fácilmente mediante neutralización controlada de disoluciones de sales de aluminio, y que ha sido caracterizado mediante métodos de rayos X, Bottero *et al.*, (1982). La Figura 4.4, muestra una distribución típica de especies poliméricas en función del pH, en la que se observa que son los dímeros y el tridecámero las especies predominantes en el intervalo de pH entre 3,5 y 4,5

FIGURA N°: 4.3
 CONCENTRACIÓN DE ESPECIES MONÓMICAS DE ALUMINIO EN
 EQUILIBRIO CON EL HIDRÓXIDO AMORFO, EN CONDICIONES DE
 FUERZA IÓNICA CERO Y T=25°C Y PH VARIABLE.



Fuente: Martínez (2008)

4.2.4 Mecanismo de Electrocoagulación

Según Hanny (2009) La electrocoagulación es un proceso complicado, con múltiples mecanismos que interactúan simultáneamente. Una gran cantidad de opciones existen en literatura para un óptimo diseño del reactor aunque no hay ningún reactor de electrocoagulación que domine uso en el mercado, debido que las condiciones de operación marcan una gran diferencia en el desempeño de este equipo Holt otros(2002). Las diferencias de diseños de un reactor pueden ser de lecho fluidizado

empleando pastillas de aluminio, electrodos de aluminio bipolares, electrodos en malla, electrodos de placas simples y otros.

Los procesos físico-químicos que ocurren en un reactor de electrocoagulación se describen en la figura 4.5, presentada a continuación.

4.2.5 Aplicaciones de la electrocoagulación

(Montes 1996) El proceso de electrocoagulación se emplea en diferentes aplicaciones

- ✓ Remoción de aceites de los efluentes de refinerías.
- ✓ Remoción de Sílice.
- ✓ Recuperación de grasas y aceites de animales para la producción de ácidos grasos y glicerol en industrias de cárnicos.
- ✓ Remoción de fenoles.
- ✓ Recuperación y remoción de metales.
- ✓ Remoción de cianuros.
- ✓ Tratamiento electrolítico de efluentes domésticos.
- ✓ Remoción de compuestos orgánicos en la industria del petróleo.
- ✓ Tratamiento de efluentes en la industria de alimentos.

4.2.6 Componentes de un sistema de electrocoagulación.

Un electrocuagulador (Ver figura N° 4.4), denominado también reactor está constituido por:

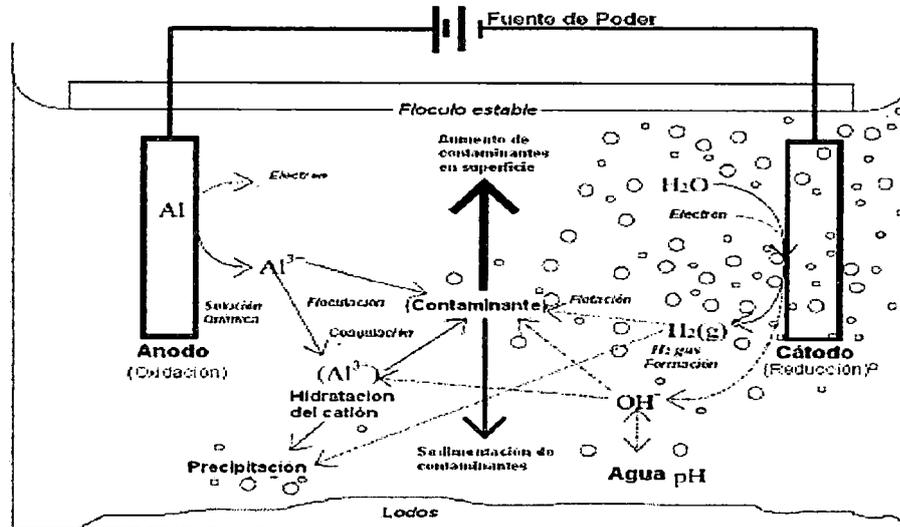
- ✓ Ánodo, Cátodo.
- ✓ Fuente de corriente-
- ✓ Recipiente/reactor-
- ✓ Sistema de agitación

CUADRO N°: 4.3
DESCRIPCIÓN DE REACCIONES EN EL ELECTROFLOCULADOR

Mecanismo e interacciones en un reactor de electrocoagulación		
Pasos	Descripción	Reacciones
Paso 1	El Al(s) en fase sólida es transferido en forma de iones a la solución acuosa(Disolución)	$Al (s) \rightarrow Al_{(aq)}^{+3} + 3 e^{-}$
Paso 2	Mientras que en el cátodo se desarrolla la formación de hidrógeno, la cual tiene una dependencia directa con el pH de la solución.	$2H_2O(l) + 2 e^{-} (s) \rightarrow H_{2(g)} + 2 (OH)^{-1}_{(aq)}$ $2H_{(aq)} + 2 e^{-} (s) \rightarrow H_{2(g)}$
Paso 3	los iones $Al(aq)^{3+}$ se combinan con los iones hidroxilos para formar hidróxido de aluminio, moléculas monoméricas o moléculas poliméricas (Nordsom,1989; Pourbaix,1963):	$Al (s) \rightarrow Al_{(aq)}^{+3} + 3 e^{-}$ Especies monoméricas $Al^{+3}_{(aq)} + H_2O(l) \rightarrow Al (OH)^{+2}_{(aq)} + H^{+1}$ $Al(OH)^{+2}_{(aq)} + H_2O(l) \rightarrow Al (OH)^{+1}_{2(aq)} + H^{+1}$ $Al(OH)_3^0_{(aq)} + H_2O(l) \rightarrow Al (OH)^{-1}_{4(aq)} + H^{+1}$ Especies Amorfas $Al(OH)^{+2}_{(aq)} + H_2O(l) \rightarrow Al (OH)_3^0_{(aq)} + H^{+1}$

Fuente: Hani y otros (2009)

FIGURA N° 4.4
INTERACCIONES EN EL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN.



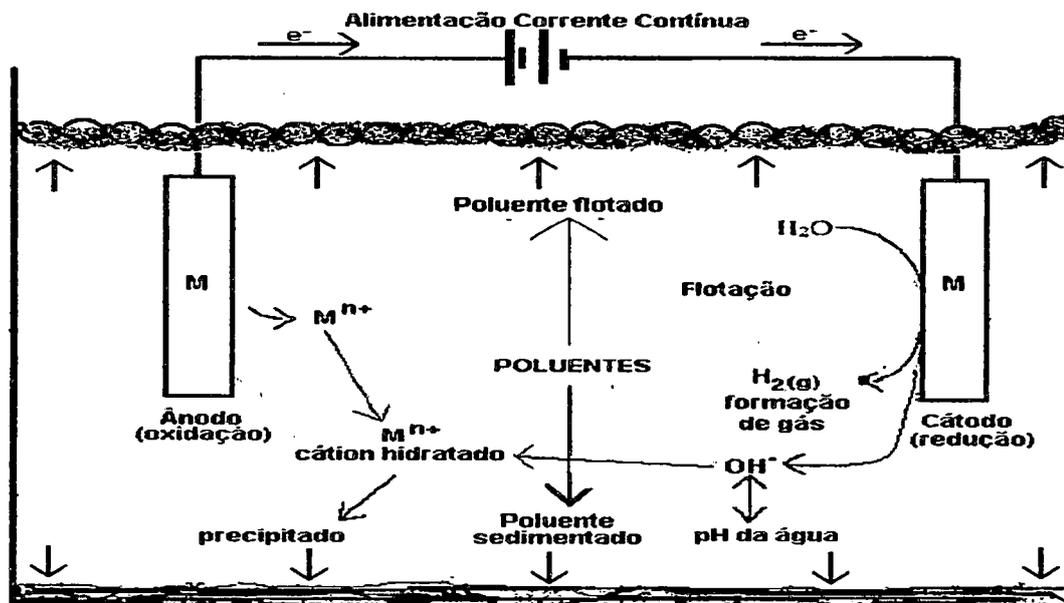
Fuente: Holt et al. (2002).

4.2.7 Principio de funcionamiento de la electrocoagulación.

(Montes 1996) La electrocoagulación es un método alternativo a los sistemas convencionales de tratamiento de efluentes y se basa en el principio de electrólisis, ya que combina la coagulación química con los principios eléctricos, produciendo iones metálicos de alta valencia como coagulante en celdas electrolíticas

El tratamiento electrolítico consiste en hacer pasar una corriente directa a través de electrodos de aluminio, cobre, hierro o grafito, sumergidos en el efluente a tratar. Este paso de corriente produce, además de otras reacciones electroquímicas, una electrólisis del agua (lo que sucede en el electrolito puede explicarse por el carácter **dipolar** del agua que impide que las sustancias que se disuelven en ella conserven sus moléculas intactas) con la consecuente formación de pequeñas burbujas de hidrógeno en el cátodo, y de oxígeno en el ánodo; con un tamaño promedio de 100 micrones.

FIGURA N° 4.5
 DIAGRAMA DE UN EQUIPO DE ELETROCOAGULACION



Fuente: Mollah otros(2004).

Las burbujas de gas se adhieren a las partículas suspendidas y las arrastran hacia la superficie de la solución formando una espuma que puede ser removida mecánicamente. A este proceso se le llama electroflotación, cuyas burbujas son muy estables por lo que conservan su gran superficie de contacto; además el efecto de neutralización de las cargas de la materia suspendida produce la ruptura de las emulsiones y una mejor y más rápida floculación de las partículas.

Uno de los aspectos importantes del proceso electrolítico es la neutralización de las cargas de las partículas suspendidas, por tanto, es necesario ajustar el potencial Z de las mismas a Potencial Z cero, con el objeto de facilitar la formación y adhesión de floculos con las burbujas de gas. La modificación en el pH del efluente, la adición de electrolitos en muy pequeñas cantidades, así como los iones, que quedan libres para la

disolución anódica del electrodo, contribuyen para alcanzar el potencial Z igual a cero.

4.2.8 Ventajas de la electrocoagulación.

Crespilho y otros (2004) presentan algunas ventajas y sus desventajas de la electrocoagulación.

CUADRO N° 4.4

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ La materia suspendida que se separa por electrocoagulación puede ser reprocesada y/o vendida como subproducto. ✓ El diseño de este sistema es más simple ya que no necesitan compresores ni bombas de alta presión, ni instrumentos para medición y control de sistemas presurizados. ✓ Los lodos generados es menor que en el caso de otros métodos aplicados industrialmente. ✓ El costo de operación de la electrocoagulación es menor al del tratamiento químico convencional. ✓ Las plantas de tratamiento de efluentes requieren menor área. ✓ El tiempo de tratamiento requerido es menor al de los métodos tradicionales. ✓ El tratamiento electrolítico permite la reutilización de los efluentes. ✓ Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros. ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación. ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos. ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos. ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Durante el proceso electrolítico el ánodo sufre desgaste por la liberación de los iones metálicos a la solución. Además estos se engrasan y se corroen por lo cual es necesario realizar una correcta limpieza. ✓ Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. ✓ Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado. ✓ Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. ✓ Purifica el agua y permite su reciclaje. ✓ El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación. ✓ Reduce la contaminación en los cuerpos de agua. ✓ El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados. ✓ Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras. ✓ Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad 	<p>energía eléctrica sea alto.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.
---	---

Fuente: Crespilho (2004)

Can y otros (2006) menciona que la electrocoagulación (CE) debido a algunas ventajas sobre la coagulación química se está convirtiendo en un proceso popular que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales. El objetivo de su trabajo fue investigar el efecto de la adición inicial de un coagulante químico tal como cloruro de polialuminio (PAC) o el alumbre en la eficiencia de eliminación de COD de tratamiento de aguas residuales textiles CE. Las dos sales exhibieron el mismo rendimiento en la coagulación química, pero en la electrocoagulación combinado (CEC), el PAC se encontró para aumentar significativamente la velocidad de eliminación de COD y la eficiencia, en función de la cantidad de aluminio total suministrado, mediante la adición inicial y la generación electroquímica. Un análisis comparativo de los costes de operación también fue dado y se encontró que con el mismo costo de operación por unidad de masa de COD eliminado, rendimiento CEC fue del 80%, en contraste con el 23% con CE, en 5 min de operación.



4.2.9 Mecanismos de reacción del ánodo y cátodo de aluminio

Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^+$, y otras poliméricas, tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_{3(s)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes.

CUADRO N°: 4.5
MECANISMO DE REACCIÓN DEL ALUMINIO.

MECANISMO I	
REACCIONES EN EL ANODO	$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$ $Al^{+3(ac)} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_{3(s)} + 3H^{+(ac)}$ $nAl(OH)_3 \rightarrow Al_n(OH)_{3n}$
REACCIONES EN EL CATODO	$3H_2O + 3e^- \rightarrow 3H_2 + 3OH^-$

Fuente: Restrepo M. et al (2006)

4.3. Factores que influyen en la electrocoagulación

4.3.1 El pH en la electrocoagulación.

Para Hanny (2009), las formas de aluminio mononuclear, las concentraciones de las diferentes formas que podemos encontrar el aluminio, varían dependiendo del pH que se encuentre la solución. La Figura 4.4, muestra las diferentes especies de aluminio presentes en una solución, en función del pH.

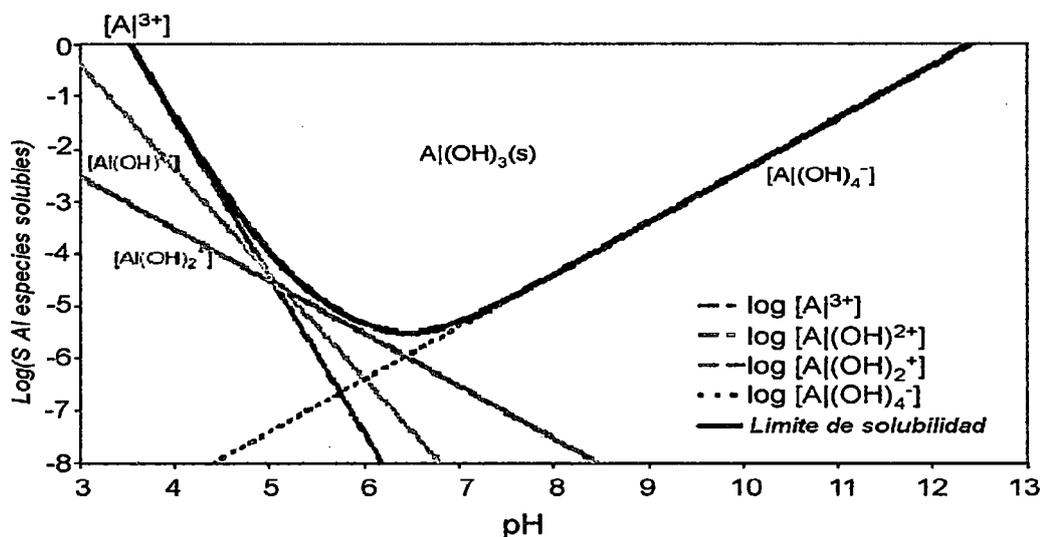
Holt y otros (2005) Representa el intervalo de pH en la cual se obtiene una mejor solubilidad del hidróxido de aluminio (Ver figura 4.1). Los

complejos de aluminio en su forma catiónica son adsorbidos en las partículas neutralizándolas Bensadok y otros (2008). El mejor rango de pH para encontrar estos complejos es entre 5.0 a 7.5, de esta manera se minimiza la forma no iónica del aluminio $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$.

Tavares y otros (2007) El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

FIGURA N°: 4.6
DIAGRAMA DE SOLUBILIDAD DE $\text{Al}(\text{OH})_3$ CONSIDERANDO SOLO
ESPECIES DE ALUMINIO MONOMÉRICAS.



Fuente: Hani (2009)

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH,

e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7.0.

Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6.0 y 8.0, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7.0

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH.

4.3.2 Conducción de corriente eléctrica en medios líquidos.

Hanny (2009), La conductividad eléctrica es una de las características más importantes de los electrolitos, ya que representa la capacidad de estos para transportar la corriente eléctrica. La resistencia de un conductor electrolítico al paso de la corriente se puede determinar mediante la ley de ohm, si se le aplica una diferencia de potencial a un fluido que contenga iones, se establecerá una corriente de iones positivos que se mueven en la dirección del campo eléctrico y los iones negativos lo harán en sentido contrario. La conductividad electrolítica es una medida de la disociación de una solución que permite el paso de la corriente eléctrica por lamigración de iones bajo la influencia de un gradiente de potencial. Los iones se mueven a una velocidad que depende de su carga y tamaño, la viscosidad del medio y la magnitud del gradiente de potencial.

Ley de ohm: $V = I * R$

V = Voltaje aplicado en la celda.

I = Intensidad de corriente.

R = Resistencia de la celda.

4.3.2.1 Densidad de corriente.

Tavares y otros (2007) En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante.

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos.

Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura.

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción.

Un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de la electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o $CaCl_2$ genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha

encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{+2} pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- alrededor del 20%.

4.3.2.2 Potencial de reducción.

Hanny (2008), La fuerza electromotriz o fem (E) de una celda en particular, es el potencial que se mide entre los 2 electrodos en ausencia de conexión externa. Su signo se define positivo para la celda voltaicas, $E > 0$ y negativos para celda electrolíticas, $E < 0$.

El potencial varia con las concentraciones del reactivo, por consiguiente, a continuación se muestra los datos tabulados de potenciales de oxidación en agua y condiciones normales (ver figura N° 4.8).

4.3.2.3 Reducción de la concentración de hierro

La remoción y/o reducción de hierro se define como

$$\% R = (\text{Ci} - \text{Cf}) / \text{Ci} \times 100$$

Donde:

R: Porcentaje de remoción del parámetro analizado.

Ci: concentración inicial del parámetro.

Cf: concentración final del parámetro.

CUADRO N° 4.6
 POTENCIALES DE REDUCCIÓN DE ESPECIES INTERVINIENTES EN
 LA ELECTROCOAGULACIÓN.

Potencial (V)	Reacciones de reducción
+1.36	$Cl_2 + 2e^{-1} \rightarrow 2Cl_{aq}^{-1}$
+1.23	$O_{2(g)} + 4H_{(aq)}^{+1} + 4e^{-1} \rightarrow H_2O_{(l)}$
+0.77	$Fe_{(aq)}^{+3} + e^{-1} \rightarrow Fe_{(aq)}^{+2}$
+0.68	$O_{2(g)} + 2H_{(aq)}^{+1} + 2e^{-1} \rightarrow H_2O_{2(aq)}$
+0.40	$O_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 4e^{-1} \rightarrow 4OH_{(aq)}^{-1}$
0	$2H_{(aq)}^{+1} + 2e^{-1} \rightarrow H_{2(aq)}$
-0.44	$Fe_{(aq)}^{+2} + 2e^{-1} \rightarrow Fe_{(s)}$
-0.83	$H_2O_{(l)} + 2e^{-1} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH_{(aq)}^{-1}$
-1.66	$Al_{(aq)}^{+3} + 3e^{-1} \rightarrow Al_{(s)}$

Fuente: Hanny (2009)

Hernandez y otros (2005) Para formular un sistema electroquímico de máximo rendimiento para uso práctico en el tratamiento de aguas residual e industrial, fueron llevados a cabo experimentos de proceso electroquímico a nivel de laboratorio, con aguas residuales municipales. En base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, se implementó un sistema de tratamiento electroquímico a escala piloto de 0,3 m³/h, usando los procesos de electrocoagulación. El rendimiento del sistema se evaluó tratando aguas residuales domésticas, aguas de lagunas conteniendo algas, aguas residuales de purines. Se utilizaron ánodos de Ti/RuO₂ – TiO₂ y con ánodos de platino. La eliminación de SS, N₂ total, P total, NH₄-N y DQO de las aguas residuales domésticas y agua de laguna conteniendo algas fue del 90%, mientras que la eliminación de clorofila de las algas fue del 100%.

Hernandez y otros. (2005). En este trabajo se muestran estudios y experiencias sobre el uso de la desinfección electroquímica como alternativa a la desinfección con cloro. Las experiencias de desinfección electroquímica demostraron ser efectivas sobre *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli* y *Cryptosporidium parvum*. En el trabajo se describe el equipo utilizado, consistente en una celda electroquímica tipo Zappi con ánodos de platino-niobio y cátodos de acero inoxidable. Las conclusiones de este trabajo son que la desinfección electroquímica es la más efectiva para aguas que contengan cloruros, que la remoción de *E. coli* y el bacteriófago MS2 en la desinfección electroquímica es de cuatro potencias logarítmicas, y que los posibles fallos de los electrodos en la desinfección electroquímica se corrigen alternando la polaridad.

4.4. Agua sintética.

El agua sintética es aquella preparada en el laboratorio a condiciones especiales de concentración de hierro (16.0 ppm) y pH, con el fin de representar un agua contaminada, para su preparación se ha tomado de agua de 0.05 micro-siemens, y se ha preparado en 2 partes:

Parte 1: Pesa en el vaso precipitado 0.0161 g de Fe en polvo

Agregar 15 ml de Ácido Clorhídrico, llevar al fuego y atacar todo el Fe por unos 10 min.

Parte 2: Pesar 3.092g de Ácido Bórico, 3.728 g de Cloruro de Potasio, 1.756 g Hidróxido de Sodio. (Composición para el Buffer pH 10.0, para 1000 ml), agregar 700 ml de agua destilada.

Mezclar la parte 1 y parte 2, tomamos el pH, al agregar el Fe con ácido Clorhídrico el pH es muy ácido 3 o 4, para aumentar el pH vamos agregar 5 ml a hidróxido de Sodio a 2.0 N, luego seguimos agregando el Hidróxido de Sodio hasta Obtener el pH = 6.0. Este procedimiento de repite para el pH = 7.0 y pH = 8.0.

V. MATERIALES Y METODOS

Los materiales y procedimientos experimentales utilizados para el desarrollo de esta investigación, en el laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao

5.1 Materiales, Insumos y equipos.

5.1.1 Materiales.

- Probeta clase A-Pirex, de 1000ml
- Cables N° 24
- Recipientes de Vidrio(Reactor)- 27 unidades de 1000ml
- Fiolas clase A-Pirex, de 25,50,100 y 1000ml
- Pipetas clase A-Pirex, 5ml
- Electrodos de aluminio 100% puro
- Cierra metálica

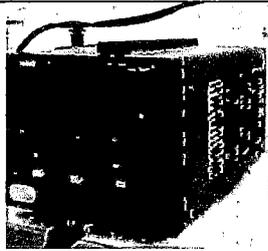
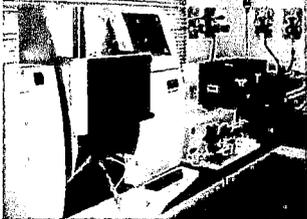
5.1.2 Insumos.

- Cloruro de Potasio
- Ácido Bórico
- Hidróxido de Sodio(2.0 N)
- Fe en polvo 0.0161 g
- Ácido Clorhídrico
- Agua Bi-Destilada
- Cloruro de Potasio

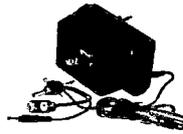
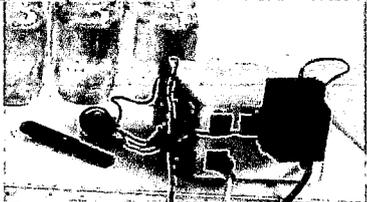
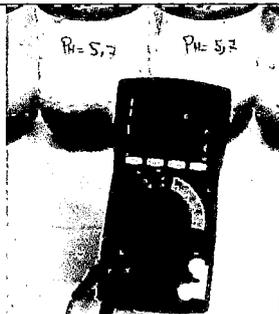
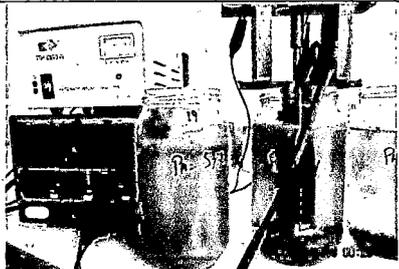
5.1.3 Equipos.

Para garantizar un correcto desarrollo de proceso en la investigación nos agenciamos de los siguientes equipos, que incluyen desde un reactor hasta un equipo de absorción atómica.

FIGURA N° 5.1
EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA PRUEBA

1. Medidor de pH o potenciómetro.	
2. Fuente de poder de 0-30V y 1-5 Amp, PRASEK-PREMIUN PRP-3705 POWER SUPPL	
3. Equipo de absorción: modelo Contra A_300_ENG Atomic Absorption Spectrometer.	
4. Cronometro	



<p>5. Motor 0-12 V con eje de Agitador de 3mm x 25cm</p>	
<p>6. Transformador universal de 0.0 -1.0 Amp</p>	
<p>7. Estabilizador de frecuencia de 1000 V-A</p>	
<p>8. Amperimetro SANWA 777, auto- rango</p>	
<p>9. Reactor de 800ml de capacidad, material de vidrio, rango de 0 a 300RPM</p>	

[Handwritten signature]

Fuente: Elaboración propia-2014

5.2 Población de la investigación

El estudio se desarrolló en un módulo de electrocoagulación, en el que se tendrá un reactor de un volumen de 800 ml de agua con una concentración de hierro (16mg/L), el reactor estará provisto de 2 placas de aluminio al

100% de pureza, separadas a una distancia de 10mm. El cambio de voltaje y amperaje se provee con una fuente de corriente continua el mismo que permite graduar el amperaje y voltaje.

5.2.1 Población de Estudio.

No se tiene la población de estudio. El trabajo fue desarrollado con agua sintética con contaminante de hierro en forma de FeCl_3 , ajustados a los pHs, de investigación.

5.2.2 Tamaño de Muestra.

La muestra de agua preparada simula agua contaminada con hierro a la que se ha denominado agua sintética, la misma que contiene 16 ppm de hierro total

De acuerdo al diseño experimental se hicieron necesarias 27 muestras de 800 ml de volumen (Volumen sugerido por las referencias bibliográficas Las muestras simuladas de agua (agua sintética) se obtuvieron preparando soluciones de hierro (16ppm), diluidos en ácido clorhídrico y para mantener las condiciones de investigación se utilizaron Buffer de 6,7 y 8. El procedimiento de preparación se realizó en dos partes:

Parte 1: Pesar en el vaso precipitado 0.0161 g de Fe en polvo, luego se agrega 15 ml de Ácido Clorhídrico, para posteriormente hacer un ataque químico en plancha de calentamiento a $T > 80^\circ\text{C}$ por 10min y agregar 50ml de agua, en forma paralela se realizó la parte 2.

Parte 2: Pesar 3.092g de Ácido Bórico, 3.728 g de Cloruro de Potasio, 1.756 g Hidróxido de Sodio. (Composición para el Buffer pH 10.0, para 1000 ml), agregar 700 ml de agua destilada y mezclar la parte 1 y parte 2, hasta completar los 800ml, tomamos el pH que en este caso se encuentra entre

4 y 5, para su regulación se utilizaron volúmenes pequeños (1-5ml) de hidróxido de Sodio a 2N, hasta Obtener el pH 6.0. Este procedimiento de repite para el pH =7.0 y pH = 8.0.

5.3 Técnicas de recolección de datos.

Considerando que el objetivo es la reducción de la concentración del hierro en agua sintética utilizando el proceso de electrocoagulación, y sabiendo que la electrocoagulación depende de las variables: Densidad de corriente pH, se hace necesario recolectar los datos de las variables en mención para lo cual se ha diseñado el Cuadro N° 5.1.

CUADRO N° 5.1
CUADRO DE EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

NUMERO DE MUESTRA	TIME (min)	pH	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A/m ²)	Fe(mg/L)	AL(mg/L)
0	0	6.0	10.0		
1	4	6.0	10.0		
2	8	6.0	10.0		
3	12	6.0	10.0		
4	16	6.0	10.0		
5	0	6.0	20.0		
6	4	6.0	20.0		
7	8	6.0	20.0		
8	12	6.0	20.0		
9	16	6.0	20.0		
10	0	6.0	30.0		
11	4	6.0	30.0		
12	8	6.0	30.0		
13	12	6.0	30.0		
14	16	6.0	30.0		

15	0	7.0	10.0		
16	4	7.0	10.0		
17	8	7.0	10.0		
18	12	7.0	10.0		
19	16	7.0	10.0		
20	0	7.0	20.0		
21	4	7.0	20.0		
22	8	7.0	20.0		
23	12	7.0	20.0		
24	16	7.0	20.0		
25	0	7.0	30.0		
26	4	7.0	30.0		
27	8	7.0	30.0		
28	12	7.0	30.0		
29	16	7.0	30.0		
30	0	8.0	10.0		
31	4	8.0	10.0		
32	8	8.0	10.0		
33	12	8.0	10.0		
34	16	8.0	10.0		
35	0	8.0	20.0		
36	4	8.0	20.0		
37	8	8.0	20.0		
38	12	8.0	20.0		
39	16	8.0	20.0		
40	0	8.0	30.0		
41	4	8.0	30.0		
42	8	8.0	30.0		
43	12	8.0	30.0		
44	16	8.0	30.0		

Fuente: Elaboración propia-2014

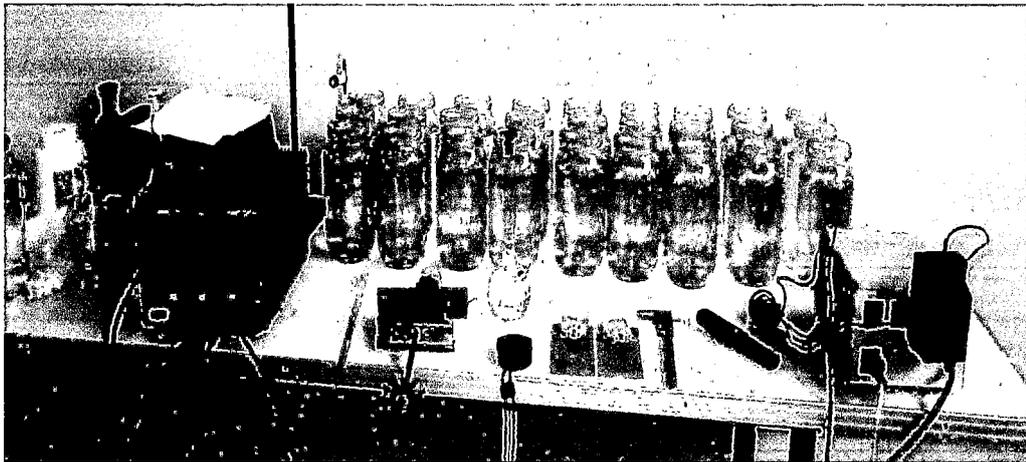
Los experimentos se llevaron a cabo en módulos de prueba, contruidos para tal efecto, estos módulos sirvieron para la llevar acabo la electrocoagulación que se realizó variando: pH, tiempo y densidad de corriente como se muestra en Cuadro N° 5.1

5.3.1 Módulo de prueba

Se prepararon 27 módulos de prueba a los que se les llamó reactores tipo batch, con las siguientes características:

- Agitador de 300 RPM, eje de 25 cm y 3mm de diámetro.
- 01 impulsor tipo hélice
- Electrodos de aluminio 100% puro de 2mm x 6.75cm x 13.75cm

FIGURA N° 5.2
EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA PRUEBA DE
ELECTROCOAGULACIÓN



5.3.2 Determinación de Hierro total por absorción atómica.

La metodología para el análisis de hierro total mediante espectrofotometría de absorción atómica: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA. AWWA. WEF. 21th edition 2005, Part 3000. Direct Air-Acetylene Flame Method -3111 B, han sido adoptadas por los proveedores del equipo, marca Analytik Jena modelo Contra A_300_ENG. Las mismas que tienen los instructivos de análisis en el Manual de Usuario, Continuum Source: Atomic Absorption Spectrometer. Aspectos_300_ENG_V14 y el Software for HR-CS AAS Aspect CS: el equipo trabaja con presiones recomendadas de aire y acetileno.

CUADRO N° 5.2

INTERVALOS DE ALIMENTACIÓN DE GAS EN EQUIPO: CONTRA A_300_ENG ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETER.

GAS / AIRE	Intervalos Recomendados de Presión de Salida
C ₂ H ₂	80 - 150 kPa
AIRE	400 – 600 kPa
N ₂ O	300 – 600 kPa

Fuente: Analytik Jena

5.3.2.1. Calibración del equipo Analytik Jena modelo Contra A_300_ENG.

Para la calibración se siguen los siguientes pasos:

- Encender el estabilizador de voltaje (UPS) presionando el interruptor, encender el Espectrofotómetro presionando el interruptor en "I", se encenderá la luz verde y el equipo procederá a encender la lámpara de

“Xenon” de manera automática (2 min. aprox.), abrir el software ASpect CS, Luego de abrir el software ASpect CS, aparecerá la ventana “Main Settings”. Hacer clic en “Initialize” luego en “OK”

- Hacer clic en el botón “Spectrometer” en la ventana “Select Element/Line” luego seleccionar el elemento Cu y la longitud de onda 324.754 y hacer clic en “OK”.
- Con el quemador de 5 cm hacer clic en el botón “Method” aparecerá la ventana “Method” hacer clic en “Open”, luego aparecerá la ventana “Load method”, seleccionar “Operatividad Cu” y hacer clic en “OK” y luego encender la flama “Ignite Flame”
- Aspirar la solución de 0.5, 1, 2ppm, hasta obtener la máxima absorbancia graduando la perilla del nebulizador, anotar la absorbancia obtenida en el archivo operatividad, luego hacer clic en “Close”. Luego Ir a “File/Open Sequence” aparecerá la ventana “Open Sequence”, en la cual existen secuencias pre definidas para los análisis que se realizan en el laboratorio, de inmediato el equipo hace la correlacion de absorbancia y concentración para Cobre,
- Luego de verificar una alta correlación con el cobre se calibra el elemento a analizar que para nuestro caso es hierro y aluminio, con la condición es que para el caso del análisis de aluminio se utiliza óxido nitroso y para el cobre y hierro se utiliza acetileno como gas de combustión.
- Las longitudes de onda para cada elemento fueron los siguiente: para el cobre 324.754nm, para el hierro 248.327 nm y para el caso del aluminio fue de 396.152nm, valores recomendados por Analytik Jena modelo Contra A_300_ENG. Para el caso del hierro fueron necesarios realizar diluciones para su lectura debido a que la curva de calibración del equipo soporta hasta un máximo de 2.0 ppm y las muestras fueron desde 16.0 ppm

5.3.2.2. Expresión de resultados.

Aunque el Analytik Jena modelo Contra A_300_ENG, reporta de manera directa los resultados, para calcular la concentración de hierro o aluminio se puede realizar la siguiente expresión:

$$\text{Fe (mg /l)} = (\text{L} - \text{Blanco}) \times \text{d}$$

Dónde:

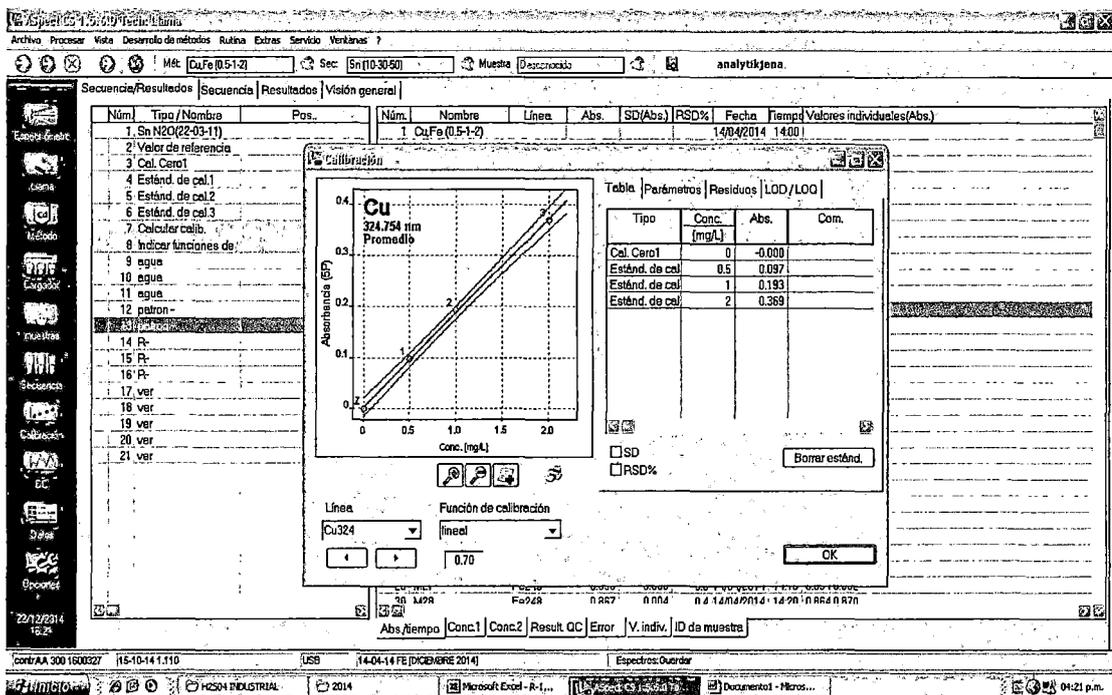
(mg Fe/l) = concentración, expresada en miligramos de hierro por litro.

L = lectura de la muestra en mg/l.

Blanco = lectura del blanco reactivo sometido al mismo proceso de las muestras

d = factor de dilución o concentración.

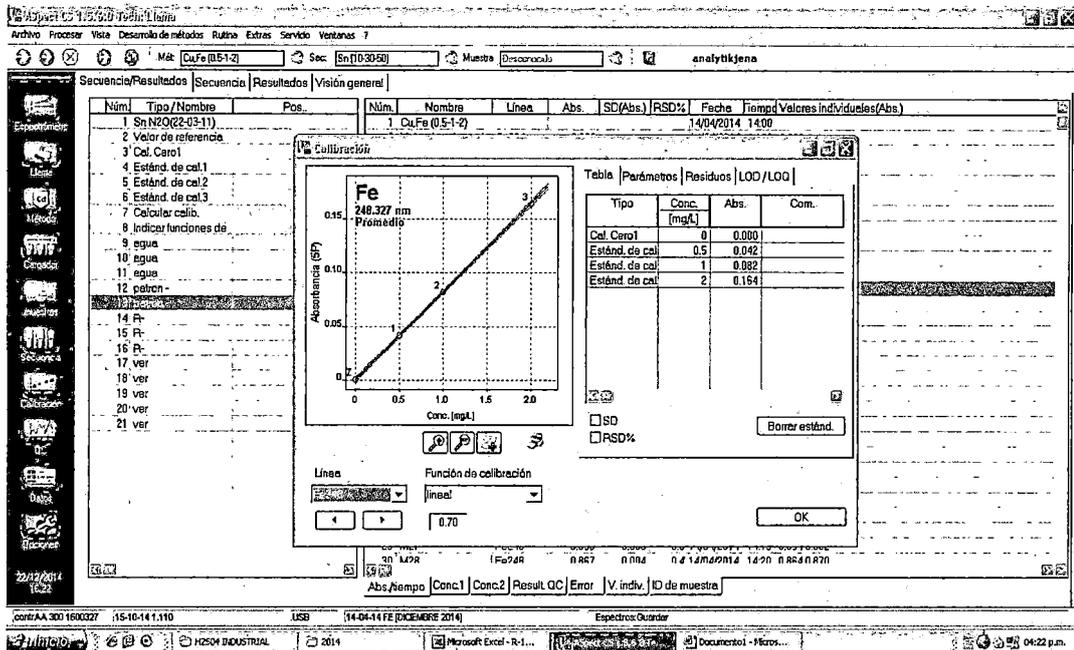
FIGURA N° 5.3
CURVA DE CALIBRACIÓN DE CU: 0.5, 1.0, 2.0 ppm



Fuente: Analytik Jena

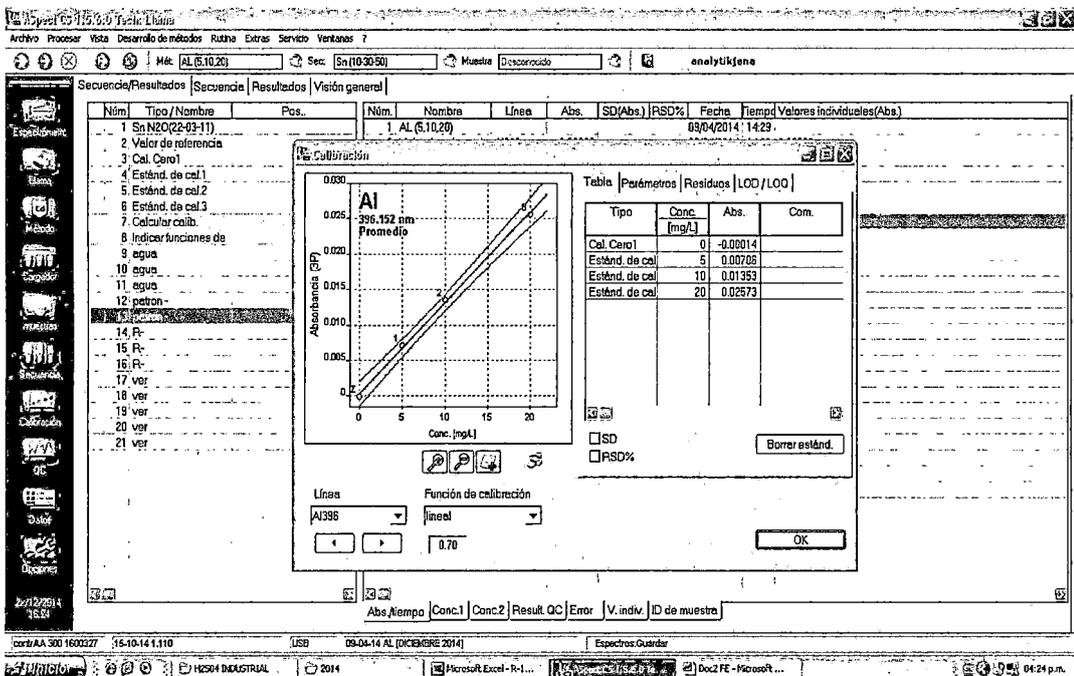
FIGURA N° 5.4:

CURVA LINEAL DE CALIBRACIÓN DE FE: 0.5, 1.0, 2.0 ppm



Fuente: Analytik Jena

FIGURA N° 5.5
CURVA DE CALIBRACIÓN DE AL, 5, 10, 20 PPM



Fuente: Analytik Jena

5.3.3 Determinación de pH.

Se realizará con el equipo Hanna-HI-110, la lectura es directa previa calibración con soluciones buffer pH = 4.0 y pH = 7.0.

5.3.4 Determinación de Amperaje y Voltaje

Se utilizó el Voltímetro- Amperímetro marca SANWA-777 es un aparato que mide la diferencia de potencial entre dos puntos. Para efectuar esta medida se coloca en paralelo entre los puntos cuya diferencia de potencial se desea medir. Los cables de medida considerando las posiciones del rango de voltaje

5.4 Métodos estadísticos

Para la validación de las pruebas se ha realizado un análisis de varianza utilizando el Excel como software de ayuda, esta prueba estadística permite ver la influencia de las variables.



VI. RESULTADOS.

6.1 Resumen de los resultados de la experimentación.

Las pruebas realizadas responden a la hipótesis general y la específica y los reajustes propios de la investigación.

CUADRO N° 6.1
RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

TIEMPO(min)	pH	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/m ²)	% REDUCCION DE "Fe"	Fe(ppm)	Al(ppm)	Arreglo/Elect rodo
				16.10		
0.00	6.00	10.00	24.84%	12.10	0.00	Al-Al
4.00	6.00	10.00	24.84%	12.10	1.70	Al-Al
8.00	6.00	10.00	26.09%	11.90	2.40	Al-Al
12.00	6.00	10.00	26.71%	11.80	4.66	Al-Al
				16.00		
0.00	6.00	20.00	24.22%	12.20	0.00	Al-Al
4.00	6.00	20.00	25.47%	12.00	2.99	Al-Al
8.00	6.00	20.00	27.33%	11.70	5.97	Al-Al
12.00	6.00	20.00	26.71%	11.80	8.66	Al-Al
				16.10		
0.00	6.00	30.00	23.60%	12.30	0.00	Al-Al
4.00	6.00	30.00	24.22%	12.20	3.78	Al-Al
8.00	6.00	30.00	25.47%	12.00	10.37	Al-Al
12.00	6.00	30.00	24.84%	12.10	16.17	Al-Al
				16.10		
0.00	7.00	10.00	19.25%	13.00	0.11	Al-Al
4.00	7.00	10.00	34.78%	10.50	5.42	Al-Al
8.00	7.00	10.00	36.02%	10.30	6.44	Al-Al
12.00	7.00	10.00	34.16%	10.60	6.55	Al-Al
				16.10		
0.00	7.00	20.00	35.40%	10.40	3.15	Al-Al
4.00	7.00	20.00	34.16%	10.60	4.73	Al-Al
8.00	7.00	20.00	35.40%	10.40	7.82	Al-Al
12.00	7.00	20.00	32.30%	10.90	14.09	Al-Al

				16.00		
0.00	7.00	30.00	34.16%	10.60	0.09	Al-Al
4.00	7.00	30.00	33.54%	10.70	6.49	Al-Al
8.00	7.00	30.00	34.78%	10.50	12.63	Al-Al
12.00	7.00	30.00	34.16%	10.60	20.13	Al-Al
				16.00		
0.00	8.00	10.00	79.44%	3.31	0.00	Al-Al
4.00	8.00	10.00	81.24%	3.02	1.91	Al-Al
8.00	8.00	10.00	70.81%	4.70	2.10	Al-Al
12.00	8.00	10.00	78.51%	3.46	3.85	Al-Al
				16.10		
0.00	8.00	20.00	85.90%	2.27	0.00	Al-Al
4.00	8.00	20.00	76.34%	3.81	2.67	Al-Al
8.00	8.00	20.00	85.09%	2.40	5.54	Al-Al
12.00	8.00	20.00	70.31%	4.78	8.60	Al-Al
				16.00		
0.00	8.00	30.00	67.89%	5.17	0.00	Al-Al
4.00	8.00	30.00	88.76%	1.81	4.76	Al-Al
8.00	8.00	30.00	76.46%	3.79	8.37	Al-Al
12.00	8.00	30.00	75.22%	3.99	11.66	Al-Al

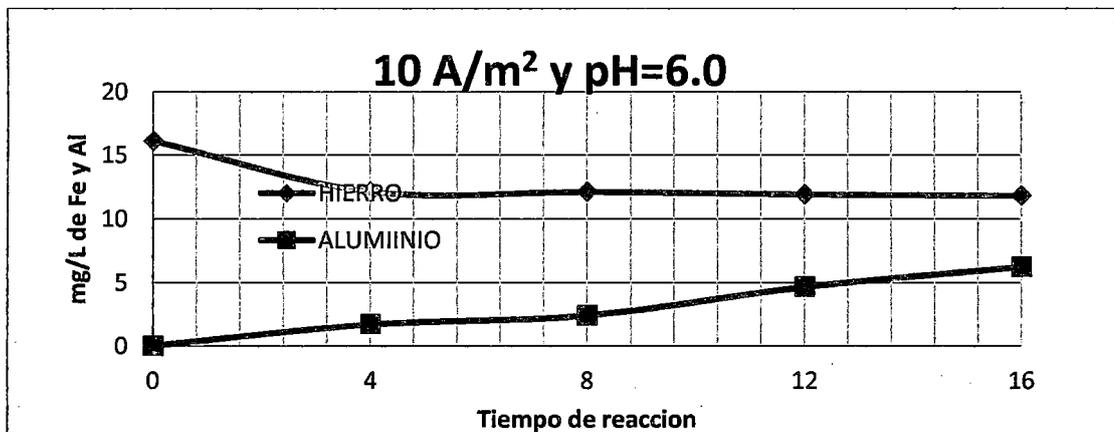
Fuente: Elaboración propia-2014

* Al-Al, Aluminio-Aluminio.

6.2 Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=6.0, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.

GRÁFICO N° 6.1

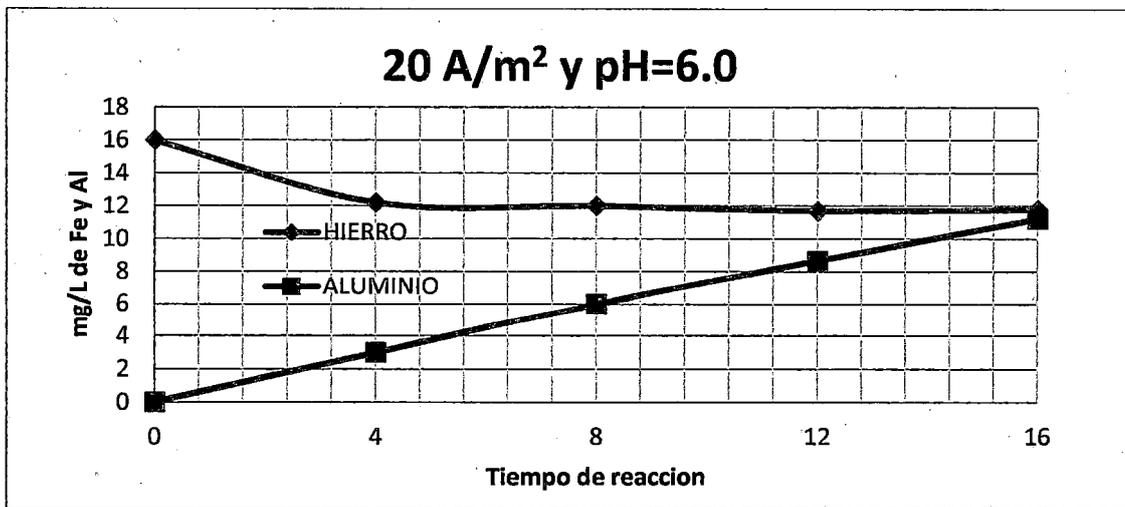
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m², Y PH=6.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.2

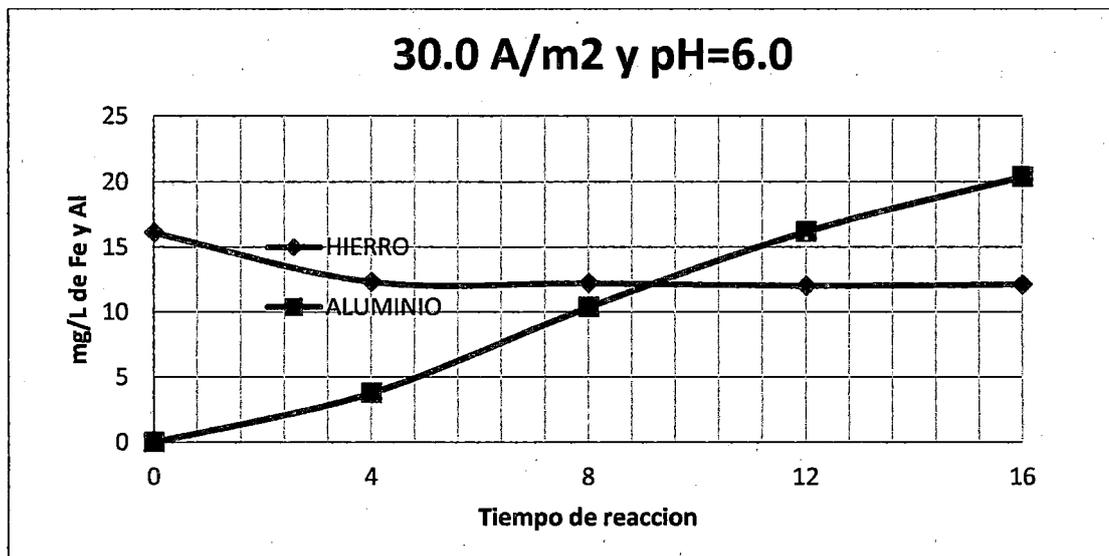
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m². Y PH=6.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.3

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m². Y PH=6.0



Fuente: Elaboración propia-2014

- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=6.0, y a densidades de corriente de 10.0 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 11.5 ppm de Fe, y en relación

a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 6.0 ppm en el minuto 16.

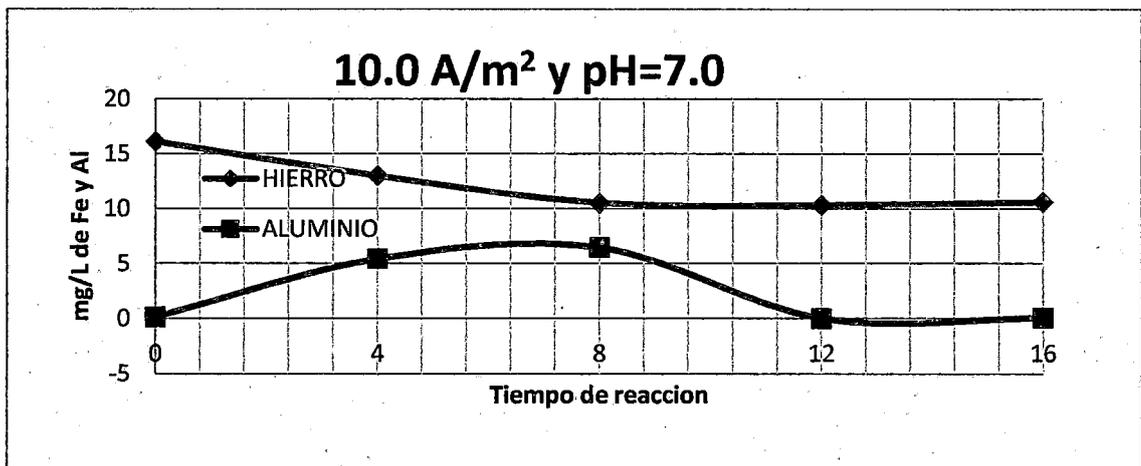
- De los resultados, podemos afirmar que a pH=6.0, y a densidades de corriente de 20 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 11.5 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 11.22 ppm en el minuto 16.
- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=6.0, y a densidades de corriente de 30 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 11.2 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 20.35 ppm en el minuto 16.

6.3 Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=7.0, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.



GRÁFICO N° 6.4

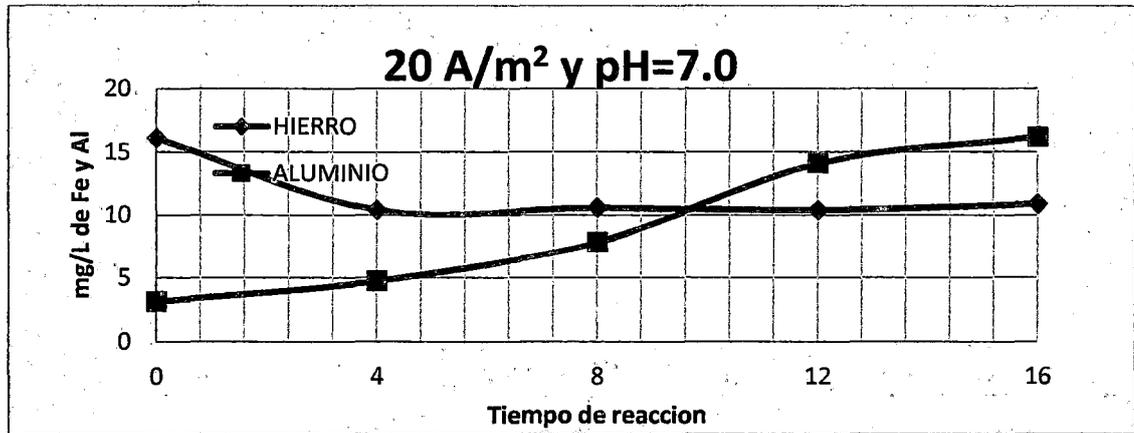
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m². Y PH=7.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.5

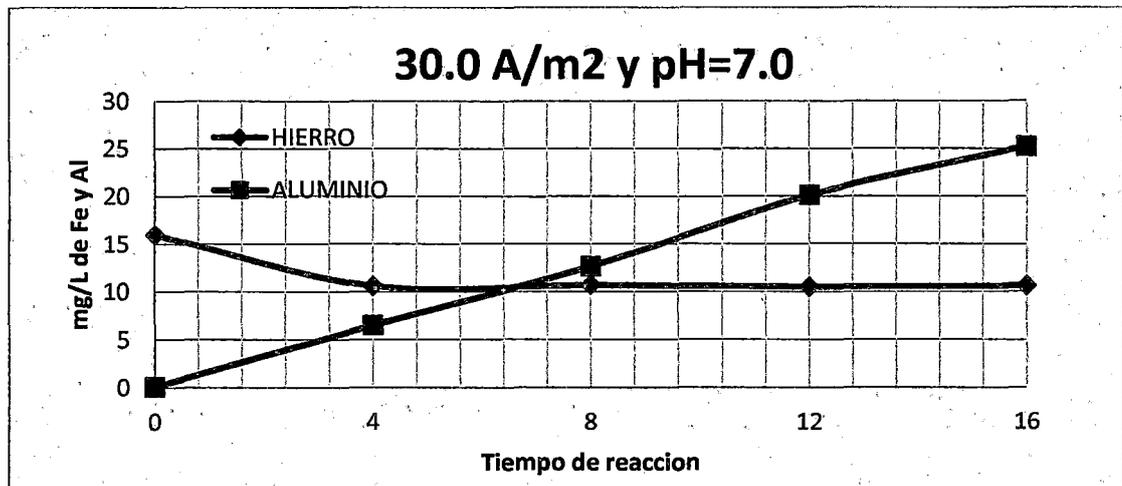
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m² Y PH=7.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.6

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m². Y PH=7.0



Fuente: Elaboración propia-2014

- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=7.0, y a densidades de corriente de 10 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 10.30 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio,

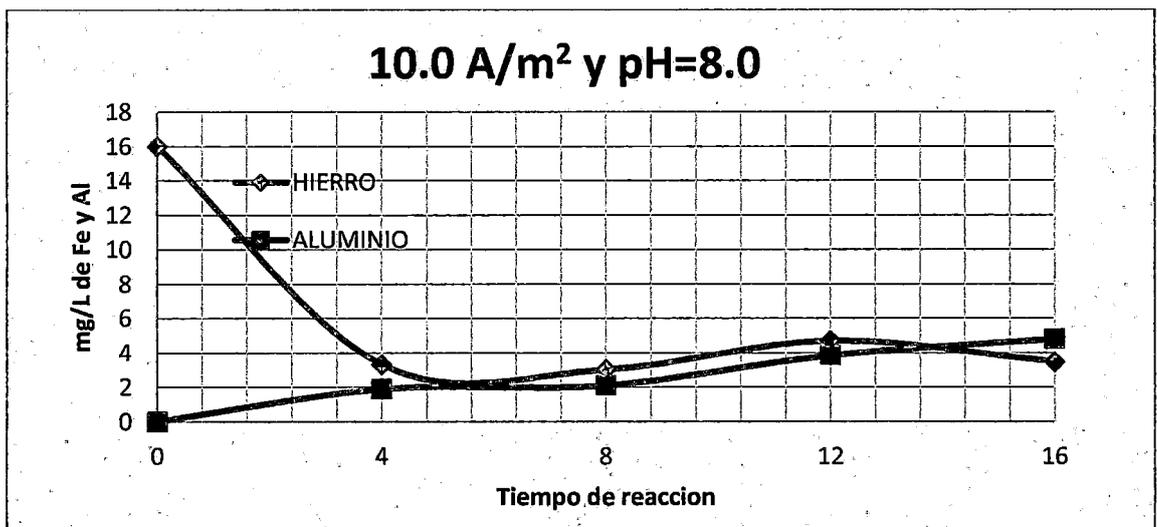
incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 6.43 ppm en el minuto 6.43.

- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=7.0, y a densidades de corriente de 20 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 10.2 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 16.17 ppm en el minuto 16.
- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=7.0, y a densidades de corriente de 30 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 10.6 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 25.21 ppm en el minuto 16.

6.4 Gráficos obtenidos en la experimentación a pH=8.0, a diferentes densidades de corriente y tiempos variables.

GRÁFICO N° 6.7

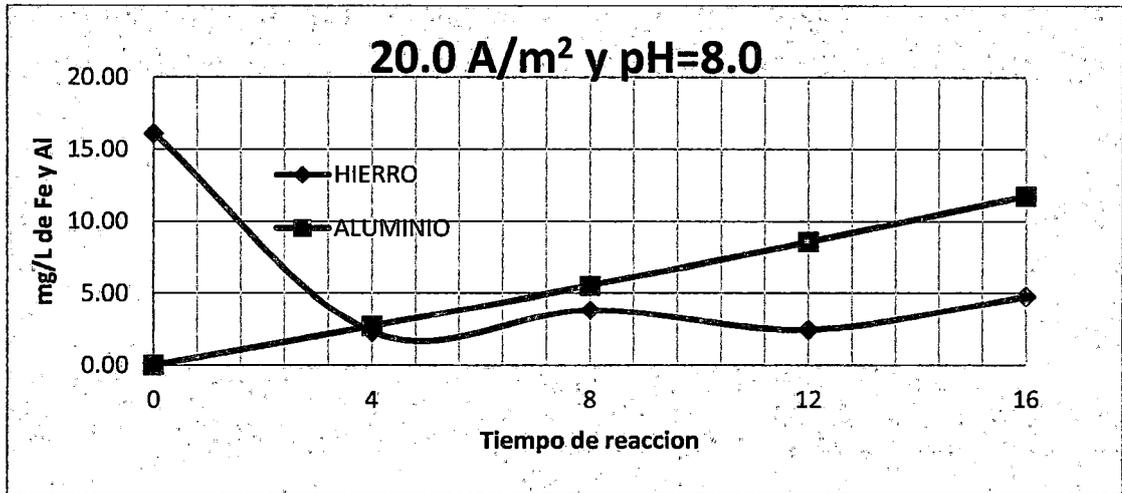
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m². Y PH=8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.8

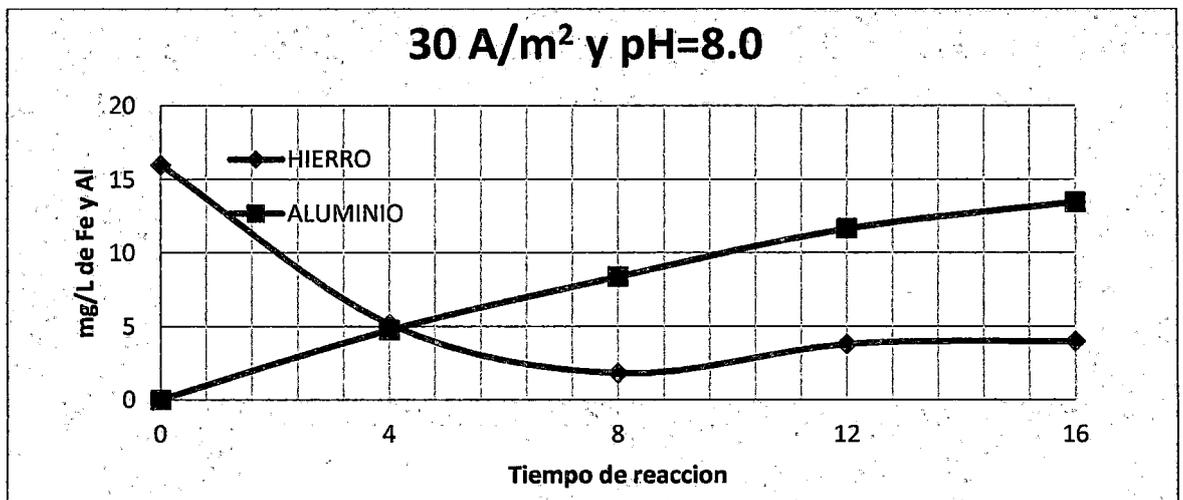
CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m² Y PH=8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.9

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m² Y PH=8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=8.0, y a densidades de corriente de 10 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 1.50 ppm de Fe, y en relación

a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 4.73 ppm en el minuto 16.

- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=8.0, y a densidades de corriente de 20 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 2.4 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 11.75 ppm en el minuto 16.
- De los resultados obtenidos, podemos afirmar que a pH=8.0, y a densidades de corriente de 30 A/m², se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 1.81 ppm de Fe, y en relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0.0 ppm de Al hasta 4.76 ppm en el minuto 4.

6.5 Cuadros y gráficos resumen obtenidos en la experimentación a diferentes pHs, diferentes densidades de corriente y tiempos variables.

CUADRO N° 6.2

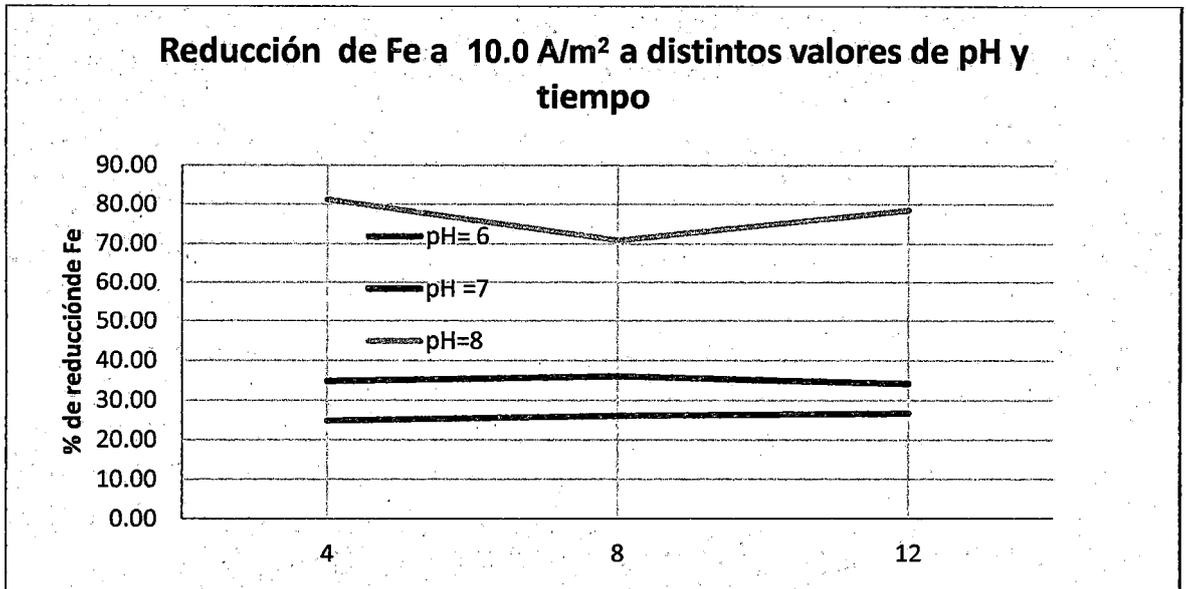
RESUMEN DE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE HIERRO EN LA EXPERIMENTACIÓN

%Red.	10.0 A/m ²			20.0 A/m ²			30.0 A/m ²		
	4min	8min	12min	4min	8min	12min	4min	8min	12min
6.0	24.84	26.09	26.71	25.47	27.33	26.71	24.22	25.47	24.84
7.0	34.78	36.02	34.16	34.16	35.40	32.30	33.54	34.78	34.16
8.0	81.24	70.81	78.51	76.34	85.09	70.31	88.76	76.46	75.22

Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.10

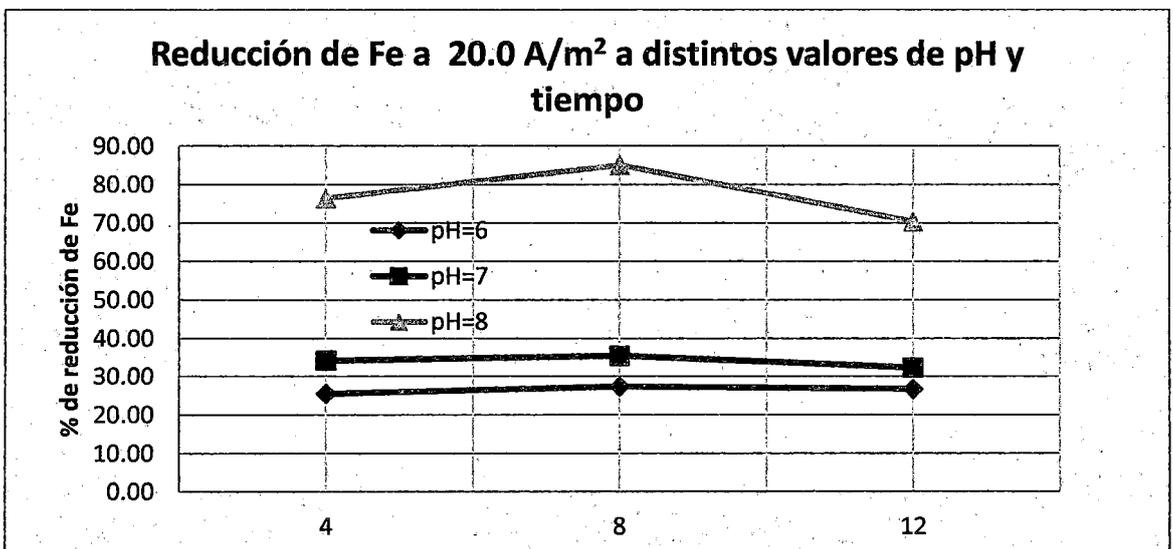
% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m² Y PHs=6.0,7.0,8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.11

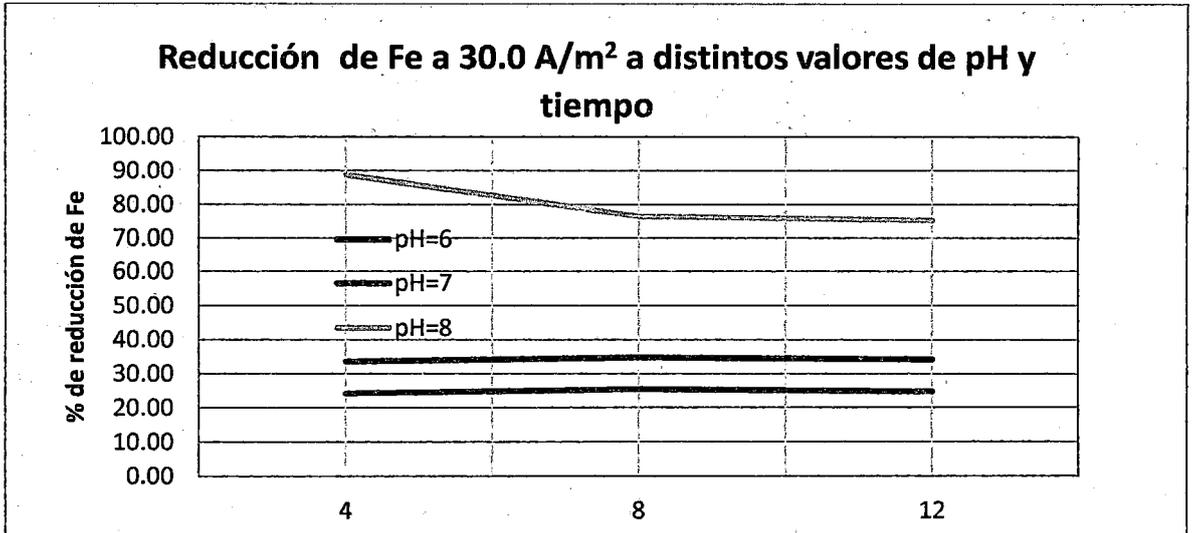
% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m² Y PHs=6.0,7.0,8.0.



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.12

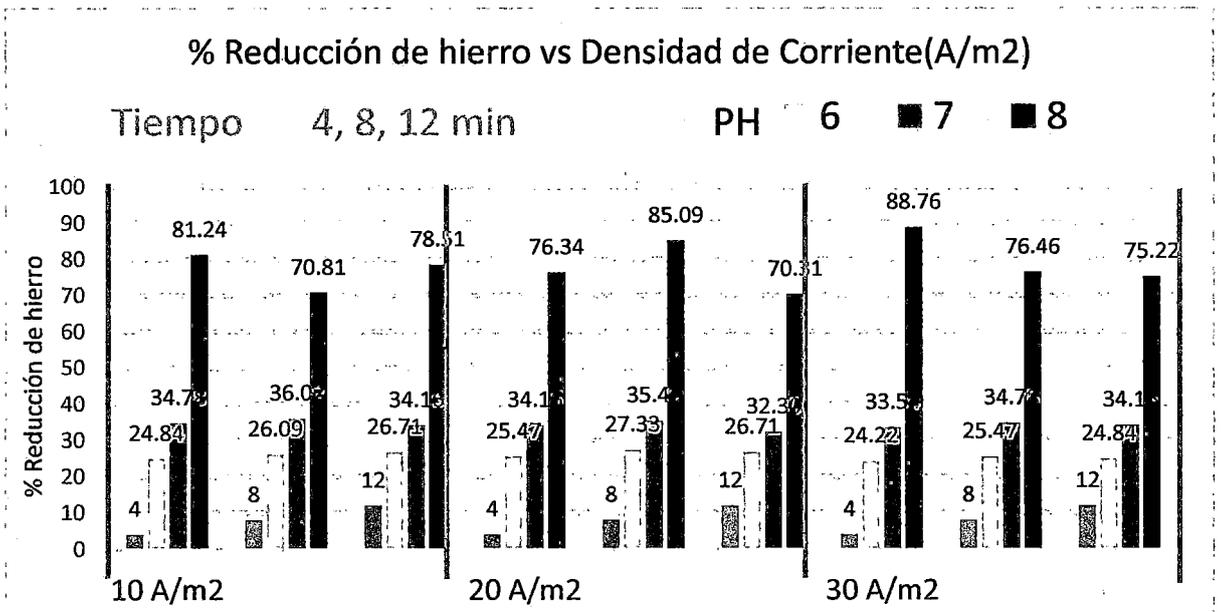
% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m² Y PHs=6,0,7,0,8.0.



Fuente: Elaboración propia-2014

GRÁFICO N° 6.13

% REDUCCIÓN DE HIERRO VS DENSIDAD DE CORRIENTE(A/m²)



Fuente: Elaboración propia-2014

Para validar la hipótesis (H_0) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente, para un tiempo de reducción de 4min, se ha realizado un análisis de varianza (Ver cuadro 6.3)

CUADRO N° 6.3
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 4min

Tiempo de reducción de Fe: 4 minutos					
Bloques pH	tratamientos Densidad de corriente			Total	Media
	10	20	30		
6	24.84	25.47	24.22	74.53	24.84
7	34.78	34.16	35.54	104.48	34.83
8	81.24	76.34	88.76	246.34	82.11
Total	140.86	135.97	148.52	425.35	
Media	46.95	45.32	49.51		47.26

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
20102.51	5695.56	5615.55	26.68	53.33
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l. resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	$F_{\alpha=0,05}$
Tratam	26.68	2	13.34	1.00	19
Bloques	5615.55	2	2807.77		
Residuo	53.33	4	13.33		
	5695.56	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un tiempo de reducción de 4 minutos, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de pH ($RV < F_{tab}$; se acepta la H_0)

Para validar la hipótesis (H_0) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente, para un tiempo de reducción de 8min. (Ver cuadro 6.4)

CUADRO N° 6.4
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 8min.

Tiempo de reducción de Fe: 8 minutos					
Bloques pH	tratamientos Densidad de corriente			Total	Media
	10	20	30		
6	26.09	27.33	25.47	78.89	26.30
7	36.02	35.40	34.78	106.20	35.40
8	70.81	85.09	76.46	232.36	77.45
Total	132.92	147.82	136.71	417.45	
Media	44.31	49.27	45.57		46.38

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
19362.72	4574.36	4468.36	39.98	66.02

g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l. resid
8	2	2	4

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	$F_{\alpha=0,05}$
Tratam	39.98	2	19.99	1.21	19
Bloques	4468.36	2	2234.18		
Residuo	66.02	4	16.51		
	4574.36	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un tiempo de reducción de 8 minutos, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de pH; ($RV < F_{tab}$; se acepta la H_0)

Para validar la hipótesis (H₀) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente, para un tiempo de reducción de 12 min. (Ver cuadro 6.5)

CUADRO N° 6.5
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE Y CADA BLOQUE DE pH, PARA UN TIEMPO DE REDUCCIÓN 12min.

Tiempo de reducción de Fe: 12 minutos					
Bloques pH	tratamientos Densidad de corriente			Total	Media
	10	20	30		
6	26.71	26.71	24.84	78.26	26.09
7	34.16	32.30	34.16	100.62	33.54
8	78.51	70.31	75.22	224.04	74.68
Total	139.38	129.32	134.22	402.92	
Media	46.46	43.11	44.74		44.77

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
18038.28	4148.06	4109.36	16.87	21.82
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	F _{α=0,05}
Tratam	16.87	2	8.44	1.55	19
Bloques	4109.36	2	2054.68		
Residuo	21.82	4	5.46		
	4148.06	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un tiempo de reducción de 12 minutos, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de pH; **(RV < F_{tab}; se acepta la H₀)**

Para validar la hipótesis (H₀) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente a diferentes tiempos de reducción y pH=6.0 constante (Ver cuadro 6.6)

CUADRO N° 6.6
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y pH=6.0 CONSTANTE

p H = 6.0					
Bloques	tratamientos			Total	Media
	Densidad de corriente				
	Tiempo	10	20		
4	24.84	25.47	24.22	74.53	24.84
8	26.09	27.33	25.44	78.86	26.29
12	26.71	26.71	24.84	78.26	26.09
Total	77.64	79.51	74.50	231.65	
Media	25.88	26.50	24.83		25.74

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
5962.41	8.63	3.67	4.27	0.68
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l. resid	
8	2	2	4	

ANOVA					
Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	F _{α=0,05}
Tratam	4.27	2	2.14	12.50	19
Bloques	3.67	2	1.83		
Residuo	0.68	4	0.17		
	8.63	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un pH de reducción de 6, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de tiempo; (**RV < F_{tab}; se acepta la H₀**).

Para validar la hipótesis (H_0) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente a diferentes tiempos de reducción y $pH=7.0$ constante (Ver cuadro 6.7)

CUADRO 6.7

DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y $pH=7.0$ CONSTANTE

p H = 7.0					
Bloques	tratamientos			Total	Media
	Densidad de corriente				
Tiempo	10	20	30		
4	34.78	34.16	33.54	102.48	34.16
8	36.02	35.40	34.78	106.20	35.40
12	34.16	32.30	34.16	100.62	33.54
Total	104.96	101.86	102.48	309.30	
Media	34.99	33.95	34.16		34.37

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
10629.61	9.23	5.38	1.79	2.05
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	$F_{\alpha=0,05}$
Tratam	1.79	2	0.90	1.75	19
Bloques	5.38	2	2.69		
Residuo	2.05	4	0.51		
	9.23	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un pH de reducción de 7, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de tiempo ($R.V < F_{tab}$; se acepta la H_0)

Para validar la hipótesis (H₀) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente a diferentes tiempos de reducción y pH=8.0 constante (Ver cuadro 6.8)

CUADRO N° 6.8
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTAS DENSIDADES DE CORRIENTE A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y pH=8.0 CONSTANTE

p H = 8.0					
Bloques	tratamientos			Total	Media
	Densidad de corriente				
Tiempo	10	20	30		
4	81.24	76.34	88.76	246.34	82.11
8	70.81	85.09	76.46	232.36	77.45
12	78.51	70.31	75.22	224.04	74.68
Total	230.56	231.74	240.44	702.74	
Media	76.85	77.25	80.15		78.08

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
54871.50	300.43	84.66	19.41	196.36
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l. resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	F _{α=0,05}
Tratam	19.41	2	9.71	0.20	19
Bloques	84.66	2	42.33		
Residuo	196.36	4	49.09		
	300.43	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para un pH de reducción de 8, no existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintas densidades de corriente para cada bloque de tiempo (**RV < F_{tab}; se acepta la H₀**)

Para validar la hipótesis (Ho) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintos valores de pH a diferentes tiempos de reducción y densidad de corriente de 10.0 A/m² constante. (Ver cuadro 6.9)

CUADRO N° 6.9

DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 10 A/m² CONSTANTE.

Densidad de corriente 10 (A/m ²)					
Bloques Tiempo	tratamientos pH			Total	Media
	6	7	8		
4	24.84	34.78	81.24	140.86	46.95
8	26.09	36.02	70.81	132.92	44.31
12	26.71	34.16	78.51	139.38	46.46
Total	77.64	104.96	230.56	413.16	
Media	25.88	34.99	76.85		45.91

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
18966.80	4496.15	11.89	4434.03	50.23
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	F _{α=0,05}
Tratam	4434.03	2	2217.01	176.54	19
Bloques	11.89	2	5.94		
Residuo	50.23	4	12.56		
	4496.15	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para una densidad de corriente de reducción de 10.0 A/m², no todos los porcentajes de reducción de Hierro son iguales para distintos valores de pH para cada bloque de tiempo (RV > Ftab; se acepta la H1)

Para validar la hipótesis (H_0) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintos valores de pH a diferentes tiempos de reducción y densidad de corriente de 20 A/m^2 constante. (Ver cuadro 6.10)

CUADRO N° 6.10
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 20 A/m^2 CONSTANTE.

Densidad de corriente $20 \text{ (A/m}^2)$					
Bloques Tiempo	tratamientos pH			Total	Media
	6	7	8		
4	25.47	34.16	76.34	135.97	45.32
8	27.33	35.40	85.09	147.82	49.27
12	26.71	32.30	70.31	129.32	43.11
Total	79.51	101.86	231.74	413.11	
Media	26.50	33.95	77.25		45.90

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
18962.21	4621.82	58.54	4504.70	58.58
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	$F_{\alpha=0,05}$
Tratam	4504.70	2	2252.35	153.81	19
Bloques	58.54	2	29.27		
Residuo	58.58	4	14.64		
	4621.82	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para una densidad de corriente de reducción de 20 A/m^2 , no todos los porcentajes de reducción de Hierro son iguales para distintos valores de pH para cada bloque de tiempo ($R.V. > F_{tab}$; se acepta la H_1)

Para validar la hipótesis (H_0) que: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Hierro para distintos valores de pH a diferentes tiempos de reducción y densidad de corriente de 30 A/m^2 constante. (Ver cuadro 6.11)

CUADRO N° 6.11
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE FIERRO PARA DISTINTOS VALORES DE PH A DIFERENTES TIEMPOS DE REDUCCIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 30 A/m^2 CONSTANTE.

Densidad de corriente $30 \text{ (A/m}^2)$					
Bloques Tiempo	tratamientos pH			Total	Media
	6	7	8		
4	24.22	33.54	88.76	146.52	48.84
8	25.47	34.78	76.46	136.71	45.57
12	24.84	34.16	75.22	134.22	44.74
Total	74.53	102.48	240.44	417.45	
Media	24.84	34.16	80.15		46.38

C	SC total	SC bloque	SC trat	SC residual
19362.72	5373.64	28.19	5260.03	85.41
g.l. tot	g.l. bloq	g.l. trat	g.l resid	
8	2	2	4	

ANOVA

Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	$F_{\alpha=0,05}$
Tratam	5260.03	2	2630.02	123.17	19
Bloques	28.19	2	14.10		
Residuo	85.41	4	21.35		
	5373.64	8			

Del análisis de varianza para bloques completos aleatorizados muestra que para una densidad de corriente de reducción de 30.0 A/m^2 , no todos los porcentajes de reducción de Hierro son iguales para distintos valores de pH para cada bloque de tiempo ($R.V > F_{tab}$; se acepta la H_1)

VII. DISCUSIÓN.

Para contrastar la información existente se ha tomado los referentes como:

El presente trabajo presenta una reducción de hierro superior al 80%, pero en contraparte a Morales (2010), en esta investigación se ha podido apreciar la migración del aluminio proveniente del electrodo hasta valores superiores a 4ppm, esto hace ver al perder el control en el suministro de densidad de carga (30 A/m^2), $\text{pH} = 8$ y tiempo de 4 min. lo que se estaría incrementando es la concentración de aluminio.

En relación a la migración de metales sobre la solución en sí, hay limitada información, pero en el trabajo de Hernandez *et al.* (2005), se utilizaron ánodos de $\text{Ti/RuO}_2 - \text{TiO}_2$ para eliminar demanda química de oxígeno,

Morales (2010), obtuvo una reducción en Cr del 51.65%, valor por debajo de los estándares establecidos en materia de vertimientos y para el: Ni del 18.09%, Pb del 50%, Zn del 47.37%, los cuales a pesar de la reducción producida tienen valores superiores a lo estipulado. Entonces si bien es cierto morales obtuvo reducciones en promedio superiores al 38% para el caso de metales,

El trabajo permite afirmar que la mayoría de investigadores buscan tecnologías limpias para evitar en todo instante la migración de metales proveniente de los electrodos. Hernandez *et al.* (2005) utilizaron ánodos de $\text{Ti/RuO}_2 - \text{TiO}_2$ y con ánodos de platino. La eliminación de sólidos solubles totales, N_2 total, fósforo (P) total, $\text{NH}_4\text{-N}$ y DQO de las aguas residuales domésticas y agua de laguna conteniendo algas fue del 90%, mientras que la eliminación de clorofila de las algas fue del 100%.

La reducción de hierro se basa principalmente por la capacidad de hidratación de los metales, lógicamente a condiciones favorables de pH , esto es confirmado por Martínez (2008), que en texto menciona, en disolución acuosa todos los metales se encuentran hidratados hasta cierto punto y, por tanto, es razonable pensar en la existencia de una capa de hidratación primaria alrededor del ión metálico, donde las moléculas de agua están en contacto con el ión metálico central, y una segunda

capa de hidratación alrededor de la primera. Debido a la carga del ión metálico, las moléculas de agua de la primera capa de hidratación pueden estar polarizadas, y esto puede originar la pérdida de uno o más protones de algunas de las moléculas de agua presentes en la capa de hidratación primaria (en función del pH de la disolución), lo que se traduce en que las moléculas de agua en la capa de hidratación son progresivamente reemplazadas por iones hidroxilo,

En la investigación se puede afirmar que el factor influyente para la reducción de hierro es el pH. Lo que confirma, Holt et al, (2005) el intervalo de pH en la cual se obtiene una mejor solubilidad del hidróxido de aluminio, Los complejos de aluminio en su forma catiónica son adsorbidos en las partículas neutralizándolas Bensadok *et al*, (2008). El mejor rango de pH para encontrar estos complejos es entre 5 a 7.5, de esta manera se minimiza la forma no iónica del aluminio $\text{Al(OH)}_{3(s)}$, estas interactúan con el hierro y forman complejos de radio mayor lo que hace posible su separación.

(Montes 1996) La electrocoagulación es un método alternativo a los sistemas convencionales de tratamiento de efluentes y se basa en el principio de electrólisis, ya que combina la coagulación química con los principios eléctricos, produciendo iones metálicos de alta valencia como coagulante en celdas electrolíticas, aunque el autor capitaliza la electrocuagulación como método alternativo, la investigación a podido validar que es importante la selección de electrodos inertes, para evitar la migración de metales a partir del electrodo.

Entonces de acuerdo a los resultados de la experimentación podemos concluir que:

- Que a $\text{pH}=8$, y a densidades de corriente de 30 A/m^2 , en un tiempo de 4 min. Se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 1.81 ppm de Fe, lo que indica una reducción 88% para el hierro total. En relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0 ppm de "Al" hasta 4.76 ppm a los 4 minutos

VIII REFERENCIALES.

1. APHA. AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed., Washington, DC, American Public Health Association, 1325 p. 2005.
2. ARISTIZÁBAL, C.A; BERMÚDEZ A.M.C. *Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso: universidad pontificia bolivariana facultad de ingeniería química Medellín-2007*
<http://caballeroredverde.blogspot.com/2007/05/la-contaminacin-del-agua-en-hualgayoc.html>.
3. BARROS, N.; SCARMINIO, B.; SPACINO, I.; BRUNS, R.E. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 3ª ed., Campinas, Editora da UNICAMP, 480 p. 2007
<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/publicengquim/estudostecnol2010.pdf>
4. BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M.; KOBYA, M.. *Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation. Chemical Engineering Journal*, **128**(2-3):155–161. 2007
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.008>
5. CAN, O.T.; KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; BAYRAMOGLU, M. *Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. Chemosphere*, **62**(2):181-187. 2006
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.022>
6. DROGUI, P.; ASSELIN, M.; BRAR, S.K.; BENMOUSSA, H.; BLAIS, J.F. *Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. Separation and Purification Technology*, **61**(3):301-310. 2008

<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2007.10.013>

7. ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; FORNARI, M.M.T.; MÓDENES, A.N.; PALÁCIO, S.M.; SILVA, F.G.; SZYMANSKI, N.; KROUMOV, A.D.; TRIGUEIROS, D.E.G. *Pollutant removal from tannery effluent by Electrocoagulation. Chemical Engineering Journal*, **151**(1-3):59-65. 2009.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.043>
8. MOLLAH, M.Y.A.; MORKOVSKY P.; GOMES, J.A.G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D.L. *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials*, **114**(1-3):199-210. 2004.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
9. MANUEL AMATRIAIN ELCINTO. *Ortomolecular Nutritionist. Miembro de la Sociedad Internacional de Medicina Ortomolecular ISOM. Toronto. Canadá-2004.*
http://www.ehowenespanol.com/reducir-exceso-hierro-como_22004/
10. P+L, RESTREPO MEJÍA, La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Disponible en:
http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol1n2/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf. Artículo web consultada el 01 de agosto del 2014
11. SISTEMA UNIVERSITARIO TEXAS A&M, MARK L. MCFARLAND Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso. Disponible en:
<http://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/15451sironandman.pdf>
Artículo web consultada el 02 de agosto del 2014

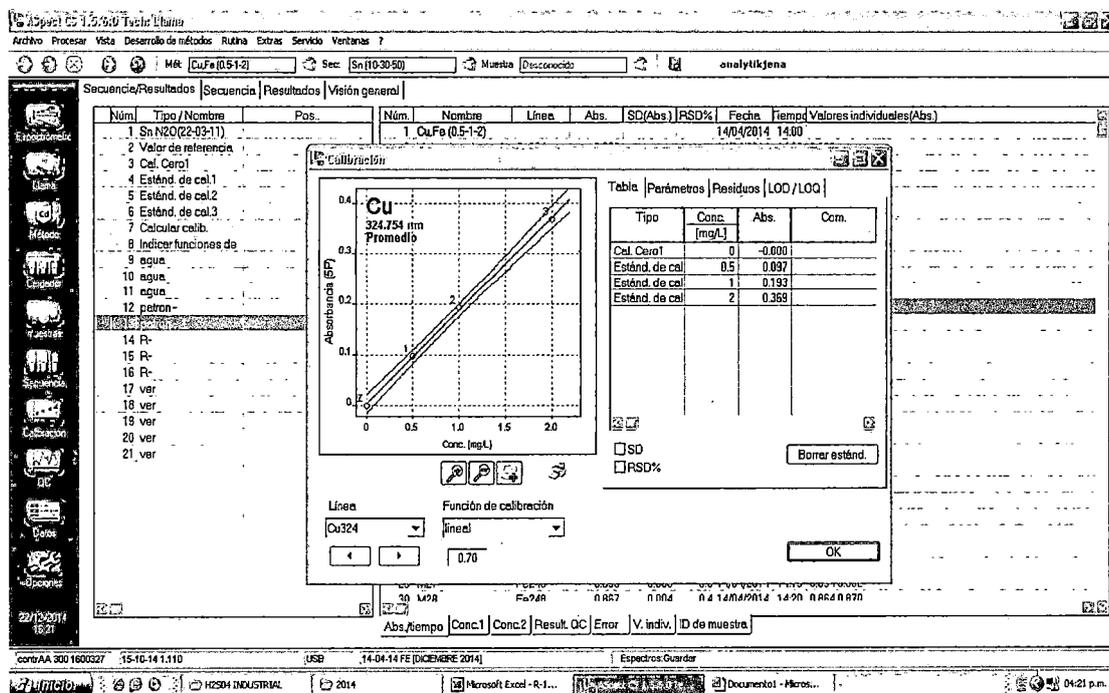
IX. ANEXOS

9.1 Cuadro de recolección de datos experimentales.

NUMERO DE MUESTRA	TIME(min9	pH	INTENSIDAD DE CORRIENTE	Fe(ppm)	AL(ppm)	remocion	AREA SUMERGIDA	CORRIENTE	electrodos
ANTES DEL BUFFER									
0	0	6	10.00	16.10	-	0.2484	0.006664	0.06664	ALUMNIO
1	4	6	10.00	12.10	1.70	0.2484	0.006664	0.06664	ALUMNIO
2	8	6	10.00	11.90	2.40	0.2609	0.006664	0.06664	ALUMNIO
3	12	6	10.00	11.80	4.66	0.2671	0.006664	0.06664	ALUMNIO
4	16	6	10.00	11.50	6.22	0.2857	0.006664	0.06664	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
5	0	6	20.00	16.00	-	0.0062			
6	4	6	20.00	12.20	2.99	0.2547	0.006664	0.13328	ALUMNIO
7	8	6	20.00	11.70	5.97	0.2733	0.006664	0.13328	ALUMNIO
8	12	6	20.00	11.80	8.66	0.2671	0.006664	0.13328	ALUMNIO
9	16	6	20.00	11.50	11.22	0.2857	0.006664	0.13328	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
10	0	6	30.00	16.10	-	-			
11	4	6	30.00	12.20	3.78	0.2422	0.006664	0.19992	ALUMNIO
12	8	6	30.00	12.00	10.37	0.2547	0.006664	0.19992	ALUMNIO
13	12	6	30.00	12.10	16.17	0.2484	0.006664	0.19992	ALUMNIO
14	16	6	30.00	11.20	20.35	0.3043	0.006664	0.19992	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
15	0	7	10.00	16.10	-	-			
16	4	7	10.00	13.00	0.11	0.1925	0.006664	0.06664	ALUMNIO
17	8	7	10.00	10.50	5.42	0.3478	0.006664	0.06664	ALUMNIO
18	12	7	10.00	10.30	6.44	0.3602	0.006664	0.06664	ALUMNIO
19	16	7	10.00	10.60	0.3416	0.006664	0.06664	ALUMNIO
19	16	7	10.00	10.70	0.07	0.3354	0.006664	0.06664	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
20	0	7	20.00	16.10	-	-			
21	4	7	20.00	10.40	3.15	0.3540	0.006664	0.13328	ALUMNIO
22	8	7	20.00	10.60	4.73	0.3416	0.006664	0.13328	ALUMNIO
23	8	7	20.00	10.40	7.82	0.3540	0.006664	0.13328	ALUMNIO
24	12	7	20.00	10.90	14.09	0.3230	0.006664	0.13328	ALUMNIO
24	16	7	20.00	10.20	16.17	0.3665	0.006664	0.13328	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
25	0	7	30.00	16.00	-	-			
26	4	7	30.00	10.60	0.09	0.3416	0.006664	0.19992	ALUMNIO
27	4	7	30.00	10.70	6.49	0.3354	0.006664	0.19992	ALUMNIO
27	8	7	30.00	10.50	12.63	0.3478	0.006664	0.19992	ALUMNIO
28	12	7	30.00	10.60	20.13	0.3416	0.006664	0.19992	ALUMNIO
29	16	7	30.00	10.60	25.21	0.3416	0.006664	0.19992	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
30		8	10.00	16.00	-	-			
31		8	10.00	3.31	-	0.7944	0.006664	0.06664	ALUMNIO
32		8	10.00	3.02	1.91	0.8124	0.006664	0.06664	ALUMNIO
33		8	10.00	4.70	2.10	0.7081	0.006664	0.06664	ALUMNIO
34		8	10.00	3.46	3.85	0.7851	0.006664	0.06664	ALUMNIO
34		8	10.00	1.50	4.79	0.9068	0.006664	0.06664	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
35		8	20.00	16.10	-	-			
36		8	20.00	2.27	-	0.8590	0.006664	0.13328	ALUMNIO
37		8	20.00	3.81	2.67	0.7634	0.006664	0.13328	ALUMNIO
38		8	20.00	2.40	5.54	0.8509	0.006664	0.13328	ALUMNIO
39		8	20.00	4.78	8.60	0.7031	0.006664	0.13328	ALUMNIO
39		8	20.00	4.86	11.75	0.6981	0.006664	0.13328	ALUMNIO
ANTES DEL BUFFER									
40		8	30.00	16.00	-	0.0062			
41		8	30.00	5.17	-	0.6789	0.006664	0.19992	ALUMNIO
42		8	30.00	1.81	4.76	0.8876	0.006664	0.19992	ALUMNIO
43		8	30.00	3.79	8.37	0.7646	0.006664	0.19992	ALUMNIO
44		8	30.00	3.99	11.66	0.7522	0.006664	0.19992	ALUMNIO
44		8	30.00	-	13.45		0.006664	0.19992	ALUMNIO

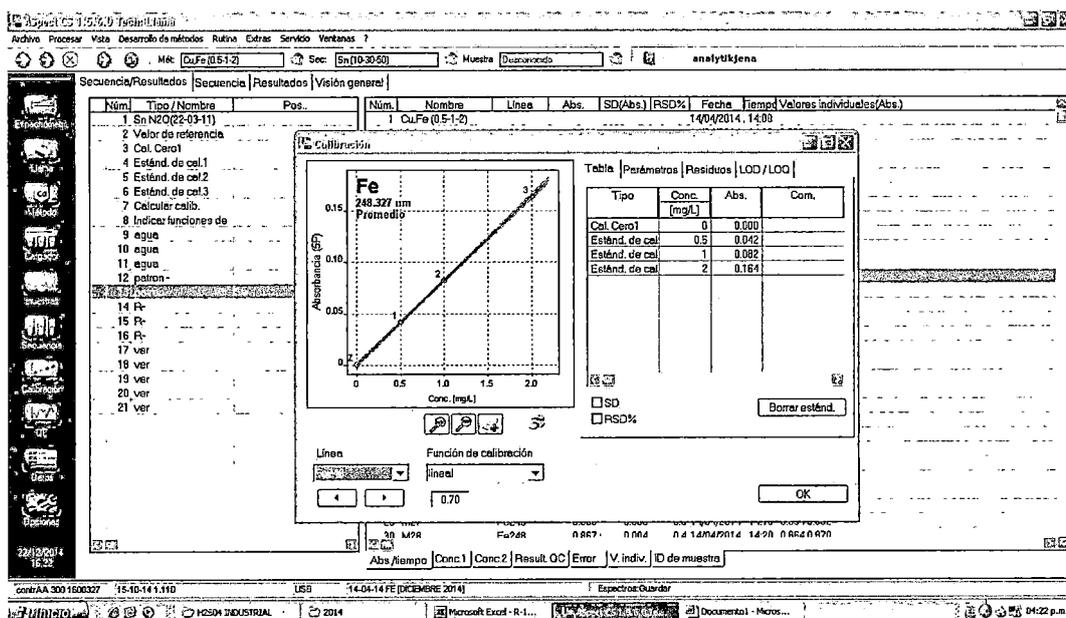
9.2 Curva de calibración de Cobre, Hierro, Aluminio.

CURVA DE CALIBRACIÓN DE CU: 0.5, 1.0, 2.0 ppm



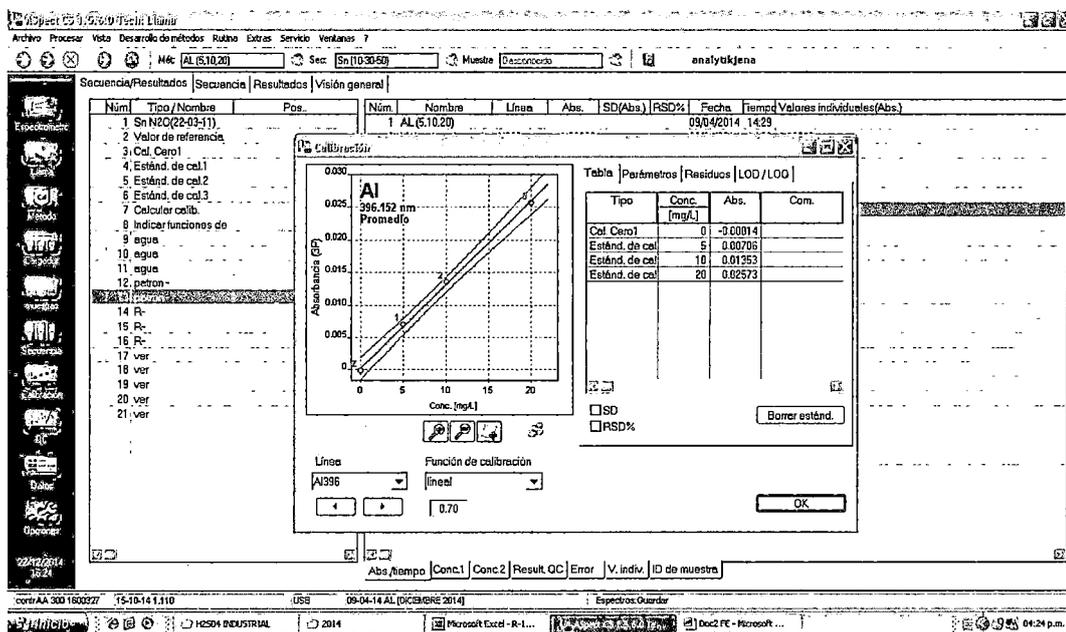
Fuente: Equipo Analytik Jena72

CURVA LINEAL DE CALIBRACIÓN DE FE: 0.5, 1.0, 2.0 ppm



Fuente: Equipo Analytik Jena

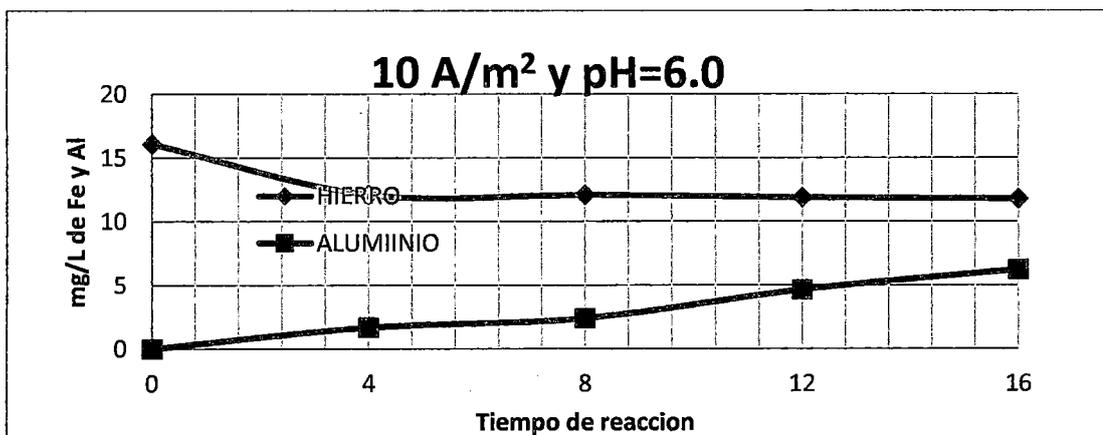
CURVA DE CALIBRACIÓN DE AL, 5, 10, 20 PPM



Fuente: Equipo Analytik Jena

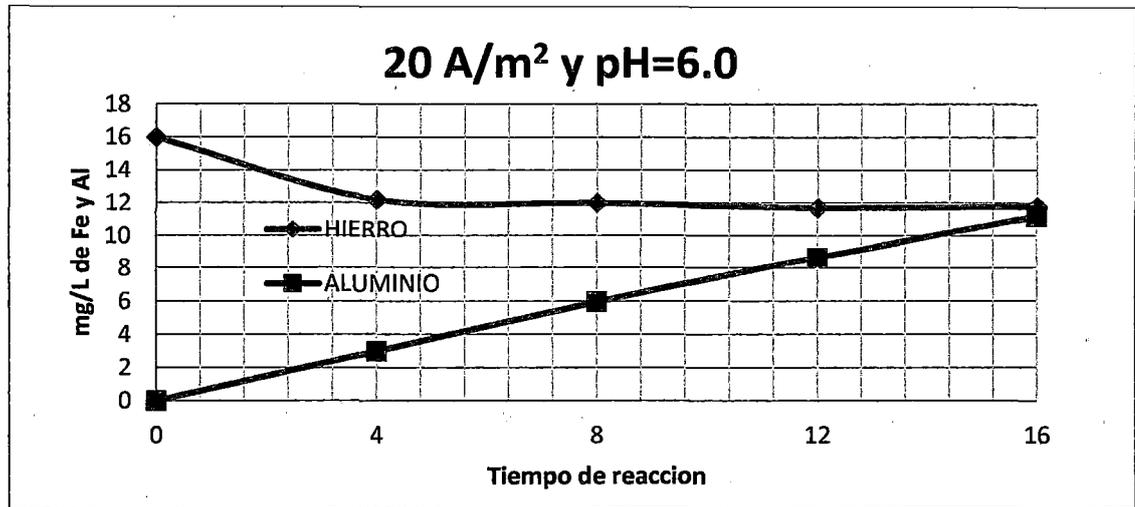
9.3 Gráficos obtenidos de la experimentación.

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m², Y PH=6.0



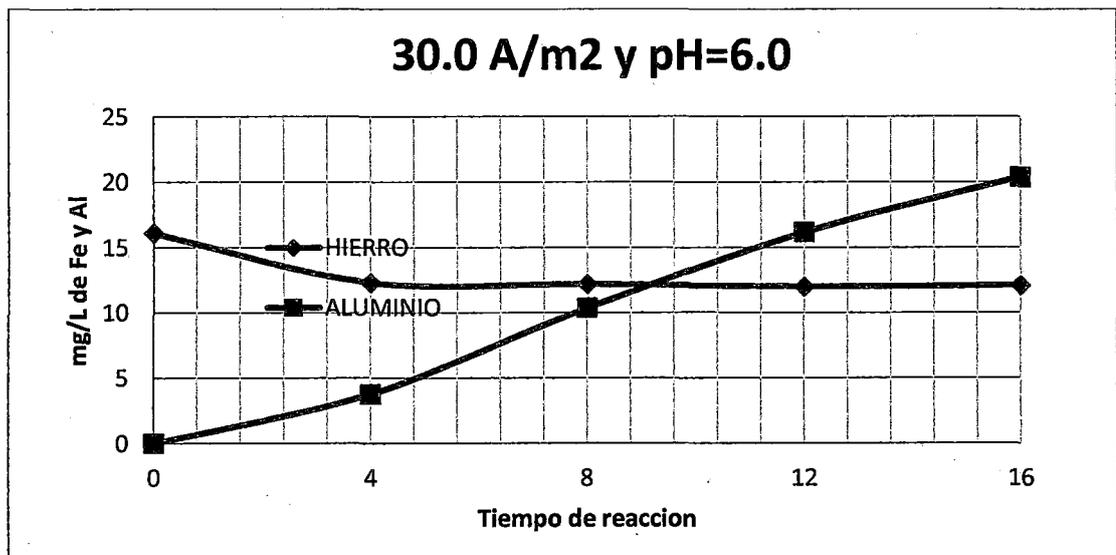
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m². Y PH=6.0



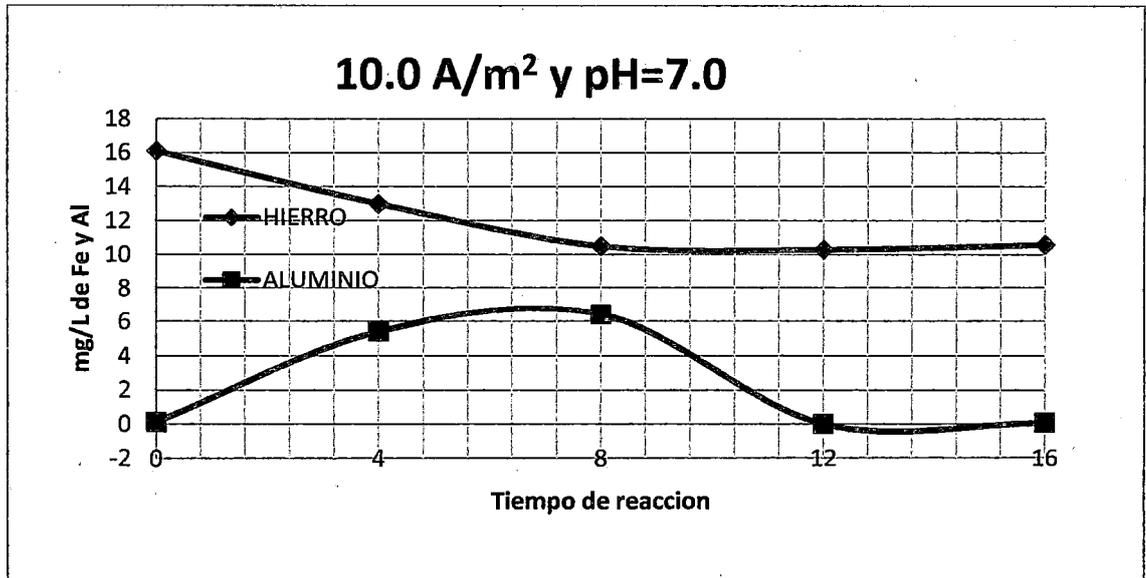
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m². Y PH=6.0



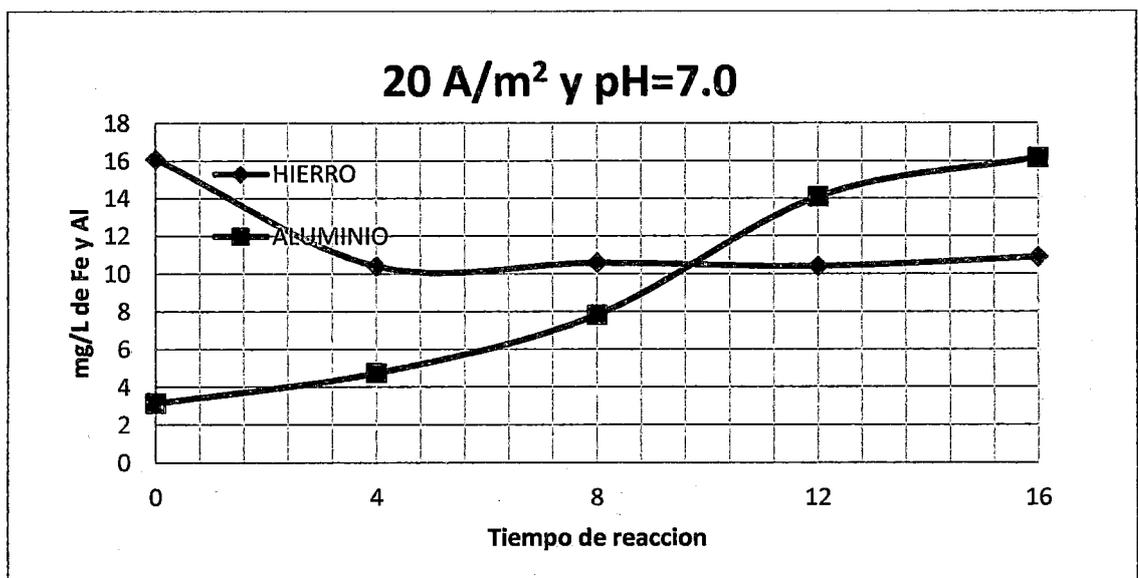
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m². Y PH=7.0



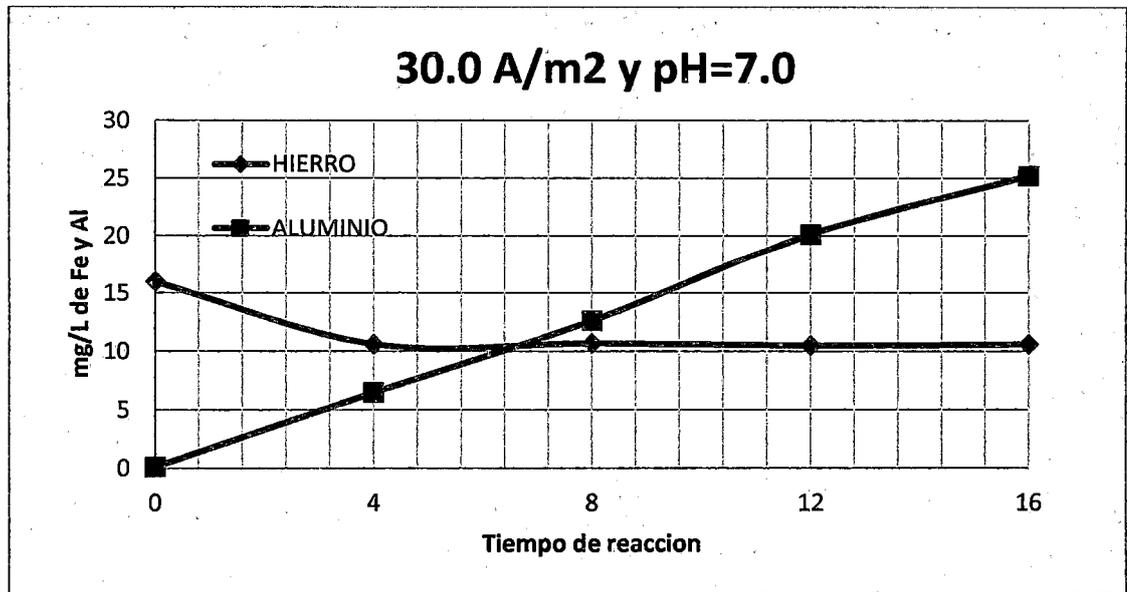
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m². Y PH=7.0



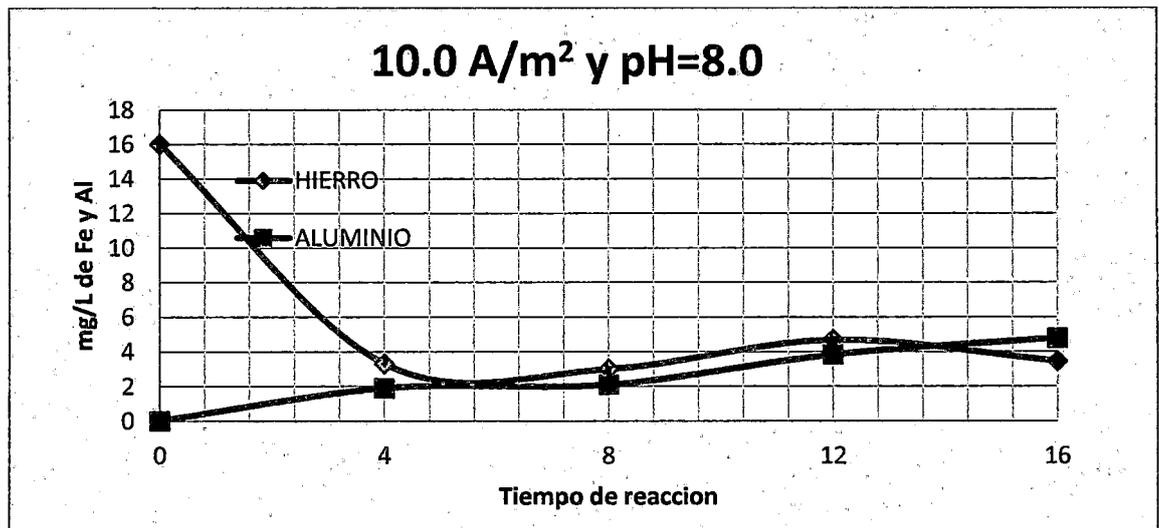
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m². Y PH=7.0



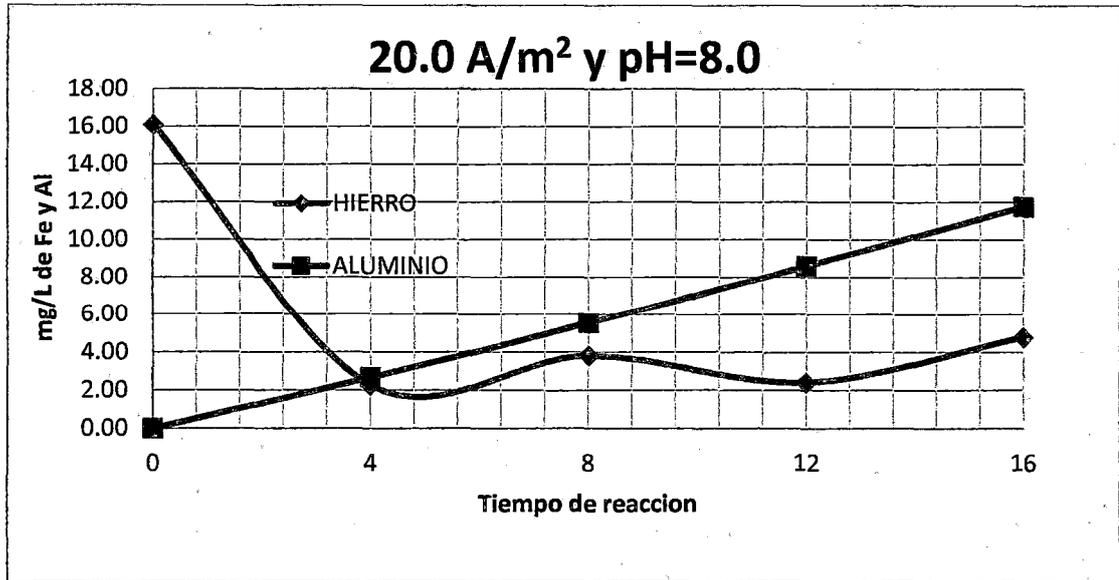
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m². Y PH=8.0



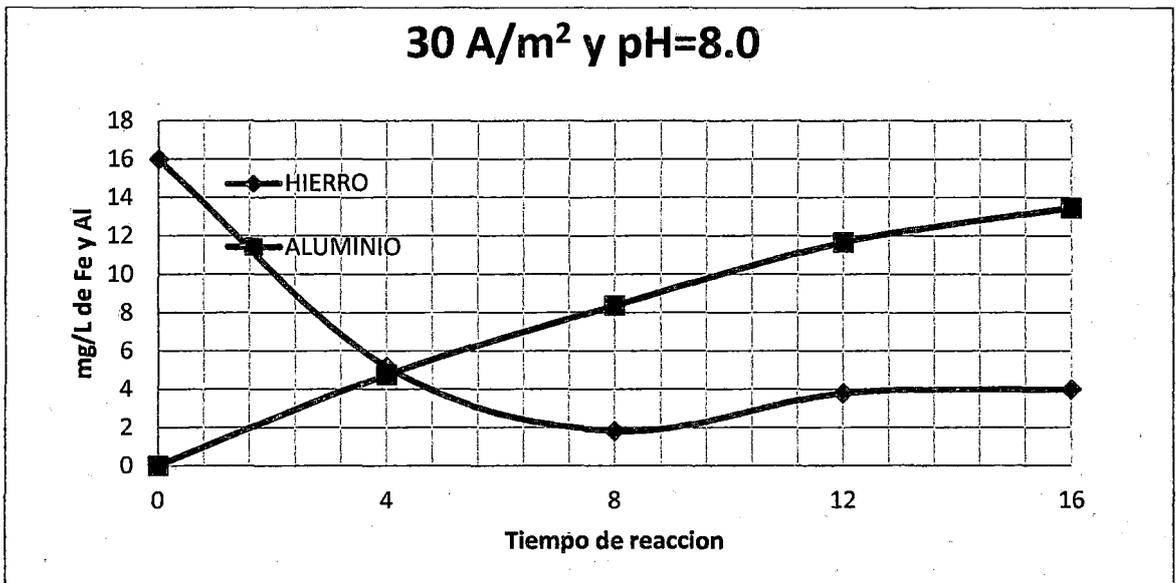
Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m² Y PH=8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

CONCENTRACIÓN DE Fe Y AL EN ppm VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m² Y PH=8.0



Fuente: Elaboración propia-2014

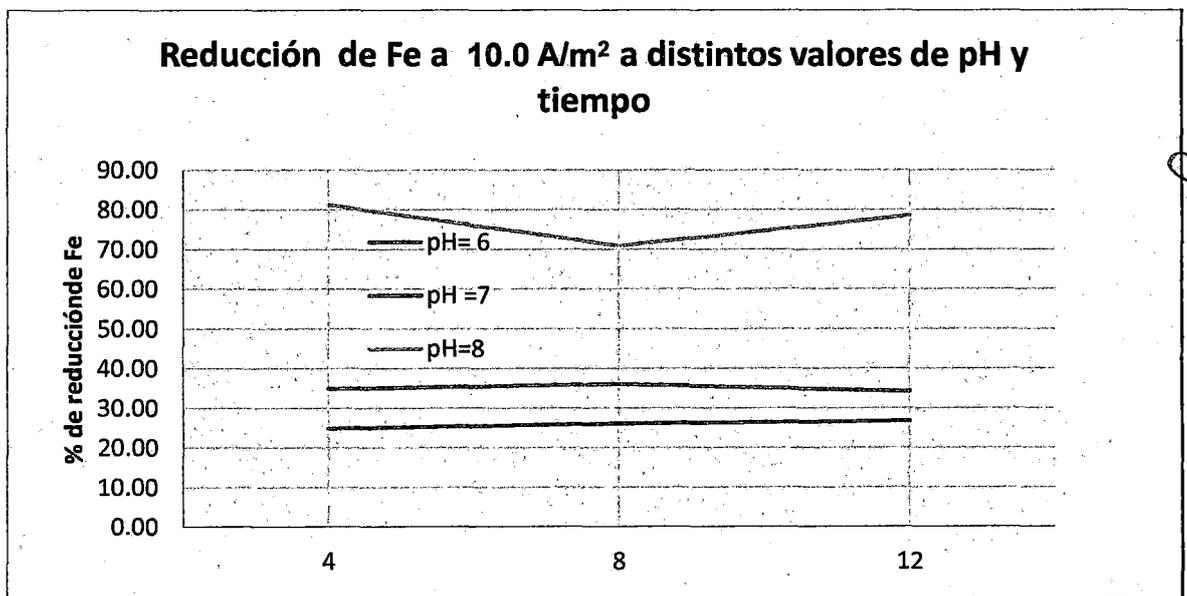
[Handwritten signature]

RESUMEN DE LOS PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE HIERRO EN LA EXPERIMENTACIÓN

%Red.	10.0 A/m ²			20.0 A/m ²			30.0 A/m ²		
	4min	8min	12min	4min	8min	12min	4min	8min	12min
6.0	24.84	26.09	26.71	25.47	27.33	26.71	24.22	25.47	24.84
7.0	34.78	36.02	34.16	34.16	35.40	32.30	33.54	34.78	34.16
8.0	81.24	70.81	78.51	76.34	85.09	70.31	88.76	76.46	75.22

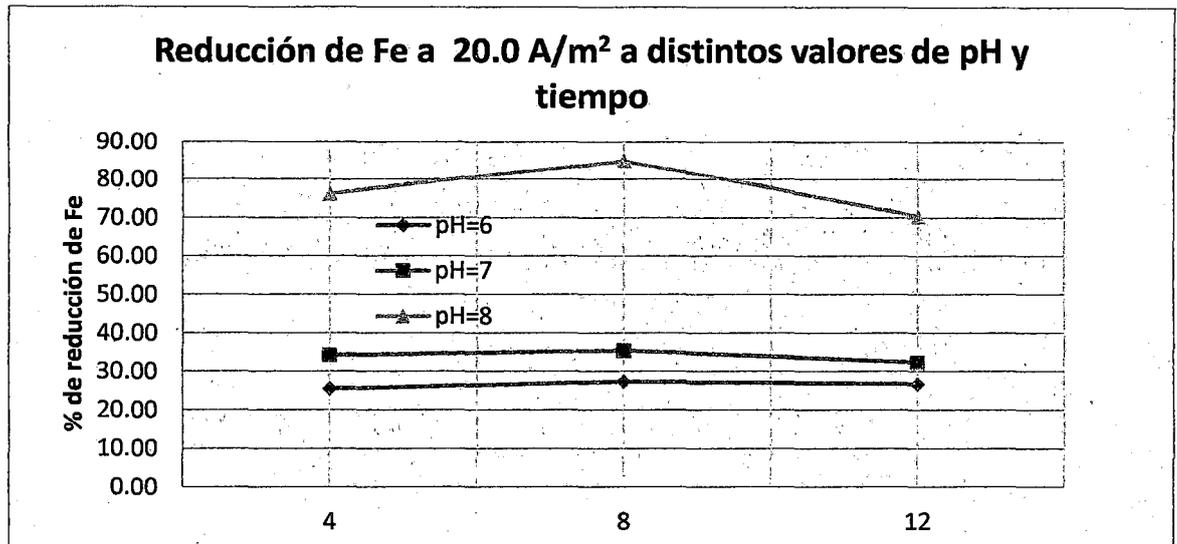
Fuente: Elaboración propia-2014

% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 10.0 A/m² Y
PHs=6.0,7.0,8.0



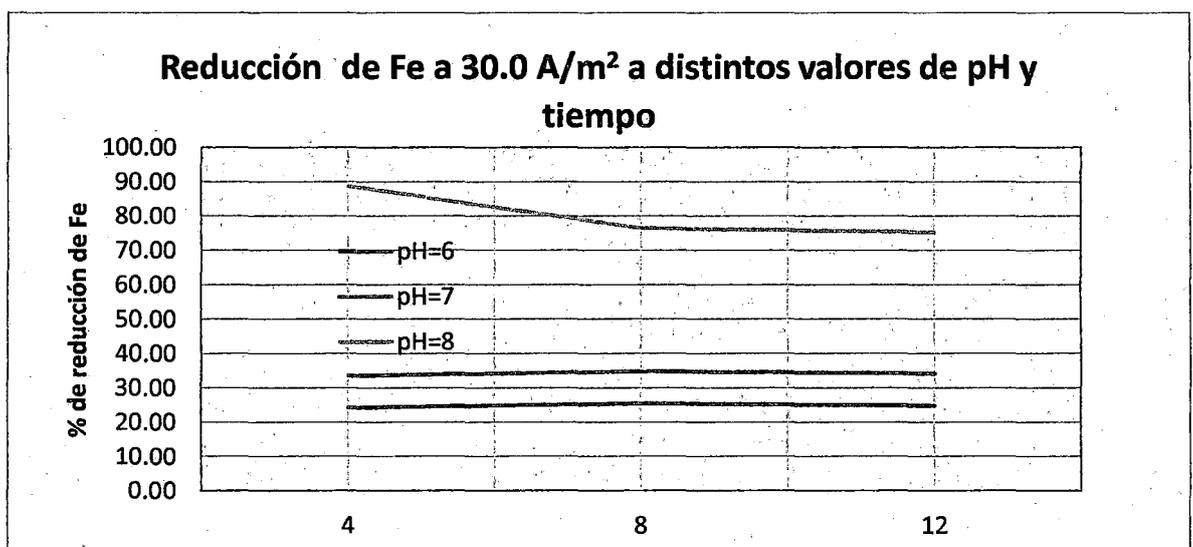
Fuente: Elaboración propia-2014

% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 20.0 A/m² Y
PHs=6.0,7.0,8.0.



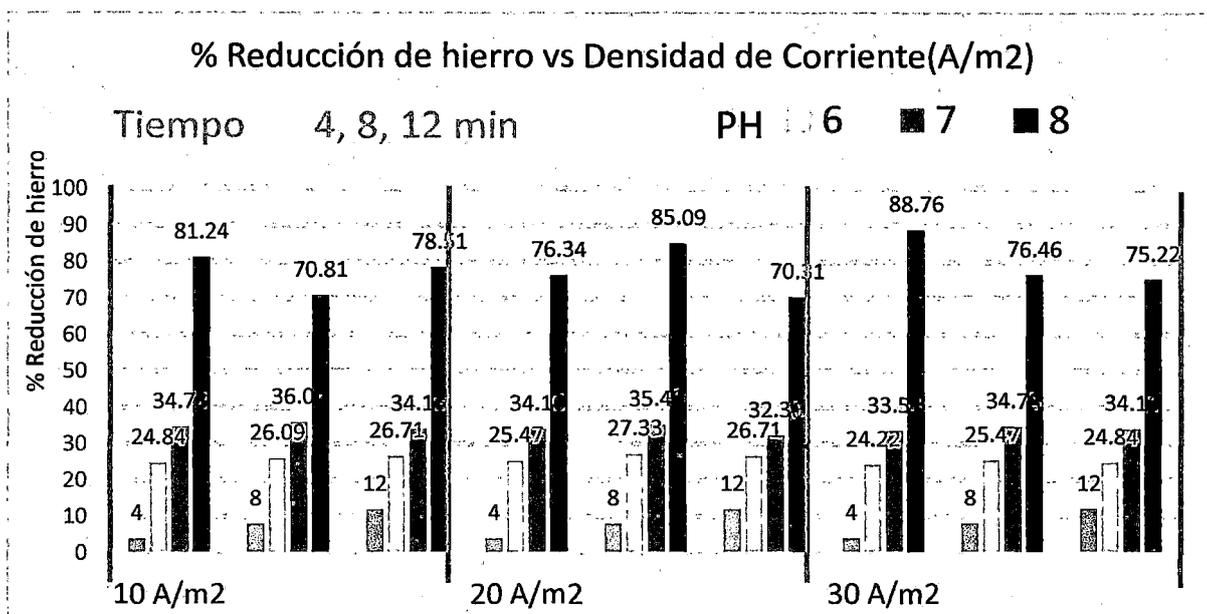
Fuente: Elaboración propia-2014

% DE REDUCCION DE HIERRO VS TIEMPO (min), A 30.0 A/m² Y
PHs=6.0,7.0,8.0.



Fuente: Elaboración propia-2014

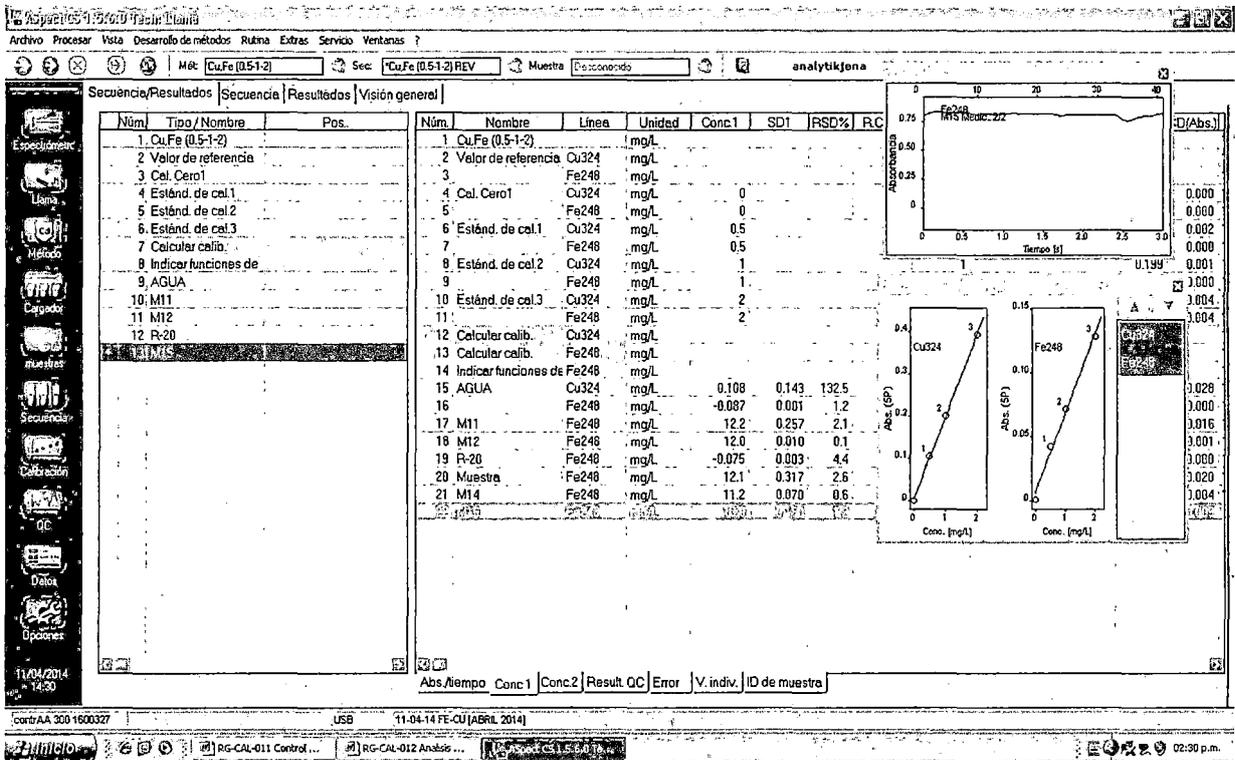
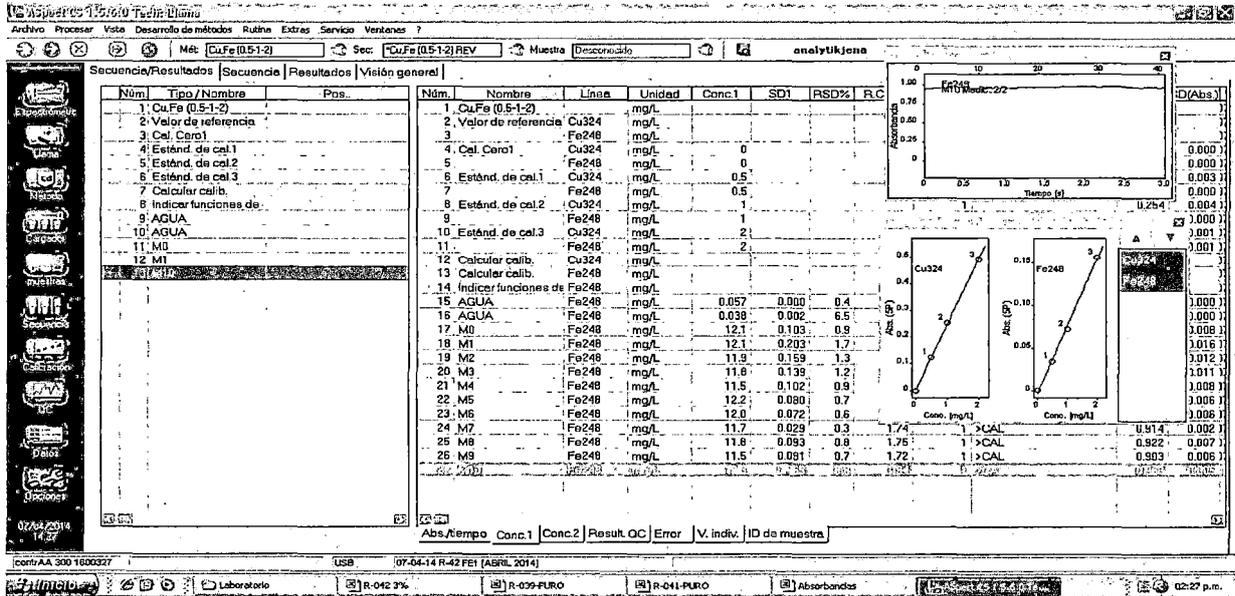
% REDUCCIÓN DE HIERRO VS DENSIDAD DE CORRIENTE(A/m²)

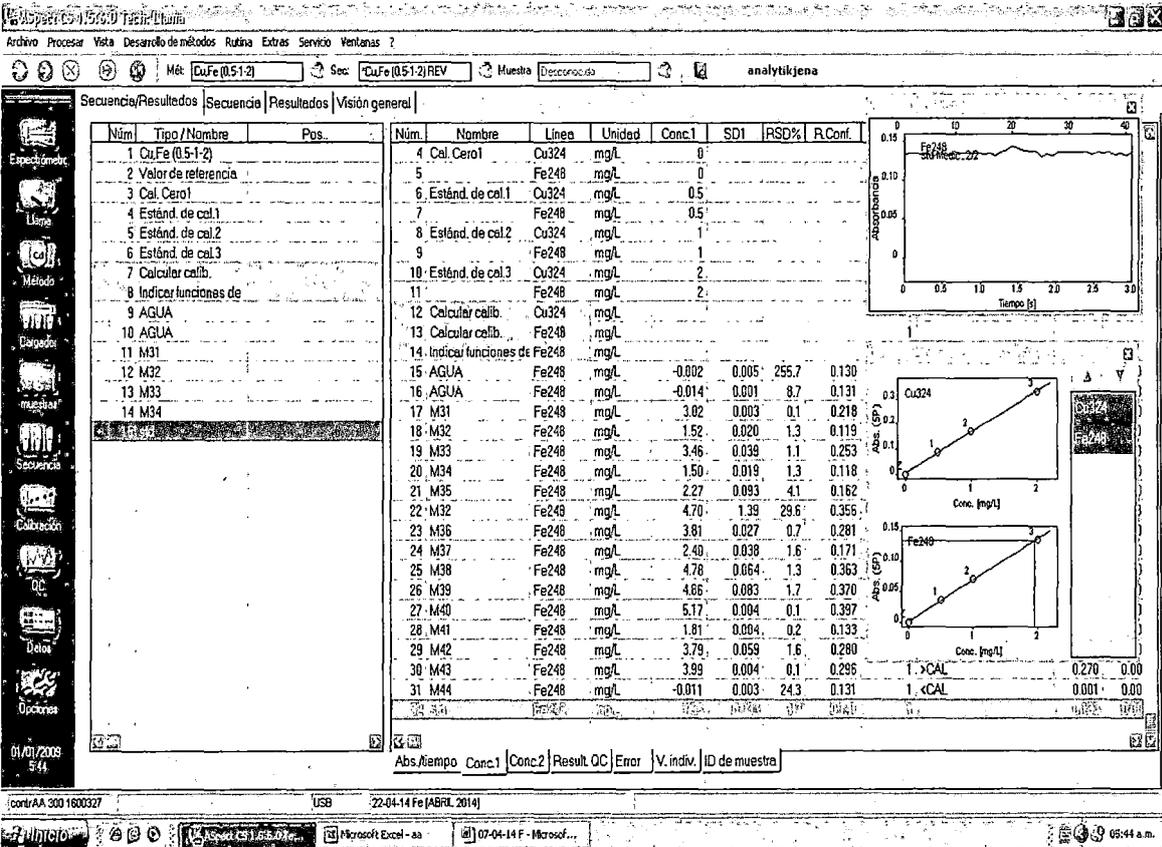
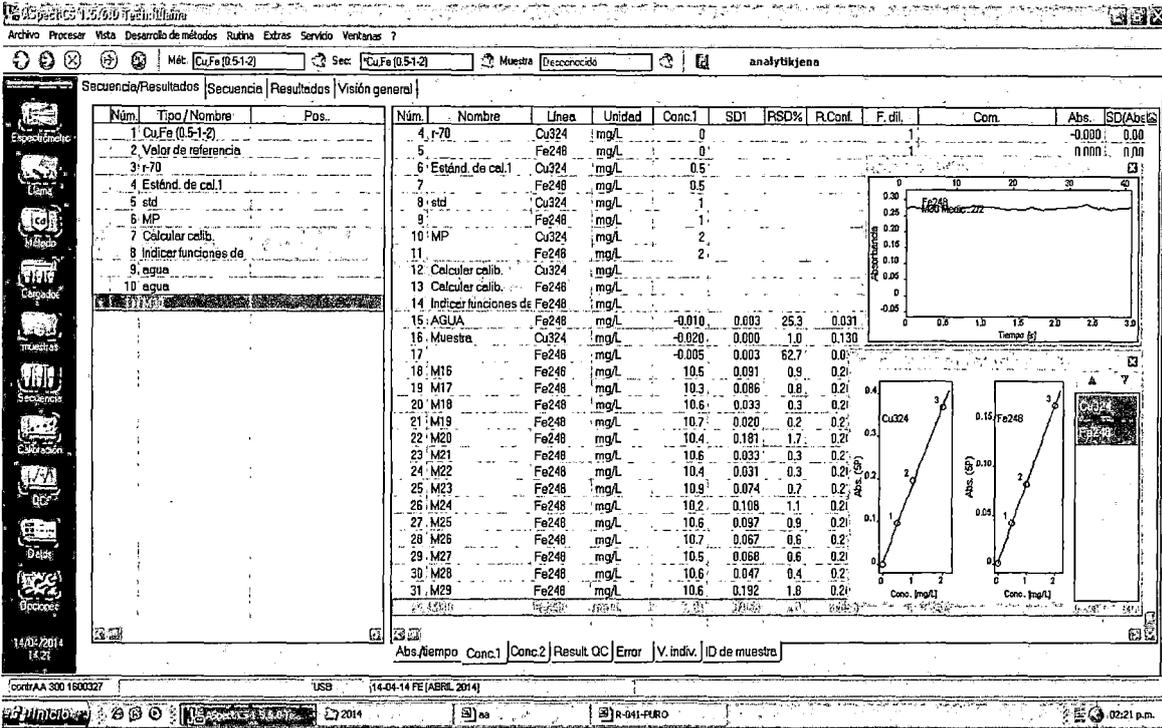


Fuente: Elaboración propia-2014

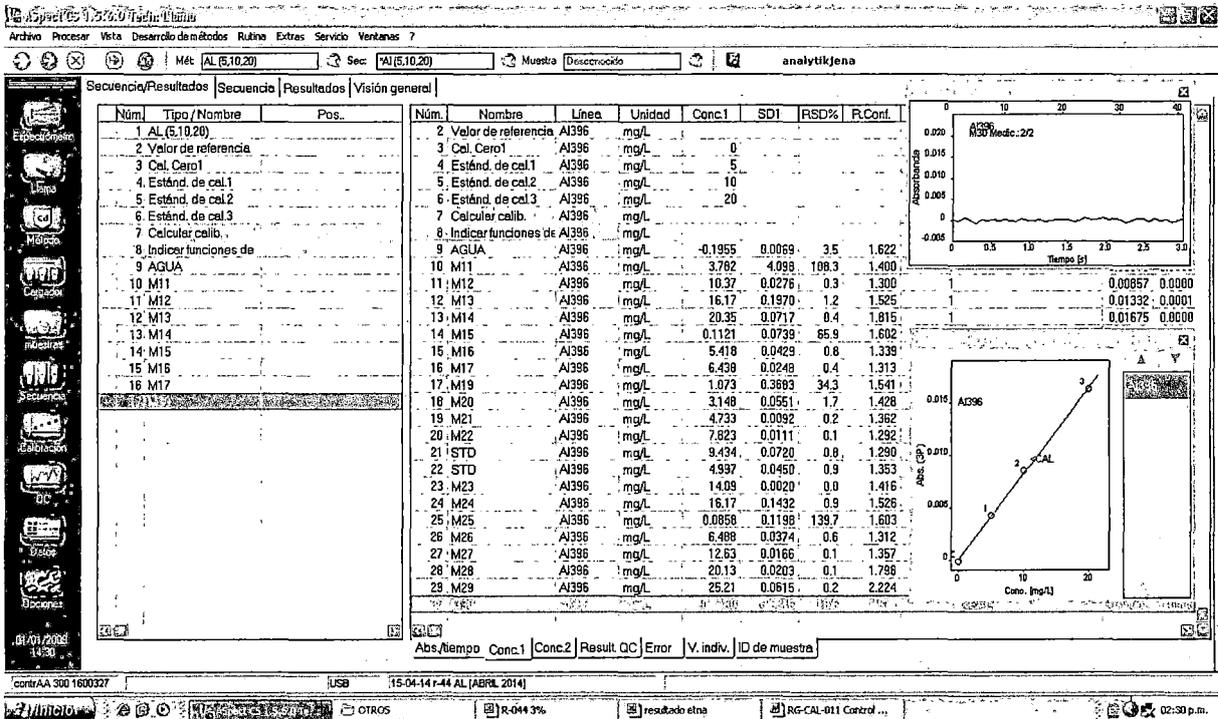
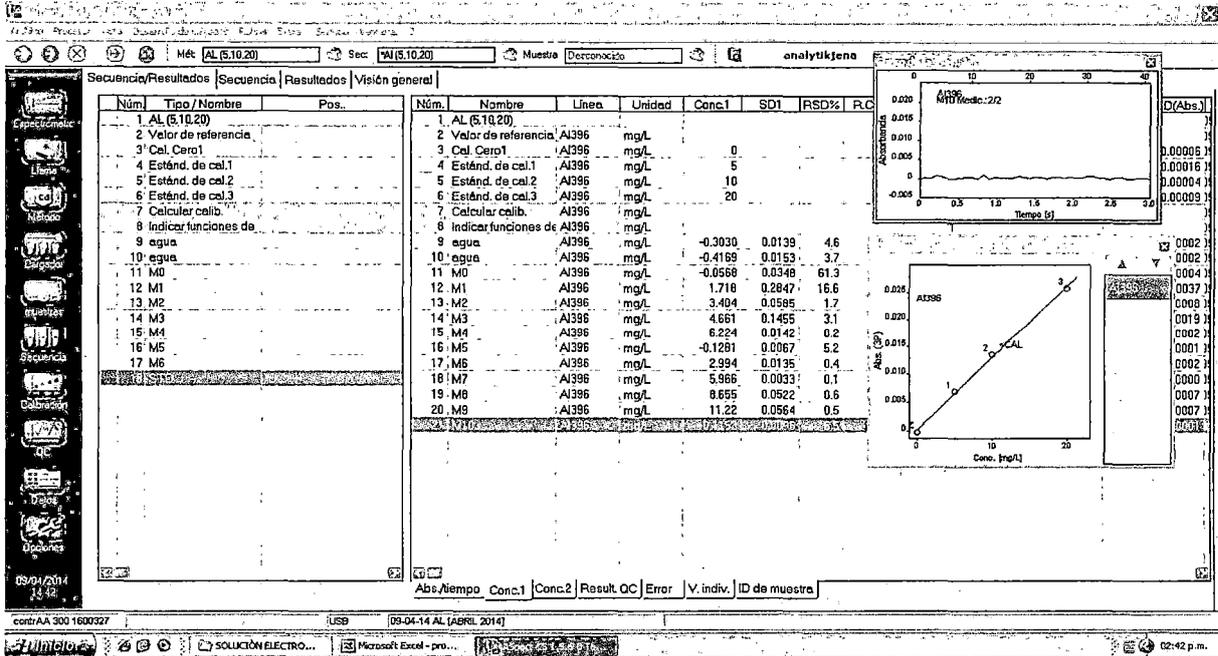
X. ANEXOS

10.1 Cuantificación por absorción atómica de la concentración total de Hierro.





10.2 Cuantificación por absorción atómica de la concentración total de aluminio



Met: AL(5,10,20) Sec: AL(5,10,20) Muestra: Desconocido analytikjena

Secuencia/Resultados | Secuencia | Resultados | Visión general

Núm.	Tipo/Nombre	Pos.	Núm.	Nombre	Línea	Unidad	Conc.1	SD1	RSD%	R.Cont.
1	AL(5,10,20)		1	AL(5,10,20)						
2	Valor de referencia		2	Valor de referencia	A1396	mg/L				
3	Cal. Cerol		3	Cal. Cerol	A1396	mg/L	0			
4	Estánd. de cal.1		4	Estánd. de cal.1	A1396	mg/L	5			
5	Estánd. de cal.2		5	Estánd. de cal.2	A1396	mg/L	10			
6	Estánd. de cal.3		6	Estánd. de cal.3	A1396	mg/L	20			
7	Calcular calib.		7	Calcular calib.	A1396	mg/L				
8	Indicar funciones de		8	Indicar funciones de	A1396	mg/L				
9	AGUA		9	AGUA	A1396	mg/L	-0.3945	0.0750	19.0	2.346
10	M31		10	M31	A1396	mg/L	-0.4055	0.1347	33.2	2.347
11	M32		11	M32	A1396	mg/L	2.104	0.0146	0.7	2.126
12	M33		12	M33	A1396	mg/L	3.854	0.1238	3.2	2.004
13	M34		13	M34	A1396	mg/L	4.788	0.1098	2.3	1.951
14	M35		14	M35	A1396	mg/L	-0.4030	0.0175	4.3	2.347
15	M36		15	M36	A1396	mg/L	2.667	0.0989	3.7	2.083
16	M37		16	M37	A1396	mg/L	5.536	0.0987	1.6	1.917
17	M31		17	M31	A1396	mg/L	1.906	0.0696	3.7	2.141
18	STD		18	STD	A1396	mg/L	4.725	0.0469	1.0	1.955
19	STD		19	STD	A1396	mg/L	1.536	0.0251	1.6	2.172
20	M38		20	M38	A1396	mg/L	8.595	0.0303	0.4	1.848

Abs./tiempo Conc.1 | Conc.2 | Result QC | Error | V. indiv. | ID de muestra

Cont:AA 300 160327 USB 18-04-14 R-45 AL (ABRIL 2014)

Met: AL(5,10,20) Sec: AL(5,10,20) Muestra: Desconocido analytikjena

Secuencia/Resultados | Secuencia | Resultados | Visión general

Núm.	Tipo/Nombre	Pos.	Núm.	Nombre	Línea	Unidad	Conc.1	SD1	RSD%	R.Cont.
1	AL(5,10,20)		1	AL(5,10,20)						
2	Valor de referencia		2	Valor de referencia	A1396	mg/L				
3	Cal. Cerol		3	Cal. Cerol	A1396	mg/L	0			
4	Estánd. de cal.1		4	Estánd. de cal.1	A1396	mg/L	5			
5	Estánd. de cal.2		5	Estánd. de cal.2	A1396	mg/L	10			
6	Estánd. de cal.3		6	Estánd. de cal.3	A1396	mg/L	20			
7	Calcular calib.		7	Calcular calib.	A1396	mg/L				
8	Indicar funciones de		8	Indicar funciones de	A1396	mg/L				
9	AGUA		9	AGUA	A1396	mg/L	-0.3459	0.0627	18.1	1.243
10	AGUA		10	AGUA	A1396	mg/L	-0.5920	0.1170	19.8	1.256
11	M40		11	M40	A1396	mg/L	-0.2755	0.0402	14.6	1.239
12	M41		12	M41	A1396	mg/L	4.755	0.0523	1.1	1.037
13	M42		13	M42	A1396	mg/L	8.367	0.0236	0.3	0.9816
14	M43		14	M43	A1396	mg/L	11.66	0.0659	0.6	1.011
15	M44		15	M44	A1396	mg/L	16.23	0.0421	0.3	1.025
16	STD		16	STD	A1396	mg/L	11.66	0.0659	0.6	1.011
17	STD		17	STD	A1396	mg/L	16.23	0.0421	0.3	1.025

Abs./tiempo Conc.1 | Conc.2 | Result QC | Error | V. indiv. | ID de muestra

Cont:AA 300 160327 USB 22-04-14 A12 (ABRIL 2014)

10.3 Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSION	METODO
¿Influyen en el porcentaje de reducción de la concentración de hierro en agua, el pH, tiempo de reacción y densidad de corriente, en el proceso de electrocoagulación?	Reducir la concentración del hierro en agua mediante la electrocoagulación	H0 No existen diferencias significativas en la reducción (%) de Fe a diferentes tiempos a determinadas densidad de corriente y pH.	% de reducción (Y)	% de reducción	El equipo de Contra A_300_ENG Atomic Absorption Spectrometer. Procedimiento de empresa para análisis de concentración de hierro total, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA. AWWA. WEF. 21thedition 2005, Part 3000. Direct Air-Acetylene Flame Method -3111 B
<ul style="list-style-type: none"> ¿Influye en el porcentaje de reducción de la concentración de hierro en agua, el tiempo de reacción en el proceso de electrocoagulación? ¿Influye en el porcentaje de reducción de la concentración de hierro en agua, el pH en el proceso de electrocoagulación? ¿Influye en el porcentaje de reducción de la concentración de hierro en agua, la densidad de corriente en el proceso de electrocoagulación? 	<ul style="list-style-type: none"> Analizar la relación que existe entre el tiempo de reducción (4,8,12min) y la reducción de la concentración de hierro en agua Analizar la relación que existe entre el pH (6,7,8) y la reducción de la concentración de hierro en agua Analizar la relación que existe entre la densidad de corriente (10,20,30 A/m2,) y la reducción de la concentración de hierro en agua 	<p>Ho: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Fierro para distintas densidades de corriente, y pHs para tiempos de reducción de 4,8,12 min.</p> <p>Ho: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Fierro para distintas densidades de corriente a diferentes tiempos de reducción y pH=6,7,8</p> <p>Ho: No existen diferencias significativas entre los porcentajes de reducción de Fierro para distintos valores de pH a diferentes tiempos de reducción y densidad de corriente de 10, 20, 30A/m2, constante.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de reacción(X1) pHs(X2) Densidad de corriente(x3) 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de reacción pHs Densidad de corriente 	<ul style="list-style-type: none"> Cronometro Potenciometrico Lectura directa con equipo certificado y calibrado, Amperímetro marca SANWA-777