



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO



**PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE MEJORA AL TRATAMIENTO ACTUAL DE
LOS EFLUENTES GENERADOS EN EL ÁREA DE GALVANOPLASTÍA
PARA LA EMPRESA BERMÚDEZ INDUSTRIA
ELECTROMETALURGÍA C.A**

Tutora académica:

Prof. Angelina Correia

Tutor Industrial

Ing. Salvatore Maccarone

Autora

Br. BRESCHI Anaitza

Valencia, junio 2011



RESUMEN

Actualmente la empresa Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A es generadora de desechos electrolíticos en el área de galvanoplastia y éstos no poseen un tratamiento adecuado. Es por esta razón que se propuso un tratamiento que logre adecuar los electrolitos mediante el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos asociados a la investigación.

Se inició con el diagnóstico del proceso de operación donde se realiza el galvanizado de los cajetines, encontrándose el caudal de los tanques de enjuague como la causa más incidente en el aumento de la concentración de los contaminantes. Mediante un análisis de la variación de pH existente en las aguas de enjuague se determinó que se debe modificar el mismo, en lo que corresponde al tanque 3 se aumentó 88,6 %, el tanque 5 se incrementó un 66,7 % y el tanque 10 se incrementó un 81,8%. Con todos estos cambios se consiguió mantener el pH de las aguas de enjuague en valores constantes y por ende se disminuyó el arrastre hacia los tanques siguientes y la concentración de los electrolitos a tratar. Se caracterizaron los efluentes encontrándose altamente concentrados en sólidos totales con 2860 ppm, cromo total 36,4 ppm, zinc 67,9 ppm, cianuro total 16,8 ppm y sulfato 781 ppm con valores por encima de lo establecido en el decreto.

Se plantearon diferentes tecnologías para adecuar a la norma la concentración de los contaminantes. Para reducir el cromo a su estado trivalente se propuso usar 7,5 L de bisulfito de sodio a un pH de 2,5 y 280 mV de potencial de óxido-reducción. Adicionalmente se propuso realizar la precipitación del cromo trivalente y del zinc en solución con 7,5 L de hidróxido de sodio a un pH de operación de 8,6. Seguidamente se propuso la oxidación del cianuro a compuestos menos tóxicos como el cianato con 5,4 L de hipoclorito de sodio a un pH de 12 y 295 mV de potencial de óxido-reducción. Con respecto a la precipitación del zinc, con un ajuste de pH a 8 con soda cáustica, se logró la precipitación del hidróxido de zinc correspondiente al tanque II. El diseño del nuevo sistema de tratamiento de aguas, contempla el procedimiento paso a paso para la disminución de los metales pesados y cianuro, así como también la implantación de un sistema de osmosis inversa para la reducción de sólidos totales y la disposición de los lodos.

Palabras clave: Galvanizado, oxidación, precipitación, reducción, tratamiento de aguas



ABSTRACT

Currently the company Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A, is generating waste electrolytic plating in the area and they do not have appropriate treatment. For this reason it is proposed to achieve adequate treatment of electrolytes through the development of each of the specific objectives related to research.

It began with the diagnosis of the process of operation where the galvanizing is carried out of the drawers, finding the volume of rinse tanks such as the incident cause an increase in the concentration of pollutants. By analyzing the pH variation exists in the rinse water was determined to be amended the same, as for the tank 3 was increased by 88.6 %, the tank 5 is increase by 66.7 % and the tank 10 increased by 81.8 %. With all these changes are managed to maintain the pH of the rinse water at constant and therefore the drag is decreased following tanks and the concentration of electrolytes to be treated. Effluents were characterized found highly concentrated with 2860 ppm total solids, total chromium 36.4 ppm, 67.9 ppm zinc, 16.8 ppm total cyanide and sulphate 781 ppm with values above the limit set in the decree.

Different technologies were raised to match the standard concentration of pollutants. To reduce the chromium to its trivalente state was suggested to use 7.5 L of sodium bisulfite at pH 2.5 and 280 mV of redox potential. Additionally, proposed to hold the precipitation of trivalent chromium and zinc in 7.5 L solution of sodium hydroxide to a pH of 8.6. He then proposed the oxidation of cyanide to less toxic compounds such as cyanate with 5.4 L of sodium hypochlorite at a pH of 12 and 295 mV of redox potential. With respect to precipitation of zinc, with an adjusted pH to 8 with caustic soda, it was possible the precipitation of zinc hydroxide for the tank II. Design new treatment system waters contemplate stepwise procedure for diminishing heavy metals cyanide and also implementing a RO system reduction total solids and willingness sludge.

Keywords: Galvanizing, oxidation, precipitation, reduction, water treatment



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Formulación del problema	8
1.3 Objetivos de la investigación	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos	9
1.4 Justificación	9
1.5 Limitaciones	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Bases teóricas	15
2.2.1 Agua residual	15
2.2.2 Tratamiento de las aguas residuales	23
2.2.3 Galvanizado	35
2.2.4 Herramientas para la gestión de calidad	38
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	40
3.1 Tipo de investigación	40
3.2 Metodología	41
3.2.1 Diagnóstico del proceso productivo y del proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado de la empresa BIEMCA	41
3.2.2 Caracterización físico-química del afluente y del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales	45
3.2.3 Propuesta de posibles tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuar a la norma la concentración de los contaminantes	47



3.2.4 Verificación a nivel de laboratorio de la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesado y cianuro	50
3.2.5 Diseño del sistema de tratamiento a las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada	56
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
4.1.1 Diagnóstico del proceso productivo y del proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado de la empresa BIEMCA	61
4.1.2 Caracterización físico-química del afluente y del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales	76
4.1.3 Propuesta de posibles tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuar a la norma la concentración de los contaminantes	78
4.1.4 Verificación a nivel de laboratorio de la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesado y cianuro	87
4.1.5 Diseño de un sistema de tratamiento a las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
Conclusiones	120
Recomendaciones	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ÁPENDICE A	126
A.1 Volumen de los reactores encontrados en el proceso actual de tratamiento de las aguas	126
A.2 Caudal de operación de los tanques de enjuague del proceso de galvanizado	127
A.3 Caudal de agua residual a tratar en los reactores	128
A.4 Porcentaje de remoción de los contaminantes mediante el tratamiento actual	129
A.5 Caudal de operación para el equipo de osmosis inversa	130
A.6 Área necesaria para la implantación de las eras de secado	131
ÁPENDICE B	132
ÁPENDICE C	134



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de Galvanizado de las piezas metálicas	6
Figura 1.2. Representación del tratamiento actual de los efluentes generados en el área de galvanoplastia	7
Figura 2.1. Clasificación de los sólidos totales presentes en el agua residual	16
Figura 2.2. Diagrama esquemático de la distribución de los sólidos totales	17
Figura 2.3. Apariencia de colores en aguas residuales	19
Figura 2.4. Clasificación de los compuestos tóxicos importantes presentes en las aguas	22
Figura 2.5. Proceso de mezclado	25
Figura 2.6. Proceso de filtración	26
Figura 2.7. Sentido de flujo en lechos filtrantes	27
Figura 2.8. Curvas de solubilidad de hidróxidos metálicos	29
Figura 2.9. Principales mecanismos que intervienen en el proceso de coagulación	33
Figura 2.10. Representación esquemática del proceso de floculación	34
Figura 2.11. Representación esquemática del proceso de galvanizado	36
Figura 3.1 Diagrama Ishikawa o causa-efecto	44
Figura 3.2. Esquema representativo de la prueba de jarras realizada a las aguas residuales provenientes del área de galvanizado de la empresa BIEMCA utilizando NaOH.	53
Figura 3.3. Fotografía del kit calorimétrico portátil de la empresa.	57
Figura 3.4. Escala colorimétrica con la cual se determina la concentración de cromo.	58
Figura 3.5. Representación esquemática del volumen de control para la instalación del proceso de membrana	59
Figura 4.1. Distribución de los baños y los tanques de enjuague (T) en el proceso de galvanizado	62
Figura 4.2. Efectos negativos de algunos reactivos utilizados en el proceso de galvanizado.	64
Figura 4.3. Sistema de tratamiento actual instalado en la empresa	66
Figura 4.4. Diagrama Ishikawa para el proceso de galvanizado	68
Figura 4.5. Variación del pH de las aguas de enjuague a lo largo de un día de operación	72



Figura 4.6. Variación de pH con el nuevo caudal de operación en los tanques de enjuague	75
Figura 4.7. Tiempo de reacción de reducción de cromo hexavalente en función del pH	89
Figura 4.8. Distribución de las muestras del grupo I en el floculador	92
Figura 4.9. Distribución de las muestras del grupo II en el floculador	93
Figura 4.10. Diagrama potencial en función de pH para el CN a 25°C .	96
Figura 4.11. Representación esquemática de los pasos para el diseño del tratamiento	98
Figura 4.12. Representación esquemática del proceso de tratamiento de las aguas residuales	100
Figura 4.13. Representación esquemática del proceso de tratamiento de las aguas residuales para el tanque II	101
Figura 4.14. Coloración del sobrenadante del tanque I en el primer tratamiento	104
Figura 4.15. Escala colorimétrica y concentración del cromo total en el sobrenadante del tanque I en el primer tratamiento	104
Figura 4.16. Coloración del sobrenadante del tanque I en el segundo tratamiento	105
Figura 4.17. Escala colorimétrica y concentración del cromo total en el sobrenadante del tanque I en el segundo tratamiento	105
Figura 4.18. Esquema de una era de secado	109
Figura 4.19. Dimensiones de la era de secado a implantar en la empresa	111
Figura 4.20. Equipo de medición de potencial de oxido-reducción tipo 1	113
Figura 4.21. Equipo de medición de potencial de oxido-reducción tipo 2	115
Figura 4.22. Equipo de medición de potencial de oxido-reducción tipo 3	116
Figura C.1. Forma de los cajetines galvanizados en la empresa Biemca.	134
Figura C.2. Distribución de los cajetines en las gancheras.	134
Figura C.3. Colocación de las gancheras en la máquina de galvanizado	136
Figura C.4. Llenado de tobo para determinación del caudal de los tanques de enjuague del proceso de galvanizado	136
Figura C.5. Medición del pH usando papel indicador	137
Figura C.6. Formación del hidróxido de zinc y del hidróxido de cromo en la muestra T1C	137



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de aguas residuales con relación al color	18
Tabla 2.2. Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas	24
Tabla 3.1. Criterios para la selección de los niveles de cada variable	50
Tabla 4.1. Dimensiones del reactor	67
Tabla 4.2. Resultado del llenado de tobos para el cálculo del caudal en los tanques de enjuague	73
Tabla 4.3. Caudal de los baños de enjuague del proceso de galvanizado	74
Tabla 4.4. Caudal modificado de los baños de enjuague del proceso de galvanizado	74
Tabla 4.5. Caracterización fisicoquímica del afluente y del efluente del proceso de galvanizado de la empresa BIEMCA	77
Tabla 4.6. Remoción de los contaminantes de la planta de tratamiento actual	78
Tabla 4.7. Ventajas y desventajas de los reactivos seleccionados para precipitación de cromo trivalente y zinc	80
Tabla 4.8. Ventajas y desventajas de los agentes oxidantes propuestos para oxidación de cianuro	81
Tabla 4.9. Ventajas y desventajas de las tecnologías para secado de lodos.	82
Tabla 4.10. Matriz de selección de las tecnologías para el secado de los lodos	86
Tabla 4.11. Reactivos empleados para la reducción del cromo con sus respectivos pH de trabajo	89
Tabla 4.12. Resultados del ensayo realizado para reducción del cromo hexavalente	90
Tabla 4.13. Dosis de reactivos utilizado en la prueba de jarras usando soda cáustica como agente precipitante.	91
Tabla 4.14. Concentración de los contaminantes presentes en el sobrenadante de la solución del tanque I tratado con soda cáustica	93
Tabla 4.15. Parámetros finales del grupo de jarra de la prueba del tanque I con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	94
Tabla 4.16. Concentración de los contaminantes presentes en el sobrenadante de la solución del tanque I tratado con cal	95
Tabla 4.17. Ensayo realizado a la muestra del tanque II para oxidación de cianuro	97
Tabla 4.18. Parámetros proyectados para la reducción del cromo en el tanque I	99
Tabla 4.19. Parámetros proyectados de los resultados de la prueba de jarras para	99



precipitación de hidróxidos metálicos presentes en tanque I

Tabla 4.20. Parámetros proyectados para la oxidación de cianuro en el tanque II	100
Tabla 4.21. Resultados de análisis fisicoquímicos para efluente del tanque I después de realizar el nuevo tratamiento	106
Tabla 4.22. Especificaciones técnicas del medidor pH PCE-228	114
Tabla 4.23. Especificaciones técnicas del equipo de medición de potencial redox	115
Tabla 4.24. Especificaciones técnicas del equipo de medición pH PCE-PH 22	117



INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales es una práctica que, si bien se lleva realizando desde la antigüedad, hoy por hoy resulta fundamental para mantener nuestra calidad de vida. Son muchas técnicas de tratamiento con larga tradición y, evidentemente, se ha mejorado mucho en el conocimiento y diseño de las mismas a lo largo de los años.

Históricamente las aguas residuales no han sido un factor intrínseco de la producción y se suponía que el medio ambiente las absorbía y les daba un tratamiento natural. El progreso cultural e industrial acabó llevando aquella práctica a situaciones límites (Rigola, 1990). El género humano ha sido atacado con la terrible idea de que la humanidad está trabajando efectivamente para su autodestrucción, a través de procesos sistemáticos de contaminación del ambiente, con el fin de conseguir un progreso material (Ramalho, 2003).

Los ríos, lagos y mares recogen, desde tiempo inmemorables, los residuos producidos por la actividad humana. El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación, pero está misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos por las actividades del hombre tales como: pesticidas, desechos químicos, metales pesados, residuos radioactivos, etc. Muchas aguas están contaminadas hasta el punto de hacerlas peligrosas para la salud humana y dañinas para la vida, siendo las sustancias contenidas en el agua prácticamente innumerable y de diversas naturalezas, el objetivo de un tratamiento no puede ser su eliminación en conjunto sino al uso previsible para cada agua.

El objetivo de los tratamientos es, en general, reducir la carga de contaminantes del vertido y convertirlo en inocuo para el ambiente. El tratamiento a realizar dependerá de las características físicas y químicas del agua a tratar es decir de las características de la industria.

La industria galvánica representa una pieza importante para la economía de un país, ya que engloba la producción de muchos artículos importantes en la sociedad. Sin embargo es una de las mayores industrias de generación de desechos peligrosos por su alta concentración en sustancias químicas contaminantes. Teniendo en cuenta el grado de contaminación que este tipo



de empresas pueden ocasionar al ambiente, la presente investigación va orientada al tratamiento de desechos líquidos generados en el área de galvanoplastia, los cuales actualmente se tratan de manera incorrecta. Estos desechos poseen una alta toxicidad y su impacto al ambiente depende de la forma en la que se encuentren.

La toxicidad y capacidad de absorción de muchos elementos en los organismos depende en gran medida de la forma química en la que se encuentren dichos elementos. Las especies se pueden distinguir por su estado de oxidación (especies redox), por su forma molecular (organometálicos), por su coordinación (complejos), por la fase en la que se encuentra el analito (disuelto, coloidal, en suspensión) o por su solubilidad en ciertos disolventes (Pazos, 2006).

La presente investigación está constituida por cuatro capítulos, en el primero se establece el planteamiento del problema, los objetivos a desarrollar, la situación actual, la situación deseada, los alcances y las limitaciones que se puedan presentar. El segundo capítulo está constituido por las bases teóricas y los antecedentes que sustentan la investigación. El tercer capítulo explica la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de los objetivos y el cuarto y último capítulo contempla las discusiones de los resultados obtenidos.

La importancia del desarrollo de esta investigación radica en la adecuación de la planta de tratamiento actual de la empresa, a los desechos generados en el área de galvanoplastia, asegurando de esta manera el cumplimiento de lo establecido en la normativa ambiental decreto 3.219, (1.999) evitando sanciones legales y disminuyendo de esta manera la contaminación que el vertido pueda ocasionar al ambiente.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se presentará de forma puntualizada el problema en estudio, definiéndose su finalidad, así como también se expondrá la situación actual y deseada y los objetivos tanto general como específicos de la investigación, se dará a conocer los argumentos que justifican el estudio junto con las limitaciones y los alcances respectivos.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el año 1963 se funda en Venezuela, Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A. BIEMCA dedicada a la manufactura de componentes utilizados en la industria de la construcción para el cableado, empalme y protección de instalaciones eléctricas de baja tensión. La planta, desde sus inicios artesanales hasta la producción automatizada ha expresado a través de sus productos la búsqueda de la excelencia, para ello se cuenta con materias primas de certificada calidad, las cuales otorgan características de solidez y confiabilidad a sus productos, cuya amplia gama permite cubrir las exigencias que requiere el proyecto eléctrico.

La empresa cuenta con un personal especialmente entrenado, el cual trabaja de manera objetiva hacia el mejoramiento de los procesos productivos de la planta, la cual se encuentra ubicada en la Ciudad de Maracay del estado Aragua, Zona Industrial San Miguel, Calle Valencia, Número 32. La empresa BIEMCA realiza un proceso de galvanizado de las piezas metálicas y cuenta con un área de tratamiento de los efluentes generados. En la figura 1.1 el diagrama del proceso de galvanizado.

Las piezas a galvanizar son transportadas a la etapa donde se lleva a cabo el proceso de galvanizado y allí son colocadas en gancheras, éstas son sumergidas en los distintos tanques, se comienza con un lavado previo para eliminar grasas y partículas de aluminio, luego se realiza un lavado con ácido clorhídrico para efectuar el decapado de la pieza, posteriormente se efectúa con agua el lavado del ácido clorhídrico y un desengrase electrolítico.

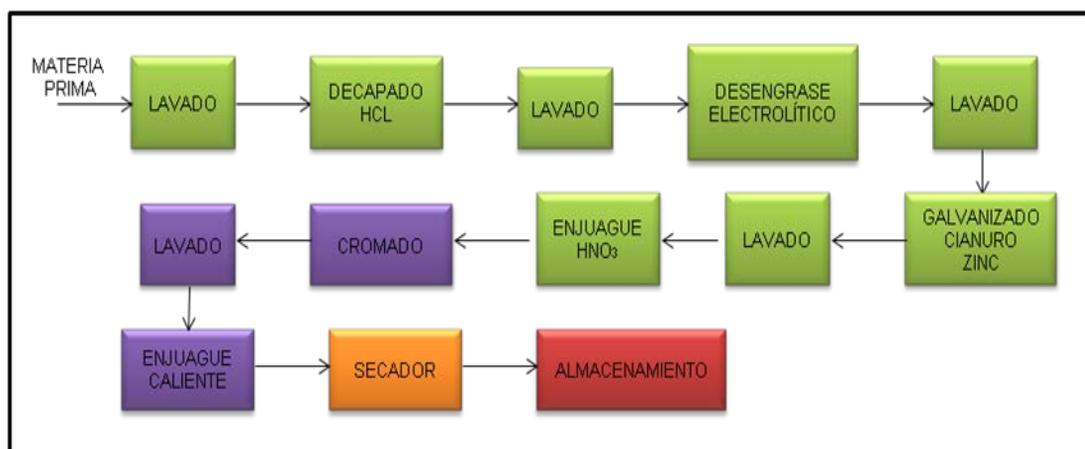


Figura 1.1. Proceso de Galvanizado de las piezas metálicas producidas por la empresa BIEMCA.

Antes de proceder con el galvanizado de la pieza, se lleva a cabo un enjuague con agua para eliminar grasas y otro residuo presente en los lavados anteriores, para permitir la mejor adherencia del zinc. En los tanques de galvanizado se sumergen las gancheras, estos tanques están previstos de solución de cianuro de sodio, soda caustica, abrillantador y zinc metálico como ánodo. Luego de un rápido lavado, se sumergen las piezas en ácido nítrico diluido (2 L de ácido por 750 L de agua), esto para la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie del metal, que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos.

Posteriormente se realiza un lavado para eliminar exceso de ácido para proceder a la sección donde se encuentran las sales cromadas en la cual se introducen las piezas para dar un acabado brillante y mejorar las propiedades finales de las mismas. Se realizan posteriormente lavados con agua para eliminar restos de las soluciones, uno de los lavados se lleva a cabo con agua caliente con espuma, esto para que se realice un secado más rápido. Luego de la sección de secado, se desmontan las gancheras, se retiran las piezas de la misma y se almacenan en cajas para su posterior entrega.

Los respectivos efluentes generados en los lavados del proceso anterior son acumulados en dos tanques, en uno de ellos se encuentra las sales cromadas, el lavado del ácido clorhídrico y el enjuague con agua caliente; y es llamado tanque I. El segundo tanque contiene sustancias como ácido nítrico, cianuro de sodio, zinc en solución, entre otros, y es llamado tanque II.

Posteriormente, se les realiza un tratamiento respectivo a cada tanque. En la siguiente figura se observa el proceso de tratamiento que se lleva a cabo en la empresa BIEMCA.

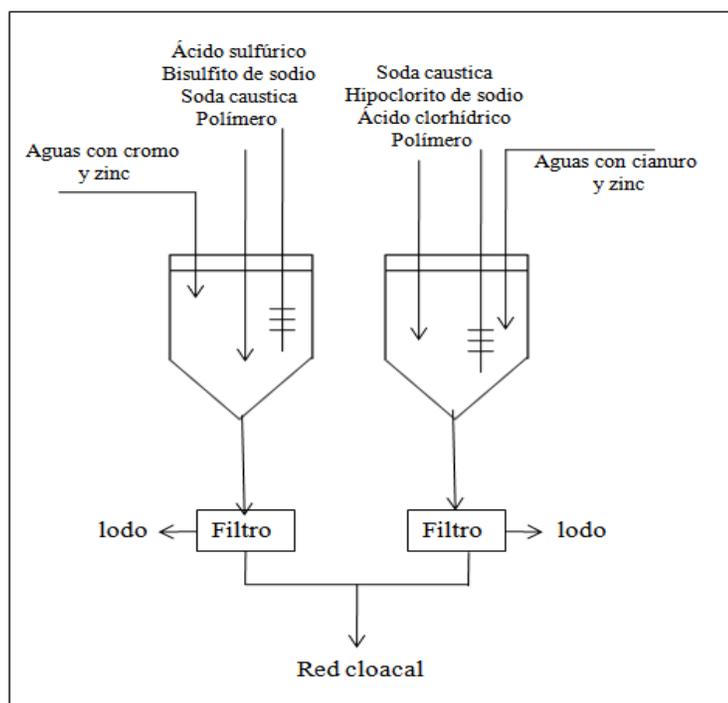


Figura 1.2. Representación del tratamiento actual de los efluentes generados en el área de galvanoplastia de la empresa BIEMCA.

Cada efluente es tratado por separado en dos tanques diferentes, éstos son sometidos a tratamientos físico-químicos. En el tanque I se agrega 4 L de ácido sulfúrico para acidificar el agua desde un pH de 6 a un pH de 2, se agita y se aplica el bisulfito de sodio. Luego de llevar a pH 6 con soda cáustica, se agrega el polímero orgánico como coagulante, en un proceso de tipo batch, que permite la coagulación y floculación de la mezcla y la separación de las fases por gravedad en una sola unidad física. El lodo producido en este tanque se coloca en bandejas y se dejan a la intemperie para su secado. En el segundo tanque se procede a aumentar el pH entre 12 y 13 usando para ello soda cáustica, posteriormente se agrega hipoclorito de sodio y luego de una agitación de aproximadamente 20 min, se agrega el polímero, lo cual ayuda a la precipitación. El lodo que se produce es colocado en bandejas para su posterior secado, y el agua tratada es llevada por tuberías hacia el vertedero.

En la actualidad según análisis de laboratorio del efluente después del tratamiento, indican que los contaminantes presentes se encuentran por encima de los niveles exigidos por la gaceta oficial extraordinaria N° 5305 del decreto 3219 de las normas para la clasificación y el Control de Calidad de las Aguas en la Cuenca del Lago de Valencia, obligando de esta forma a la empresa a



mejorar el proceso de tratamiento de las aguas residuales. Estos contaminantes fuera de norma corresponden a sólidos totales, zinc, cromo, cianuro y sulfatos. Los demás parámetros que contemplan la norma si se encuentran dentro de las exigencias, estos son: pH, DBO, DQO, fósforo total y nitrógeno total, etc.

Para disminuir el contenido de contaminantes presentes, se plantea una nueva alternativa de tratamiento que permita adecuar las aguas residuales a los valores permisibles en las normas ambientales.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La empresa Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A., no cumple con las normas legales ambientales la cual regula las características de los vertidos líquidos generados por la planta de tratamiento, esta problemática traza el desarrollo de la investigación, la cual permite localizar las etapas del proceso donde exista una ineficiencia, para de esta manera realizar una mejora en las mismas y así adecuar los efluentes y evitar sanciones legales correspondientes al decreto 3219.

1.2.1 Situación Actual

Los efluentes de la empresa BIEMCA, presentan una concentración de contaminantes por encima de lo establecido para las aguas residuales, a pesar de que ésta realiza un proceso de tratamiento de aguas. Si se mantiene esta situación, la empresa se verá afectada de forma económica ya que será sancionada por la ley como corresponde en el decreto 3219, donde se expresa la cantidad de contaminantes permisibles en los vertidos líquidos descargados en la red cloacal.

La situación actual de la empresa incurre en el deterioro progresivo del ambiente, ya que al descargar sus efluentes con altos contenidos de contaminantes, se genera un impacto negativo al medio, es por esta razón y la más importante que la empresa deberá adecuar a la norma sus efluentes. Así de esta manera no aportar contaminación al medio y apoyar la lucha de salvar el ambiente.



1.2.2 Situación Deseada

Instalar un sistema eficiente donde se lleve a cabo el tratamiento de los efluentes generados en el área de galvanoplastia, para así de esta manera cumplir con las normas ambientales según lo establece el decreto 3219 de la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5305, y así evitar sanciones y disminuir los contaminantes existentes en los actuales residuos y reducir de esta manera la contaminación que éstos pueden generar en el ambiente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Proponer alternativas de mejora al tratamiento actual de los efluentes generados en el área de galvanoplastia para la empresa Bermúdez Industria Electrometalúrgica, C.A (BIEMCA)

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diagnosticar el proceso productivo y el proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado de la empresa BIEMCA.
2. Caracterizar físico-químicamente el afluente y el efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales
3. Proponer posibles tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuar a la norma la concentración de los contaminantes.
4. Verificar a nivel de laboratorio la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesados y cianuro.
5. Diseñar un sistema de tratamiento de las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de esta investigación permite que la empresa Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A., no incurra en sanciones legales en el ámbito ambiental, ya que se propondrán alternativas para acondicionar los efluentes y disminuir la concentración de los



contaminantes. La elevada concentración de los contaminantes actuales (cromo, zinc, cianuro, cloruros, sulfatos y sólidos totales) incide de manera negativa en el ambiente, lo cual hace que el investigador y la empresa desarrollen soluciones a la problemática actual.

El tratamiento de las aguas generadas en el proceso de galvanoplastia se realiza de manera manual por los operarios de la misma, se propondrá una alternativa para llevar a cabo este tratamiento de manera sistemática sin que los operadores realicen el trabajo directamente, evitando de esta manera posibles riesgos que pueden incidir en la salud y bienestar del trabajador.

Esta investigación presenta un aporte metodológico ya que desarrollará medidas para la adecuación y tratamiento de aguas residuales lo cual ayudará a investigadores futuros a realizar estudios en este tema, puntualizando el tratamiento en las aguas residuales de procesos de galvanoplastia los cuales cuentan con una adecuación distinta que otras áreas industriales.

Como interés personal, llevar a cabo esta investigación afianzará conocimientos en el área de tratamiento de aguas, en los decretos existentes en la ley para los vertidos líquidos y en la realización de un trabajo de investigación amplio que aumente el desempeño como futuro ingeniero y acreciente la experiencia laboral.

1.5 LIMITACIONES

Esta investigación se llevará a cabo siempre y cuando la planta de galvanizado de las piezas metálicas opere de manera normal, es decir, mientras no se realice una parada de planta. El tiempo en proponer una alternativa ideal para adecuar las concentraciones de los contaminantes, dependerá del tiempo que el laboratorio realice los análisis respectivos.

La planta de galvanizado no posee un medidor cuantificador del caudal de los efluentes generados, por lo que se deberá realizar pruebas experimentales para su determinación.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan algunas investigaciones que contienen fines semejantes con el presente estudio, los cuales permiten orientar el desarrollo de esta investigación, así como también se detallan los conceptos básicos necesarios que permitan al lector una mayor comprensión de lo expuesto a lo largo de esta investigación.

2.1 ANTECEDENTES

A continuación se muestran aspectos relevantes de anteriores investigaciones que sirvieron como referencia importante para el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Freire, L. y Villacís, E. (2009), Realiza su investigación generando el diseño de una planta para tratamiento de aguas residuales en una industria cartonera. El objetivo de este trabajo fue demostrar la factibilidad de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales y el diseño se ajusta al tratamiento de una planta cartonera cuyo efluente será reutilizado para el proceso de elaboración de adhesivos. Los objetivos de la planta de tratamiento fueron suministrar el agua con las condiciones requeridas para la preparación del almidón y reducir el impacto ambiental del agua residual en la red de alcantarillado de acuerdo a los parámetros establecidos por los organismos de control de impacto ambiental de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Principalmente se estudió el proceso de fabricación del cartón corrugado. Se describió la función del agua dentro de este proceso y se especificó la influencia de ésta sobre las propiedades del adhesivo. De acuerdo al volumen de agua a tratar, la masa de reactivos a usar y el cálculo del volumen de agua tratada y los residuos, se procedió al diseño de la infraestructura y selección de equipos.

Se obtienen como resultados de esta investigación que de acuerdo a los volúmenes de agua residual producidos por la planta en un lapso de 9 semanas y usando el análisis estadístico se determinó la capacidad de los tanques en 10500 gal y 6000 gal para los tanques de agua residual y agua tratada respectivamente. Para el tanque de tratamiento se determinó que el volumen promedio generado por turno es de 1370 gal, con el fin de sobredimensionar el tanque se fijó la capacidad del tanque en 2000 gal. Para las masas de reactivos, volumen de agua tratada y



residuos, de acuerdo a los valores de la prueba de jarra, se determinó que para tratar 2000 gal (7560 lts), se requiere de 22.68 Kgs de sulfato ferroso (FeSO_4) y 22.68 Kgs de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Con respecto a las bombas a usar, estas serán de tipo neumática para el tanque de tratamiento, bombas centrifugas para dosificación de los reactivos, y un compresor de vacío para el filtro de vacío.

Lozano, J. y Wiesner, I., (2009), en su memoria técnica de implementación del sistema de tratamiento externo de efluentes en papelería nacional S.A. trata sobre los proyectos que se implementaron en a partir del año 1998, destinados a reducir el impacto ambiental de la operación de la planta industrial, la cual está comprendida de una planta de clarificación de los efluentes industriales. Este proyecto se desarrolló en la planta industrial de PAPELERA NACIONAL S.A. dedicada a la fabricación de papel Kraft, (corrugado medio, extensible, y test liner) y sus derivados (sacos de papel extensible para la industria azucarera y cementera) y tubos espiralados de cartón.

Para el desarrollo de esta investigación, se analizó los efluentes existentes, luego se seleccionaron los equipos requeridos, tales como el clarificador y la prensa de lodos, así como también se calcularon y seleccionaron los equipos auxiliares, tales como sistemas de bombeo, se dimensionaron las lagunas de oxidación, tubería de conducción de agua clarificada y el canal abierto hacia las lagunas. Posteriormente se realizaron los planos de instalación, se instalaron los equipos y se puso en funcionamiento el sistema. Finalmente se evaluaron y monitorearon los resultados obtenidos con la implementación del proyecto.

Se evaluaron los parámetros de control de la descarga de los efluentes, en cuanto a: sólidos totales suspendidos STS, demanda química de oxígeno DQO, sólidos totales disueltos STD, oxígeno disuelto O_2 , conductividad, sólidos flotantes en el canal abierto, sólidos en las lagunas de retención, pérdida de fibra, potencial de hidrógeno pH, temperatura. Se encontró como resultado de la implementación de este proyecto importantes reducciones en los parámetros de control de calidad: 93% de reducción en STS, 29% de reducción en STD, 48% de reducción en DQO, y 53% de reducción en DBO_5 .



Charama, J. y Ruiz, C., (2008), en su propuesta para el tratamiento de los electrolitos generados en el área de galvanoplastia de la empresa Rotogrados Venezolanos (ROTOVEN) S.A. realizaron propuestas de tratamientos de aguas generadas en el proceso de galvanizado de piezas metálicas, para así adecuar la cantidad de contaminantes a valores permisibles en la normativa ambiental.

En la presente investigación se estudió las condiciones óptimas requeridas para remover metales pesados del agua residual generada en el área de galvanoplastia, por no poseer un tratamiento adecuado para los mismos. Se plantearon diferentes tecnologías para tratar dichos electrolitos tales como: biorremediación, fitorremediación, electrocoagulación, electrodeposición, precipitación química, seleccionando como más adecuadas la electrodeposición y la precipitación química. Se obtuvo un porcentaje de remoción de 82,3% para el cobre y 91% de remoción para el níquel. La concentración de sulfatos a la salida del tratamiento físico químico presentó un valor de 588,4 ppm para la solución de cobre y 325 ppm para la solución de níquel, garantizando el cumplimiento del decreto 3219 a la salida hacia la red cloacal.

Lira, L. (2008), Propone el acondicionamiento de las características físicas y químicas del efluente de la planta de tratamiento de la Corrugadota Suramericana C.A. que logren mejorar el actual tratamiento de los efluentes de la empresa corrugadora de cartón. Para ello se comenzó la investigación realizando un reconocimiento del proceso de elaboración de las cajas de cartón y se continuó con la identificación del proceso de tratamiento actual que reciben los efluentes del proceso productivo en la planta de tratamiento de aguas residuales. Luego se procedió a determinar las causas por las cuales la planta de tratamiento de aguas residuales no cumple con el objetivo de adecuar los efluentes a las normas ambientales, por dar respuesta a esto se identificaron los puntos estratégicos para la realización del muestreo y de esta manera caracterizar los efluentes, para así conocer sus componentes, concentración y de esta manera obtener los valores existentes para determinar si cumplen o no con los valores permisibles por la normativa ambiental.

Posteriormente se plantearon alternativas para adecuar los efluentes los cuales cumplan con los límites de descarga establecidos por el decreto 3219, específicamente en la concentración de DBO, DQO, sólidos totales, nitrógeno, fósforo y cobre y se encontró que para la remoción de la materia orgánica, se debe incluir al tratamiento actual un sistema de tratamiento biológico



Garay, F. y Rodríguez, R., (2008), su propuesta de alternativa de tratamiento para la adecuación de los efluentes industriales de la empresa PERFECT PISTON LTDA, se llevó a cabo para encontrar alternativas de adecuación de los efluentes generados en una planta productora de pistones de aluminio. Para la obtención de los mejores resultados, se comenzó con una inspección exhaustiva de los equipos e instalaciones presentes en la planta, luego se procedió a determinar las áreas donde se generan los efluentes a tratar, para lograr la caracterización de éstos y así proponer las mejores alternativas para la adecuación. Para determinar las áreas que generan los efluentes contaminados se realizó un método llamado Ishikawa.

A partir de la materia prima utilizada se logra la caracterización de los efluentes y a partir de esto se propusieron las mejores alternativas, luego de la selección de la mejor alternativa se realizó un estudio de costo beneficio que esta propuesta pueda generar a la empresa de pistones de aluminio.

Entre algunos resultados obtenidos después de la caracterización de los efluentes se encuentran que éstos están fuera de los límites establecidos por el decreto 3219, en todos los parámetros analizados; DBO, DQO, sólidos totales, aceites, fósforo, aluminio, pH y estaño. Adicionalmente se encontró que algunas de las causas importantes en la alteración de las concentraciones de los contaminantes son la ausencia de la motivación y adiestramiento del personal, productos químicos utilizados y la ausencia de métodos de preparación de soluciones.

Estas causas se tomaron en cuenta para la selección de la mejor alternativa, la cual resulto ser un sistema donde se encuentre un tanque de igualación y neutralización de pH, un proceso de coagulación-floculación, un tanque sedimentador, un equipo de osmosis inversa, un tanque de agua clarificada y un filtro de prensa. Con esta propuesta se lograría la remoción de los contaminantes que se encuentran fuera de norma.



2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Agua residual

Se consideran aguas residuales a los líquidos provenientes de una comunidad, industria, granja u otro establecimiento, con contenido de materiales disueltos y suspendidos (Decreto 3.219, 1999).

Otra forma de denominar a las aguas residuales es en base al contenido de contaminantes que ésta porta, así se conocen como: aguas negras a las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Aguas grises a las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, que aportan sólidos suspendidos, fosfatos, grasas y coliformes fecales, esto es, aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros y aguas negras industriales a la mezcla de las aguas negras de una industria en combinación con las aguas residuales de sus descargas. Los contaminantes provenientes de la descarga están en función del proceso industrial, y tienen la mayoría de ellos efectos nocivos a la salud si no existe un control de la descarga (Ramalho, 2003).

Antes de proceder a una descripción de los procesos disponibles para mejorar la calidad de las aguas, es conveniente especificar los parámetros utilizados para definir su calidad. Algunos de estos parámetros se utilizan en el control de los procesos de tratamiento realizando mediciones de forma continua. Adicional a las definiciones se resume sus efectos más importantes, la forma usual de análisis o medición y el tratamiento adecuado. Los parámetros se pueden clasificar en tres grandes grupos: físicos, químicos y biológicos (Rigola, 1990). A continuación se tratará en detalle las características físicas y químicas del agua residual por ser los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta en esta investigación. Las características biológicas no son relevantes para efectos de este estudio, sin embargo, serán citadas brevemente.

a) Características físicas del agua residual

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua residual, del proceso que se realiza y de los posibles problemas existentes en la adecuación de los efluentes en una planta de tratamiento de aguas residuales. Las características físicas más importantes del agua

residual son el contenido total de sólidos, el color, el olor y sabor, la temperatura y la turbiedad. A continuación se realiza una síntesis que permita conocer la importancia del estudio de dichos parámetros para la comprensión de la presente investigación.

* Sólidos totales

Los sólidos totales se pueden clasificar de la siguiente manera:

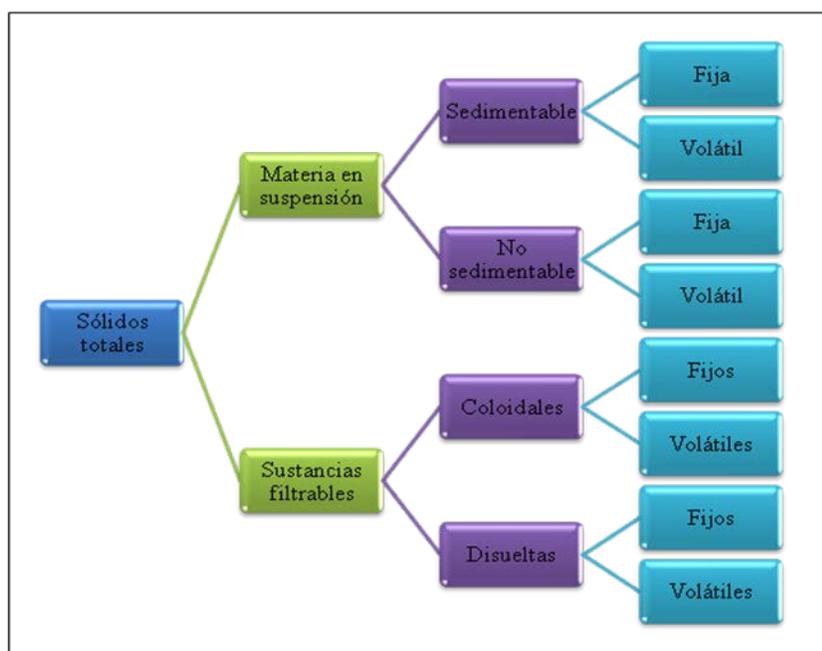


Figura 2.1. Clasificación de los sólidos totales presentes en el agua residual
Fuente: Orozco, et. al, 2004.

La **materia en suspensión** es responsable de los siguientes efectos:

- Produce color aparente en el agua.
- Disminuye el paso de energía solar, por lo que es responsable de una menor actividad fotosintética.
- Ocasiona depósitos sobre las plantas acuáticas y las branquias de los peces.
- Ocasiona depósitos por sedimentación, con lo que favorece la aparición de condiciones anaeróbicas y dificulta la alimentación de los seres vivos acuáticos. (Orozco et. al, 2004).

Como puede observarse en la figura 2.1 la materia en suspensión se divide en sedimentables y no sedimentables:

Se consideran sólidos sedimentables a aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica en un tiempo de 60 min. En lo referente al tratamiento de agua, este parámetro se utiliza para conocer el volumen y la densidad que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Su análisis se realiza por volumetría y gravimetría, previa decantación y tamizado (Delgadillo et. al, 2010). Los sólidos no sedimentables son aquellos sólidos que no sedimentan en recipientes, es decir, permanecen en suspensión y sólo pueden ser retirados por una barrera física (filtros).

Las sustancias filtrables son las responsable de aumentar la salinidad, variar la solubilidad del oxígeno y pueden inducir toxicidad por la presencia entre ellas de determinados compuestos (Orozco et. al, 2004). Son la fracción de materia sólida que pasa por un filtro de membrana de vidrio. Los sólidos filtrables a su vez se dividen según el diámetro de sus partículas, en sólidos coloidales y sólidos disueltos (Delgadillo et. al, 2010).

Por otra parte, en la figura 2.2 se muestra de manera esquemática la distribución de los sólidos, clasificándolos mediante su tamaño, en sólidos suspendidos con tamaño superior a $1.2 \mu\text{m}$, sólidos coloidales con tamaño de entre $1.2 \mu\text{m}$ a $0.001 \mu\text{m}$ y sólidos disueltos a aquellos de tamaños inferior a $0.001 \mu\text{m}$.

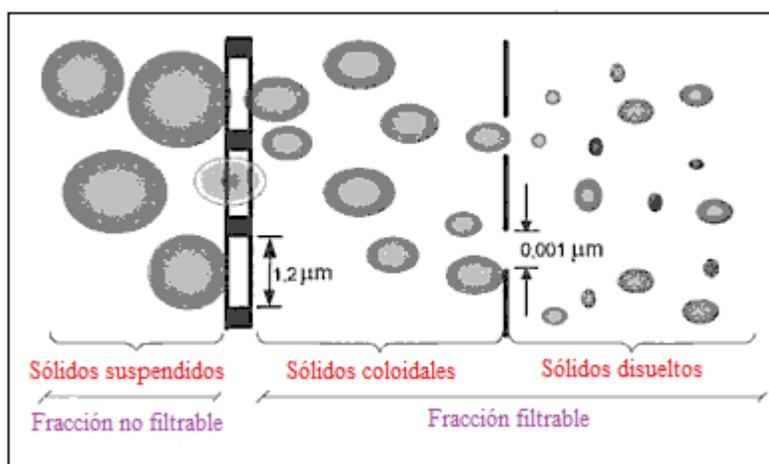


Figura 2.2. Diagrama esquemático de la distribución de los sólidos totales
Fuente: Delgadillo, et. al, 2010.

Como no es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación, para este fin, normalmente es necesaria la oxidación biológica o la coagulación y floculación complementadas con sedimentación. Los sólidos disueltos están compuestos por moléculas orgánicas e



inorgánicas, e iones en disolución en el agua. Se relacionan con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha disuelto a su paso (Delgadillo et. al, 2010).

El término fijo encontrado en la clasificación de los sólidos (figura 2.1) engloba habitualmente materia de naturaleza inorgánica, mientras que el término volátil se incluye compuestos, en general, de naturaleza orgánica.

*** Color**

El color en aguas residuales es causado por los sólidos en suspensión, material coloidal y sustancias en solución. Asimismo, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual según lo establecido en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de aguas residuales con relación al color

Color	Características del agua
Café claro	Agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga.
Gris claro	Agua que ha sufrido algún grado de descomposición Agua que ha permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección.
Gris oscuro o negro	Aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacterial bajo condiciones anaeróbicas (sin oxígeno).

Fuente: Delgadillo et. al, (2010)

Hay que distinguir lo que se llama color aparente, que es el que presenta el agua bruta, del denominado color verdadero, que es el que presenta cuando se ha eliminado la materia en suspensión. Los colores de las aguas residuales pueden ser debidos a multitud de compuestos orgánicos e inorgánicos, que pueden estar en elevadas concentraciones: sales de cromo, colorantes industriales, aceites entre otros.

En la figura 2.3 se muestra la apariencia de las aguas residuales en relación con el color, tres beakers son comparados, el primero muestra un agua clara sin compuestos contaminantes, el segundo un agua ligeramente turbia y el tercero un agua muy turbia de color gris oscuro con altos niveles de contaminantes.

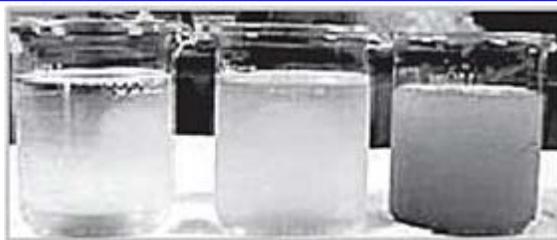


Figura 2.3. Apariencia de colores en aguas residuales
Fuente: Orozco, et. al, 2004.

* Olor y sabor

El olor y el sabor están, en general, íntimamente relacionados. Las fuentes de olor y sabor pueden ser naturales o artificiales. En general, los compuestos inorgánicos no producen olor, excepto el cloro, sulfato de hidrógeno, amoníaco y derivados. Los compuestos orgánicos suelen producir tanto sabores como olores, entre los que comunican malos olores y sabores se destacan: fenoles, clorofenoles, mercaptanos, aldehídos, detergentes entre otros. Especialmente tienen malos olores y sabores las aguas residuales domésticas e industriales (Raudel et al, 2002)

* Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, debido a la incorporación de agua caliente procedente de los diferentes usos industriales. La temperatura media anual del agua residual varía entre 10 y 21°C. Es una variable física que influye notablemente en la calidad de un agua, afecta a parámetros o características tales como: (Metcalf & Eddy 1995).

- Solubilidad de gases y sales.
- Cinéticas de las reacciones químicas.
- Desplazamientos de equilibrios químicos.
- Tensión superficial.
- Desarrollos de organismos presentes en el agua



*** Turbiedad**

La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. Es provocada por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal. Es un fenómeno óptico que consiste en una absorción de luz combinada con procesos de difusión. Las partículas insolubles responsables de la turbidez pueden ser aportadas tanto por procesos de arrastre como de remoción de tierras y también por vertidos urbanos e industriales (Rigola, 1990).

b) Características químicas del agua residual

Las propiedades químicas del agua residual tienen gran importancia debido a que interaccionan con los receptores, variando el valor de cada parámetro, es por ello que las modificaciones a provocar en el agua residual tienen que poseer un sentido de equilibrio que evite, en todas las formas posibles, que un componente se convierta en factor limitante del crecimiento del sistema natural. Entre las características químicas del agua residual que se deben tener en cuenta para el presente estudio se encuentran las siguientes:

*** pH**

La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presentan dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la descarga de las aguas a la red cloacal (Metcalf & Eddy, 1995).

El pH de un agua, que indica el comportamiento ácido o básico de la misma, es una propiedad de carácter químico de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática. Además del pH se miden otros parámetros relacionados con él, que son la alcalinidad y la acidez.



- **Alcalinidad**

Es una medida de la capacidad del agua para absorber protones, tiene un gran interés para el conocimiento de la agresividad o la tendencia a la incrustación de un agua. La agresividad se refiere al deterioro en frío, ocasionado por ciertas aguas naturales, de materiales de diversos tipos, metales, calizas, cemento y productos derivados. (Orozco et al, 2004).

- **Acidez**

Es debida a la presencia de dióxido de carbono libre, ácidos minerales y orgánicos y sales con cationes que sufran hidrólisis ácida. Los vertidos industriales aportan una cantidad considerable de ácidos, fundamentalmente las aguas provenientes de baños ácidos y tratamientos superficiales (Orozco et al, 2004).

- * **Compuestos tóxicos**

El término toxicidad se refiere al daño que puede producir en los seres vivos la presencia de determinados contaminantes en el agua. La toxicidad es función de la concentración del contaminante y del tiempo de exposición al que esté sometido el ser vivo al tóxico. (Orozco et al, 2004).

Es de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales eliminar algunos cationes como el cobre, el plomo, la plata, el cromo, el arsénico y el boro, los cuales son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, razón por la cual deben ser considerados en el proyecto de plantas de tratamiento biológico. Algunos aniones tóxicos, entre los que se incluyen los cianuros y los cromatos, están asimismo presentes en los vertidos industriales. Se encuentran principalmente en los efluentes de fábricas de recubrimientos metálicos, y deben ser eliminados en la propia fábrica mediante pre-tratamientos adecuados antes de verter a las aguas residuales municipales (Metcalf & Eddy, 1995).

Una posible clasificación de los compuestos mas tóxicos presentes en las aguas se representa en la figura 2.4, donde se encuentran los compuestos de carácter inorgánico, los de carácter orgánico y aquellos microorganismos patógenos que se deben eliminar o disminuir en concentración para adecuar el agua residual de manera de obtener una agua sin contaminantes peligrosos para el ambiente.

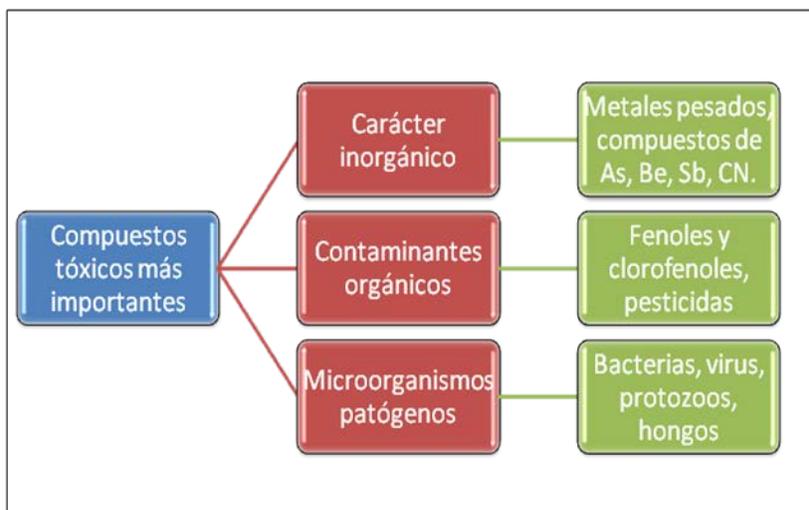


Figura 2.4. Clasificación de los compuestos tóxicos importantes presentes en las aguas
Fuente: Orozco, et. al 2004.

c) Características biológicas de las aguas residuales

El componente biológico es básico en las aguas residuales, aunque para efectos de esta investigación no es relevante, se explicará de manera sintetizada los aspectos importantes acerca del tema. Dentro de estas características es necesario conocer algunos aspectos generales y específicos para establecer la calidad de un agua residual, se puede citar como factores esenciales: grupos principales de microorganismos en el agua, organismos patógenos en el agua, organismos indicadores de la contaminación del agua y métodos utilizados para evaluar la toxicidad de los efluentes.

Los principales organismos encontrados en aguas superficiales y residuales se clasifican como protistas, plantas y animales. La categoría de los protistas incluye a las bacterias, hongos, protozoarios y algas. Las plantas se clasifican en organismos vertebrados e invertebrados (Raudel et. al. 2002).

Los parámetros biológicos se usan como índices de calidad de aguas. Hay muchos seres vivos que se emplean como indicadores de la calidad de un agua, entre ellos se encuentran las bacterias, los protozoos, el fitoplancton, las microfitas, los peces y los macroinvertebrados. Así, según predominen unos organismos u otros, se puede saber el estado de calidad del agua. Además en el caso de un vertido, el contaminante se diluye en el agua y, a veces, se hace difícil su detección, pero el efecto de contaminación causado al ecosistema perdura durante más tiempo.



2.2.2 Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reutilización. Algunos procesos de tratamiento de agua son más fáciles de operar y mantener que otros, pero todos necesitan supervisión y atención regular. Cuando se diseña una planta de tratamiento de aguas, los requerimientos de operación y mantenimiento son factores clave que se deben considerar cuidadosamente.

*** Clasificación de los métodos de tratamientos de las aguas residuales**

El grado de tratamiento necesario puede determinarse comparando las características del agua residual cruda con las exigencias del efluente correspondiente. Los métodos individuales suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios.

a) Operaciones físicas unitarias

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias. En la tabla 2.2 se muestran las operaciones físicas unitarias que suelen utilizarse en un diagrama de flujo de procesos típicos correspondiente al tratamiento del agua residual entre los que se destacan la homogeneización del caudal, el mezclado, la sedimentación y la filtración como aquellas operaciones relevantes, ya que son de uso principal en el proceso de tratamiento, esto debido a que el uso de estas operaciones físicas servirán para el cumplimiento del objetivo principal de esta investigación.



Tabla 2.2 Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas

Operación	Aplicación
Medición del caudal	Control y seguimiento de procesos, informes de descargas.
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie).
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme.
Homogeneización del caudal	Homogeneización del caudal y de las cargas de DBO y de sólidos en suspensión.
Mezclado	Mezclado de productos químicos y gases con el agua residual, mantenimiento de sólidos en suspensión.
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de fangos.
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua.
Filtración	Eliminación de los sólidos en suspensión residuales presentes después del tratamiento químico o biológico.
Micro tamizado	Mismas funciones que la filtración. También la eliminación de las algas de los efluentes de las lagunas de estabilización.

Fuente: Metcalf & Eddy, (1995)

Las operaciones físicas se emplean durante todo el proceso de tratamiento de las aguas residuales, el hecho de utilizar uno o varios de los procesos, dependerá de las características del agua residual a tratar. A continuación se presenta de manera detalla algunos de los procesos físicos los cuales son de interés para el presente estudio:

- **Homogeneización del caudal**

Se realiza en los tratamientos de aguas residuales para tener caudales de tratamiento iguales y concentraciones de contaminantes homogéneas. Esta operación produce una mayor efectividad en los tratamientos posteriores. En aguas residuales industriales es indispensable la homogeneización, puesto que los vertidos son puntuales y las aguas residuales homogenizadas serán de más fácil tratamiento. La ubicación de los homogeneizadores en el proceso depende del tipo de planta que se tenga pero, de forma general, se colocan entre el desarenador y el tratamiento primario. En algunos casos puede ser interesante situarlos entre el tratamiento primario y el secundario (Fonfría y Ribas, 2003).



Las principales ventajas que produce la homogeneización de los caudales son las siguientes:

1. Mejora del tratamiento biológico, ya que eliminan o reducen las cargas de choque, se diluyen las sustancias inhibitoras y se consigue estabilizar el pH.
2. Mejora de la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar con cargas de sólidos constantes.
3. Reducción de las superficies necesarias para la filtración del efluente, mejora de los rendimientos de los filtros y posibilidad de conseguir ciclos de lavado más uniformes.

▪ Mezclado

Es una operación unitaria importante en muchas fases del tratamiento de aguas residuales, se utiliza cuando sea necesario que una sustancia determinada se integre totalmente con otra. Debe realizarse el mezclado en la precipitación química, en procesos biológicos para mezclar el aire con los fangos activados, en el proceso de desinfección se usa para mezclar las aguas de los tratamientos con el cloro. En los procesos de ingeniería sanitaria, el mezclado tiene, generalmente, lugar en el régimen de flujo turbulento donde predominan las fuerzas de inercia, cuanto más alta sea la velocidad y mayor la turbulencia, tanto más eficaz será el mezclado. (Fonfría y Ribas, 2003).

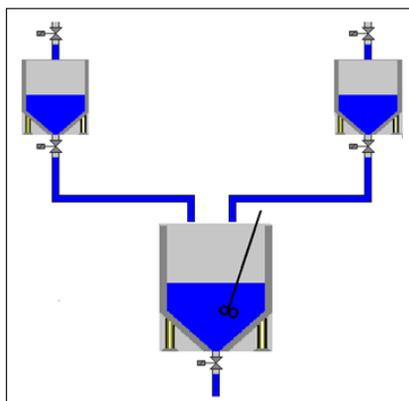


Figura 2.5. Proceso de mezclado
Fuente: Seoáñez, 2004.

El mezclado tiene lugar mediante el uso de impulsores giratorios como paletas, turbinas y hélices; gases como en una aireación por difusión y bobinas de chorro de aire y agua. En la figura



2.5 se muestra un ejemplo de un proceso de mezclado en una unidad de tratamiento, allí dos sustancias se unen en una sola unidad física y son homogeneizadas mediante un procedimiento mecánico con paletas.

▪ Filtración

La filtración es una operación que consiste en hacer pasar un líquido que contiene materia en suspensión a través de un medio poroso o filtro, que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, quedando éstas retenidas en el mismo, este procedimiento se puede observar en la figura 2.6. Se emplea en el tratamiento del agua, para eliminar los sólidos presentes en las aguas superficiales, precipitados del ablandamiento del agua con cal y precipitados de hierro y manganeso presentes en muchos suministros de aguas. En el tratamiento de agua residual, la filtración se utiliza para eliminar el flóculo biológico del efluente secundario decantado, precipitados obtenidos después de la coagulación química o tratamiento posterior a éstas.

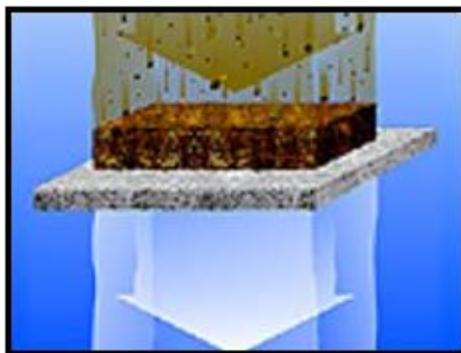


Figura 2.6. Proceso de filtración
Fuente: Seoáñez, 2004.

La filtración incluye el tamizado mecánico, la absorción y filtros de arena lentos. Según el tamaño, el tipo, la profundidad del filtro, la tasa de flujo y las características físicas del agua sin tratar, los filtros pueden extraer los sólidos en suspensión, los patógenos y ciertos productos químicos, sabores y olores. El tamizado y la sedimentación son métodos de tratamiento que preceden útilmente a la filtración para reducir la cantidad de sólidos en suspensión que entran en la fase de filtración. Esto aumenta el período en el cual el filtro puede operar antes de que necesite limpieza y sustitución (Seoáñez, 2004).

En los procesos de filtración se emplean cuatro tipos de material filtrante: filtros granulares como arena o carbón triturado, láminas filtrantes de papel o filtros trenzados de tejidos

y redes de alambre, filtros rígidos y filtros compuestos de membranas semipermeables o penetrables. La filtración de suspensiones es una de las aplicaciones más conocidas del flujo de fluidos a través de un medio filtrante. En esta operación, las partículas suspendidas en el fluido, son retenidas en un medio poroso, dejando pasar este último, un fluido sin partículas sólidas. Dependiendo de la aplicación, el objetivo principal puede ser el de recuperar el sólido suspendido en el líquido o bien obtener un filtrado libre de partículas, a fin de disminuir el impacto ambiental de aguas industriales con sólidos residuales (Orozco, 2004)

Una variable importante del proceso de filtración es el sentido del flujo del agua, que implica clasificar los filtros como: flujo descendente, flujo ascendente, flujo mixto, flujo horizontal y flujo radial. En la figura 2.7 se observa un esquema de algunos sentidos de flujos más utilizados en depuración de aguas.

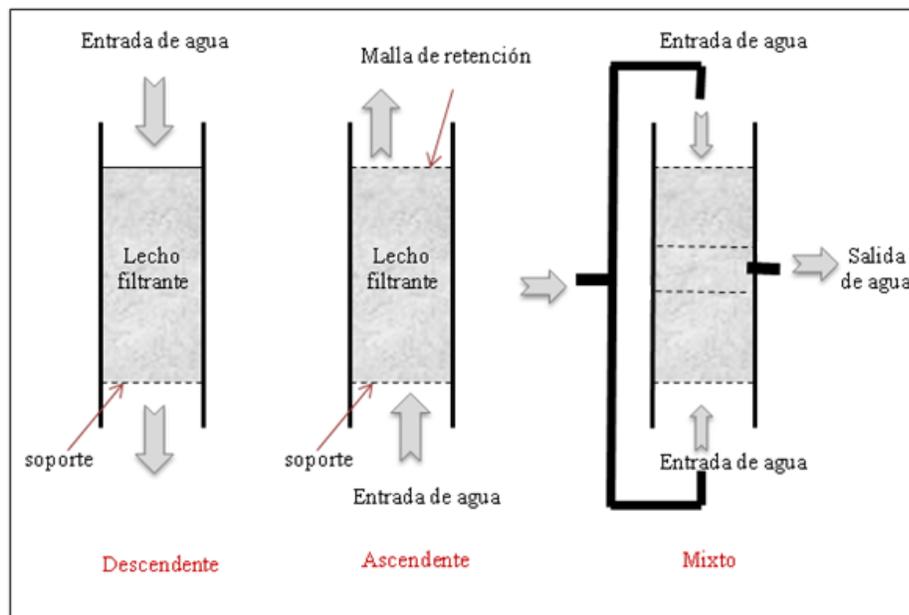


Figura 2.7. Sentido de flujo en lechos filtrantes.

Fuente: Gomella y Guerrée, 1999.

El flujo ascendente necesita del impulso del fluido para circular por el filtro, el flujo descendente es el más usado ya que utiliza las fuerzas de gravedad para su funcionamiento, el flujo mixto se usa más comúnmente para lechos filtrantes de arena ya que el flujo se distribuye automáticamente de forma que las fuerzas ascendentes y descendentes se equilibran (Gomella y Guerrée, 1999).



▪ **Decantación**

La separación de los flóculos originados en el proceso de coagulación-floculación se realiza en una operación denominada sedimentación o decantación, aumentando el tiempo de permanencia del agua en depósitos adecuados, denominados decantadores. Los flóculos sedimentados dan lugar a los fangos (lodos), los cuales son extraídos periódicamente del decantador. Los factores de los que depende el proceso de sedimentación son, tamaño y peso específico de las partículas, concentración de los flóculos, tiempo de retención y temperatura.

Los decantadores utilizados pueden dividirse en estáticos y dinámicos. El término dinámico se utiliza para referirse a decantadores en los que se produce el contacto continuo entre el agua floculada y los fangos, con el fin de acelerar y mejorar la decantación. Para reducir el tamaño de los decantadores y aumentar su eficacia, se ha desarrollado una tecnología la cual consta de depósitos de placas inclinados un cierto ángulo (Weber, 2003).

b) Operaciones químicas unitarias

Los procesos empleados en el tratamiento de las aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas reciben el nombre de procesos químicos unitarios, éstos se llevan a cabo en combinación con las operaciones físicas unitarias descritas anteriormente. A continuación se muestran detalladamente las principales operaciones químicas unitarias relevantes para el desarrollo de esta investigación.

▪ **Precipitación química**

Se basa en la utilización de reacciones químicas para la obtención de productos de muy baja solubilidad. La especie contaminante a eliminar pasa a formar parte de esa sustancia insoluble, que precipita y puede ser separada por sedimentación y filtración es decir, en la precipitación química ocurre la formación de compuestos insolubles de los elementos indeseables contenidos en el agua, facilitando su sedimentación por adición de reactivos. La adición de coagulantes y floculantes, como sulfato de alúmina, cloruro férrico o sulfato ferroso, propician la agregación de pequeñas partículas facilitando su precipitación (Fernández, 2008).

La precipitación química puede ser el principal y único método de depuración de aguas residuales industriales; en otros casos puede ayudar a la operación de sedimentación cuando exista una gran concentración de sólidos disueltos y en suspensión y se puede utilizar como un tratamiento anterior a un proceso biológico.



La aplicación más importante es la precipitación de metales pesados en forma de hidróxidos o sulfuros, precipitación de complejos metálicos, es por ello que estos tipos de precipitación se detallan a continuación.

1) Precipitación de metales pesados

El método usado más común para eliminar los iones solubles del metal es precipitar el ión como hidróxido metálico. El proceso puede ser automatizado y controlado fácilmente por un controlador de pH, elevando el pH de la solución con un material alcalino, donde los compuestos metálicos se convierten en insolubles y son precipitados en la solución.

La figura 2.8 muestra la curva de solubilidad de los metales en relación con el pH. Los metales involucrados en el presente estudio son el cromo y el zinc, ya que éstos se encuentran en las aguas a tratar y es indispensable recurrir a la precipitación de los mismos para su eliminación. Se observa el rango de pH apropiado para cada metal. Los metales a precipitar son anfotéricos y serán redissueltos dentro de una forma compleja, y por ende es conveniente utilizar un rango de pH donde la precipitación sea máxima para los dos metales, de la figura se obtiene que dicho rango está representado entre los valores de 7,5 y 8,0, por lo que se debe tener en cuenta que el pH se encuentre dentro de este rango para llevar a cabo la precipitación.

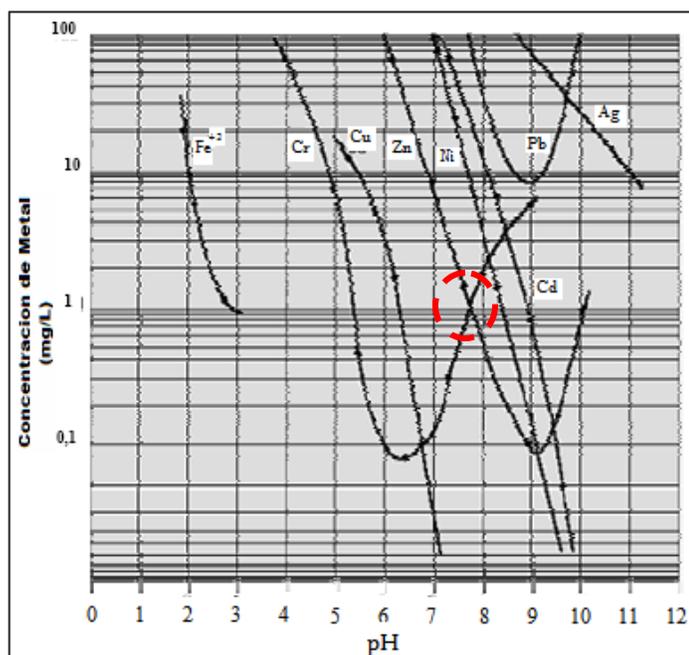
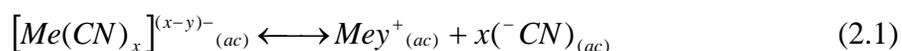


Figura 2.8. Curvas de solubilidad de hidróxidos metálicos
Fuente: Manahan, 2007.



2) Precipitación de complejos metálicos

La precipitación de complejos metálicos representa un tipo de precipitación química en donde se reduce la cantidad del complejo en el agua residual mediante la precipitación del ión metálico luego de la separación del anión. Algunos complejos importantes para este estudio son los de cianuro, los cuales forman el grupo de los cianuros disociables en ácido débil. Este grupo considera a los complejos de cadmio, zinc, cobre y níquel. Los iones cianurados son disociados según el siguiente sistema en equilibrio:



donde:

x: número de iones cianuro

y: estado de oxidación del metal Me

Haciendo uso del metal presente en las aguas residuales estudiadas en la presente investigación, la reacción anterior queda representada de la siguiente manera:



Según el proceso anterior, se obtiene cianuro libre en solución y el catión metálico (Zn^{+2}), el cianuro es oxidado posteriormente por un proceso de oxidación-reducción, mientras los cationes de los complejos inmediatamente precipitan formando los hidróxidos metálicos.

Los principales agentes precipitantes son la cal y la soda cáustica, no obstante, otros reactivos como sulfuros también han sido usados, siendo de aplicación limitada debido a la alta toxicidad del lodo formado. La aplicación del hidróxido de magnesio y óxido de magnesio como agente neutralizante representa una opción en la actualidad. Estos compuestos a base de magnesio tienen varias ventajas, principalmente debido a su impacto mínimo sobre el ambiente, baja toxicidad, baja solubilidad, alta alcalinidad (más que otros álcalis). Para la precipitación de los metales el hidróxido de sodio es el reactivo preferido porque reacciona rápidamente y es muy soluble, el carbonato de sodio es el menos costoso, es un efectivo neutralizador, la reacción es



lenta, se necesitan grandes cantidades y es más difícil de disolver que el hidróxido de sodio. La cantidad de precipitado depende de la concentración de la sal metálica soluble en el efluente y del pH. (Ribeiro et al, 2008).

▪ **Oxido reducción**

Las reacciones de óxido-reducción son aquellas reacciones en las cuales los átomos experimentan cambios del número de oxidación. En ellas hay transferencia de electrones y el proceso de oxidación y reducción se presentan simultáneamente, un átomo se oxida y otro se reduce (Orozco et al, 2004). A continuación se muestran dos ejemplos muy característicos de aplicación de estas reacciones para el tratamiento físico-químico del agua residual:

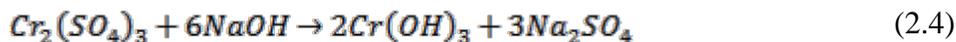
1) Reducción de cromo VI a cromo III

Se emplea la técnica de reducción principalmente con los cromatos y dicromatos residuales que están en forma soluble, procedentes de procesos de cromados de metales. Es necesario, por lo tanto, realizar previamente su transformación mediante la reducción de cromo hexavalente, que es muy tóxico, a cromo trivalente que es menos tóxico y puede ser precipitado como hidróxido de cromo (III), siendo la velocidad de este paso prácticamente instantánea si se realiza a un pH bajo, entre 2 y 4. Bajo la forma trivalente la separación del cromo se puede realizar mediante la técnica de neutralización-precipitación (Orozco, et. al 2004).

La reducción de cromo hexavalente por medio de dióxido de azufre o bisulfito de sodio es preferida por las cantidades pequeñas de lodo producido. Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Posteriormente neutralización con hidróxido de sodio, precipita el hidróxido de cromo III

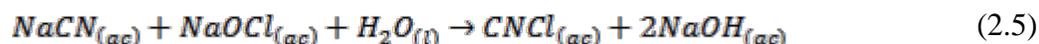


2) Oxidación de cianuro

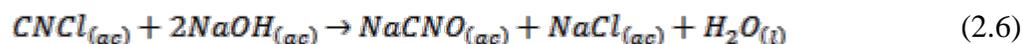
Se utiliza esta técnica principalmente para la destrucción de los cianuros, que proceden básicamente de la industria de galvanizado. Estos compuestos, a alto pH (del orden de 12) y



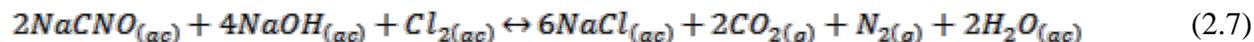
mediante la incorporación de un reactivo oxidante (hipoclorito de sodio, ozono o cloro), se oxidan totalmente a cianatos y posteriormente a dióxido de carbono y nitrógeno. La clorinación alcalina es un proceso químico que consiste en la oxidación y destrucción del cianuro libre y los complejos de cianuro débiles bajo condiciones alcalinas. El primer paso es la destrucción del cianuro utilizando hipoclorito de sodio, y consiste en la oxidación del cianuro a cloruro de cianógeno intermedio como puede apreciarse en las siguientes reacciones: (Díaz y Condori, 2008).



Con el pH elevado de la oxidación, el cloruro de cianógeno intermedio se hidroliza rápidamente a cianato según la siguiente reacción:



El primer paso de la oxidación completa lleva unos minutos a un pH de 10,5. El segundo paso de la oxidación comprende la hidrólisis del cianato a dióxido de carbono y nitrógeno, en presencia de hipoclorito según la siguiente reacción:



La oxidación inicial del cloruro de cianógeno es lenta por debajo de pH 8, por encima de 8.5 la reacción se completa en menos de 30 min. El cloruro de cianógeno es volátil y oloroso, al alcanzar el aire común es transportado y puede ser un molesto lacrimador. Puesto que el cloruro de cianógeno llega a ser mas soluble a medida que el pH aumenta (menos volátil), el índice de conversión del cianuro aumenta dramáticamente al aumentar el pH, por lo que las reacciones 2.4 y 2.5 debe llevarse a cabo a un pH de 11 y la oxidación de la reacción 2.6 es completada en 10 min a un pH de 8.5 (Díaz y Condori, 2008).

▪ Coagulación

La coagulación consiste en la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. Posteriormente estas partículas desestabilizadas se aglomeran primero en microflóculos y posteriormente en aglomerados voluminosos denominados flóculos. Estas

acciones son activadas gracias a un grupo de productos denotados como coagulantes y floculantes (Charama, y Ruiz, 2008).

La coagulación se consigue por la adición de electrolitos, siendo los más utilizados las sales de iones polivalentes, que son mucho más efectivos que los divalentes y éstos más efectivos que los monovalentes. Los principales compuestos químicos usados como coagulantes son las sales de aluminio y las sales de hierro (Weber, 2003).

Los dos mecanismos principales que intervienen en el proceso son:

a) Neutralización de cargas: las cargas proporcionadas por los iones del coagulante neutralizan la carga superficial de los coloides, desestabilizándola y permitiendo su aglomeración en microfloculos.

b) Coagulación por barrido: se lleva a cabo mediante la absorción sobre un precipitado originado por el coagulante, algunos agentes coagulantes producen la formación de un precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$, el cual engloba y arrastra a las partículas coloidales en su precipitación, formando partículas de mayor tamaño. En la siguiente figura se muestra de manera esquemática los procesos anteriormente señalados.

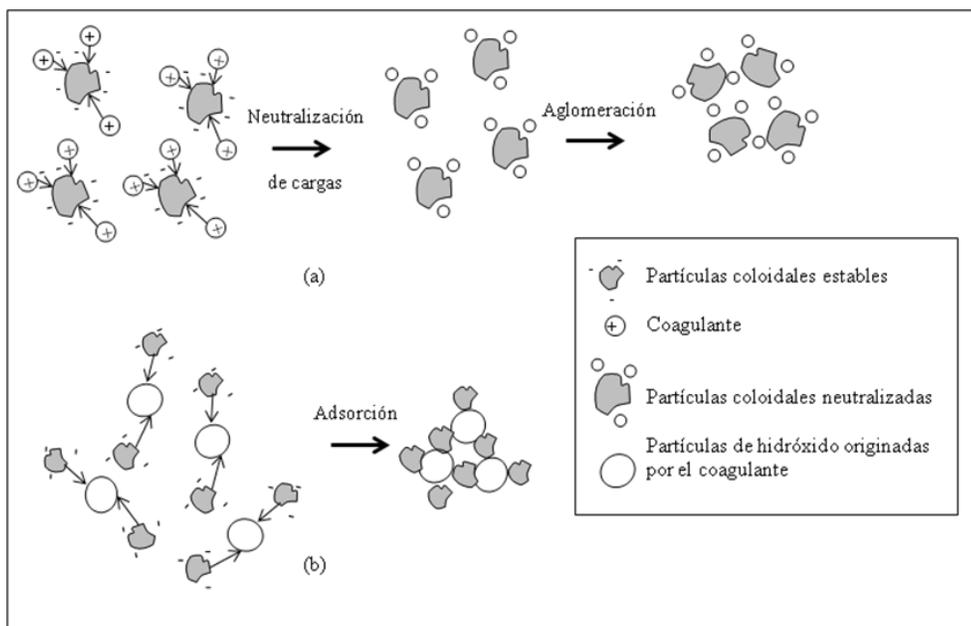


Figura 2.9. Principales mecanismos que intervienen en el proceso de coagulación, (a) Neutralización de cargas, (b) Adsorción y barrido.

Fuente: Orozco, et. al, 2004.



En la figura anterior se muestran dos mecanismos para llevar a cabo la coagulación, en el primer mecanismo se observa la neutralización de las cargas negativas del coloide mediante la acción de coagulantes catiónicos, allí los coloides pasan a ser partículas neutras y se aglomeran más fácilmente, este mecanismo predomina en condiciones de bajo pH y bajas dosis de coagulante, dosis excesivas podrían reestabilizar la partícula coloidal por inversión de cargas, mientras que el segundo mecanismo predomina en condiciones de alto pH y altas dosis de coagulante, allí se realiza una adsorción de los coloides por la acción de las partículas de hidróxido que se originan a partir del coagulante (Orozco, et. al, 2004).

▪ Floculación

Los floculantes son productos químicos que favorecen la agrupación de las partículas coloidales desestabilizadas en partículas de mayor tamaño (floculos), que sedimentan más fácilmente. Los principales compuestos utilizados en la actualidad como floculantes son polielectrolitos orgánicos sintéticos, con cargas eléctricas que hacen de puente entre las partículas, agrupándolas (Aguilar, 2002). En la figura 2.10 se muestra el esquema del mecanismo de la floculación que puede provocar la adición de un polímero sobre los coloides que han sido desestabilizados por la acción del coagulante, en el proceso se originan macrofloculos, formados por el conjunto de coloides coagulados y moléculas de polielectrolito.

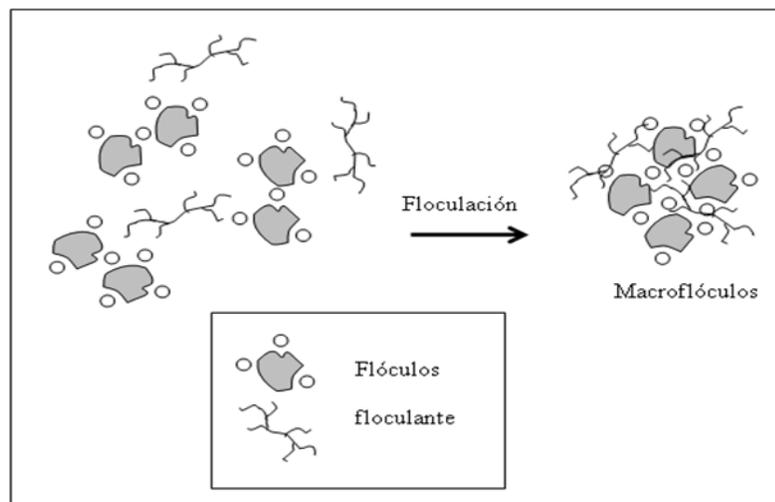


Figura 2.10. Representación esquemática del proceso de floculación

Fuente: Orozco, et. al, 2004.



En la figura anterior se muestra como se lleva a cabo el proceso de floculación, el agente floculante arrastra a los flóculos formados en el proceso de coagulación, los agrupa y forma un floculo de mayor tamaño el cual precipita con mayor facilidad.

Después de una explicación de las bases teóricas necesarias para la comprensión del tratamiento de aguas residuales, se debe conocer el proceso del cual se generan dichas aguas, para ello se muestra a continuación, todo lo relacionado con el proceso de galvanizado de las piezas metálicas.

2.2.3 Galvanizado

El proceso de recubrimiento metálico por vía electrolítica hace referencia a la aplicación de capas delgadas de metales sobre sustratos metálicos mediante electricidad. Los metales para recubrimiento más comunes son: oro, plata, cromo, níquel, cobre, estaño y zinc. Se emplea para proporcionar resistencia contra la corrosión, resistencia contra el uso, conductividad eléctrica o térmica, dureza y decoración.

El recubrimiento se lleva a cabo en tanques en donde se encuentra dispuesto el electrólito, que en el caso específico en la empresa en estudio, es una solución de cianuro de sodio (por ser el cianuro una sustancia que se acompleja fácilmente con los metales), de esta forma el zinc, (ánodo) aporta iones a la solución, ésta contiene así al metal que va a ser depositado en forma aniónica. Una vez la corriente eléctrica es generada por una fuente de energía continua, pasa a través de la solución por medio de dos láminas sumergidas en el líquido, denominadas electrodos (Ortega, 1990).

Como se observa en la figura 2.11, el objeto a galvanizar va dentro de la solución y entre los electrodos (en el trayecto por donde atraviesa la corriente). El electrólito se descompone por efecto de la corriente eléctrica, separándose del mismo las partículas metálicas que se desean fijar sobre el objeto a galvanizar, es decir, el cátodo (objeto a ser recubierto) recibe los iones metálicos de la solución. Así, la galvanización es un fenómeno electroquímico provocado por la acción de una corriente eléctrica en un líquido conductor, produciendo la fijación sobre una pieza de partículas provenientes de dicho líquido.

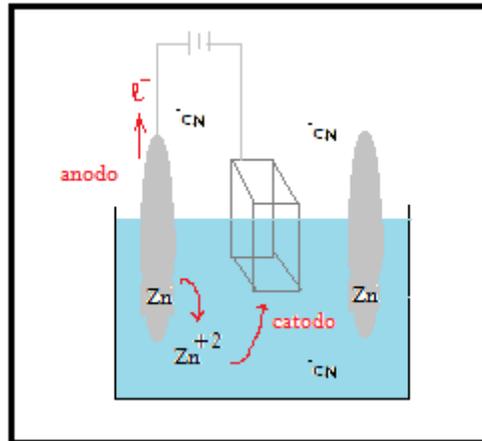


Figura 2.11. Representación esquemática del proceso de galvanizado
Fuente: Ortega, 1990.

Existen varios procesos para recubrir las piezas con el zinc, los principales son:

- Galvanización en caliente
- Galvanización en frío
- Metalizado por pistola
- Zincado electrolítico
- Galvanizado por laminación

Se explicará de manera detallada el zincado electrolítico, ya que este procedimiento es el que utiliza actualmente la empresa en estudio. En los procesos de zincado electrolítico se utilizan los siguientes elementos:

- **Fuente de alimentación:** es un transformador que baja el voltaje de 380 V, 220 V ó 110 V a tensiones menores (de 0,1 a 12 V). Además, estos equipos poseen semiconductores (placas de selenio, diodos y últimamente tiristores) que transforman la corriente alterna en corriente continua, que es la que se utiliza para estos procesos. Esta fuente debe tener en lo posible un sistema de regulación de voltaje.

- **Electrolito:** es una solución de sales metálicas, las cuales servirán para dar inicio al proceso entregando iones metálicos. Los baños de zincado contienen cianuro de sodio, hidróxido de sodio y sosa cáustica (los alcalinos) o cloruro de zinc, cloruro de potasio y ácido



bórico (los ácidos). Además se agregan a los electrolitos sustancias orgánicas como tensoactivos, agentes reductores y abrillantadores, los cuales sirven para mantener una emulsión y para darle un mejor acabado.

- **Ánodos:** es un electrodo en el cual se produce la reacción de oxidación, son placas de metal muy puro, representa el electrodo positivo de una celda electrolítica hacia donde se dirigen los iones negativos, que por esto reciben el nombre de ánodos.

- **Descripción de Proceso de galvanizado**

Según el material a recubrir y las características del recubrimiento, se utilizan diferentes técnicas y materiales. En el caso de los recubrimientos electrolíticos, el mecanismo de recubrimiento consiste en sumergir la superficie a recubrir, previamente limpia, en un electrolito adecuado, que posee los iones del metal a depositar; la pieza a recubrir constituye el cátodo del tanque electrolítico. A continuación se describe los pasos necesarios para llevar a cabo en proceso de galvanizado (Ortega, 1990). Este procedimiento se encuentra representado de manera esquemática en la figura 1.1 del planteamiento del problema.

- ~ **Tratamiento mecánico:** En esta etapa se eliminan las asperezas o defectos de las superficies que pueden influir en el buen recubrimiento de las piezas. Para esto, las piezas se someten a un proceso de pulido por medio de equipos como vibradoras y sistemas de bandas abrasivas.
- ~ **Desengrase:** Este procedimiento elimina las grasas y aceites de la superficie de las piezas provenientes del tratamiento mecánico. Para esto se pueden emplear solventes orgánicos o soluciones alcalinas con poder emulsificador. Luego de desengrasar las piezas se enjuagan en un tanque con agua para evitar el arrastre de las soluciones empleadas a las etapas siguientes.
- ~ **Decapado:** En esta etapa se eliminan las capas de óxido formadas en la superficie de las piezas metálicas debido al contacto entre las mismas y/o la atmósfera. Se realiza el decapado sumergiendo las piezas en una solución que puede ser ácida o alcalina, dependiendo del tipo de proceso. Después del decapado se realiza un enjuague de las piezas para evitar el arrastre de los ácidos o bases hacia las etapas siguientes del proceso.
- ~ **Tratamiento:** Una vez la superficie se encuentra en condiciones favorables para su recubrimiento, se inicia el proceso de tratamiento, es decir el galvanizado propiamente



dicho, tal como fue explicado anteriormente. Luego las piezas se enjuagan con agua para limpiarlas de los residuos procedentes del baño.

- ~ **Pasivado:** Una vez la superficie se encuentra libre de sales, se dan los últimos retoques estéticos por medio de una solución cromatizante en baños que no requieren electricidad.
- ~ **Secado:** Luego de tener el acabado final, las piezas se secan con aire caliente para eliminar el agua residual y se disponen para el embalaje final.

A continuación se describe la herramienta de gestión de calidad necesaria para el desarrollo de los objetivos planteados en la presente investigación.

2.2.4 Herramienta para la gestión de calidad

La solución de problemas se puede enfocar sobre la base de cuatro grandes fases que son: definición del problema, identificación de sus causas y efectos, búsqueda de alternativas de solución y selección de la mejor solución (Acosta, 2005). La gestión de calidad contempla una gran gama de herramientas, una de las cuales y la más importante para este estudio se denomina matriz de selección, esta se encuentra definida a continuación.

▪ Matriz de selección

Las matrices de selección y evaluación de problemas son arreglos de filas y columnas donde las primeras constituyen las alternativas que requieren ser jerarquizadas y las columnas los múltiples criterios que conviene utilizar en la selección. La utilidad del análisis a través de matrices reside en que ayuda a los grupos de trabajo a tomar decisiones más objetivas, cuando se requiere tomarlas sobre la base de criterios múltiples. Los pasos que se siguen para utilizar una matriz de evaluación y selección son los siguientes (Acosta, 2005).

- Definir las alternativas que van a ser jerarquizadas. Estas alternativas pueden estar referidas a problemas, causas o soluciones.
- Definir los criterios de evaluación.



- Establecer el peso para cada uno de los criterios: Todos los criterios no tienen la misma importancia. En este caso, es necesario definir el peso que tienen cada uno de los criterios con los cuales se evalúan las diferentes alternativas.
- Construir la matriz de evaluación: Este paso tiene como objetivo, construir un arreglo de filas y columnas, donde se muestren las alternativas a evaluar, los criterios y el peso de cada uno de los criterios.
- Valorar cada alternativa en relación a cada criterio: En este paso, el objeto es evaluar en que grado las alternativas cumplen con los criterios definidos, utilizando la escala establecida. El resultado, se debe anotar en las casillas correspondientes.
- Puntuación definitiva y jerarquizaron.



CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se definió el tipo de investigación que se adapta mejor al trabajo de grado desarrollado, así como la metodología utilizada y la descripción detallada de cada una de las actividades realizadas, necesarias para el desarrollo de los objetivos propuestos.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Tomando en cuenta la problemática planteada por la empresa BIEMCA en cuanto a encontrar propuestas para la adecuación de los efluentes industriales de la planta de galvanizado, la presente investigación se define como un proyecto factible, debido a que éste consiste en realizar el diseño de la mejor alternativa dirigida a proporcionar soluciones para una problemática ambiental. De acuerdo a U.P.E.L (1998) “un proyecto factible consiste en la elaboración de una propuesta de un modelo operativo viable, o una solución posible a un problema de tipo práctico, para satisfacer necesidades de una institución o grupo social”.

En cuanto a la estrategia metodológica para la obtención de los datos, se considera esta investigación de campo, ya que para proponer las tecnologías que solucionarían eficientemente el problema, fue necesario el estudio del área, incluidos el proceso de operación, las materias primas y los productos usados. Para ello se requirió una recolección minuciosa de toda la información necesaria para cada área que corresponden a la empresa BIEMCA, esto mediante herramientas que permitieron el análisis de la situación actual.

Las etapas de la investigación son:

1. Diagnóstico del proceso productivo y del proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado.
2. Caracterización fisico-química del afluente y del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales del área de galvanizado.



3. Propuesta de posibles tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuarlo a la norma.
4. Verificación a nivel de laboratorio de la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesados y cianuro.
5. Diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 Diagnóstico del proceso productivo y del proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado de la empresa BIEMCA

El propósito de este objetivo se basa en la evaluación del proceso de elaboración de las piezas metálicas (cajetines), y la manera en la que se lleva a cabo el tratamiento de los efluentes generados en el área de galvanizado, con esto se procura conocer el modo de operación de los equipos existentes en la planta para determinar las condiciones de operación, los materiales necesarios para llevar a cabo el proceso y los desechos generados en el área. Para el cumplimiento de este objetivo fue necesario realizar consultas al personal que labora en el área de galvanizado, esto con el fin de obtener la mayor cantidad de información relacionada al proceso de galvanizado de los cajetines, relevante en cuanto a la operación y mantenimiento de los equipos existentes. Para el logro de ese objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

- **Identificación del diagrama de flujo del proceso de galvanizado**

Se estudió el diagrama de flujo correspondiente al área de galvanizado de la empresa (figura 1.1), detallando cada bloque del proceso productivo, verificando las variables involucradas, el procedimiento llevado a cabo para el galvanizado de las piezas y los equipos que se encuentran instalados en el área. Se pudo conocer la distribución de las tuberías que descargan los desechos y la dirección que toman estas aguas permitiendo reconocer de donde se generan y hacia donde se dirigen para ser tratadas.



- **Revisión de los manuales técnicos del proceso de galvanizado y del proceso de tratamiento actual**

Los manuales técnicos del proceso son de importante ayuda para conocer de manera teórica el funcionamiento ideal de los equipos existentes que permite determinar la eficiencia de los equipos. Se encontró mediante este estudio las variables de operación de los equipos del proceso permitiendo determinar fallas e imperfecciones en el mismo cuando se compara el funcionamiento real con el funcionamiento ideal expuesto en dichos manuales. Se pudo determinar también las características de los reactivos usados así como su concentración y pureza.

Mediante una revisión a los manuales de los equipos que conforman el área del tratamiento actual se pudo conocer a fondo las características de los mismos, como el material de construcción de los tanques, el tipo de tubería y los años de servicio, esto para ampliar la información recaudada en consultas y visitas guiadas y así comprender el funcionamiento de los equipos y el proceso de tratamiento de las aguas residuales.

- **Inspección detallada de los equipos que conforman el proceso de galvanizado y de tratamiento de las aguas residuales**

Se realizó un recorrido por las instalaciones de la empresa, se inspeccionó en detalle los equipos que forman parte del proceso de recubrimiento de los cajetines, entre los que se destacan la máquina automática que realiza el proceso de sumergir las gancheras en las respectivas soluciones, el panel de control de dicha máquina, los tanques contenedores de los reactivos y enjuagues, las tuberías de descarga de las aguas residuales y el área donde se encuentran dispuestos los equipos antes mencionados.

Se inspeccionó el área cuando se encontraba en marcha el proceso de galvanizado, con esto se pudo observar las medidas de seguridad adoptadas por los obreros, el modo de operación, así como también, si los equipos presentan fallas que puedan afectar la eficiencia del proceso y el tratamiento.



Se realizaron entrevistas al personal obrero que labora tanto en el área de galvanizado como en el área de tratamiento. Estas entrevistas se llevaron a cabo mediante lo establecido en Acevedo, et. al, 2006. Allí se plantean distintos tipos de entrevista entre ellas se encuentran: según su propósito y según su conducción. Mediante un análisis de cada uno de los conceptos se determinó que la entrevista a llevar a cabo a los operarios es una entrevista semi-libre perteneciente al tipo por conducción. Mediante esta entrevista, el entrevistador tiene trazado un plan de desarrollo, pero con libertad de acción y agilidad. Es por ello que se planifica las posibles preguntas a realizar al personal, las cuales encaminen la entrevista a una serie de preguntas adicionales que se generen en la discusión. Entre algunos de los temas a tratar se tiene el mantenimiento y uso de los equipos, la peligrosidad del trabajador y todo lo relacionado con el tratamiento actual realizado en la empresa.

Adicionalmente se procedió a determinar las variables que conforman el proceso de tratamiento entre ellas se encuentra el volumen de los reactores. Estos poseen una forma compuesta, por lo que no se puede determinar con ecuaciones ya establecidas. Se midió entonces las dimensiones de todos los lados del reactor este procedimiento se realizó de la siguiente manera:

- Se utilizó un metro de cinta metálica de 7 m.
- Se colocó el metro de forma de obtener la mejor medida de los lados del reactor, en especial los lados inclinados de difícil acceso.
- Una vez obtenidas las dimensiones se calculó el volumen del reactor.

▪ **Elaboración de los diagramas causa-efecto o Ishikawa**

Para determinar las posibles causas que generan un efecto negativo en el tratamiento del agua, se escogió el método de análisis de causas denominado diagrama de Ishikawa donde se pueden desglosar todas las causas sin ser jerarquizadas y asegurando el entendimiento del problema de manera simple basándose en la información recopilada con los manuales técnicos y las inspecciones realizadas. Las causas se agruparon en categorías diferentes, con esto se



encontró las subcausas del problema. Estas categorías se identificaron en el diagrama de Ishikawa y la construcción del mismo se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se identificó el problema en estudio el cual está relacionado con el aumento en la cantidad de contaminantes a tratar.
- Se colocaron las categorías principales involucradas con el aumento en la cantidad de los contaminantes, en este caso corresponden al método utilizado, el medio ambiente al que está expuesto el proceso, la materia prima utilizada, la mano de obra y la maquinaria.
- Se colocaron las causas y las respectivas subcausas las cuales contribuyen en mayor medida en el aumento de los contaminantes.

Luego de llevar a cabo este procedimiento, se elabora el diagrama de Ishikawa y la forma final se presenta a continuación en la figura 3.1.

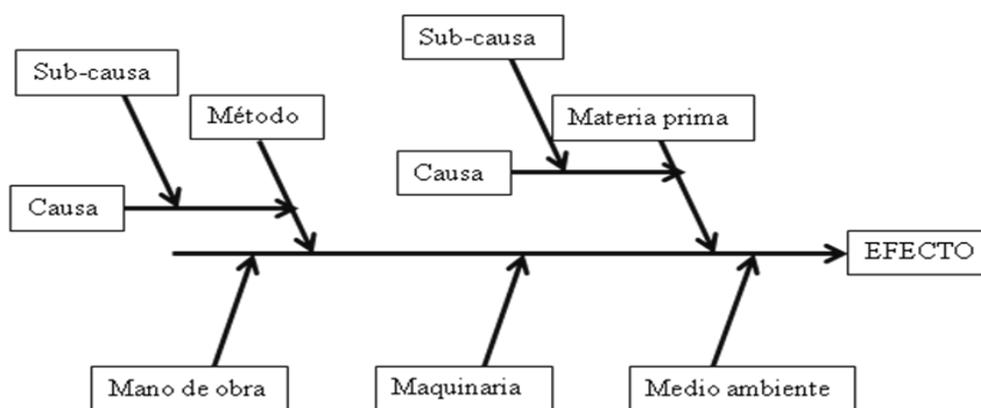


Figura 3.1 Diagrama Ishikawa o causa-efecto

Fuente: Acuña, 2005

Adicional al diagrama elaborado para la detección de las causas más incidentes del proceso de galvanizado, se elaboró un diagrama enfocado a la determinación de los parámetros que interfieren en el tratamiento de las aguas residuales. Para la construcción del diagrama se llevó a cabo el procedimiento anterior, modificando las causas estudiadas y el diagrama de Ishikawa mantiene la estructura de las categorías expuesto en la figura 3.1.



- **Estudio de las posibles causas que interfieren en el proceso de galvanizado**

Luego del estudio mediante el diagrama Ishikawa, de todas las causas que afectan el tratamiento de las aguas procedentes del galvanizado, se realizó el análisis de aquellas causas más incidentes en el aumento de la cantidad de contaminantes. Unos de los procedimientos para encontrar el grado de interferencia de dichas variables fue el estudio del caudal de los tanques de enjuague en el proceso de galvanizado. Se midió el caudal de trabajo, mediante una técnica experimental denominada llenado de tobos (Creus, 2005), allí se tomó el tiempo de llenado del tobo de tres (3) litros de capacidad con un cronómetro, al poseer el tiempo y el volumen se puede determinar mediante la ecuación IV (Apéndice A), el caudal de operación.

Para determinar la variación del pH, se midió este parámetro con un papel pH en los tanques de enjuague (figura 1.1), a lo largo de un día de operación, es decir, se tomó el valor de pH al inicio y se repitió este procedimiento cada una hora por 8 horas de operación, estos valores fueron reportados en tablas, se analizó el cambio de pH para cada tanque y se determinó aquellos donde existía un cambio brusco. Posteriormente se graficó estos valores colocando en el eje de las abscisas el tiempo de operación y en el eje de las ordenadas el pH respectivo, esto con el fin de visualizar de mejor manera el cambio de pH ocurrido en los tanques en un día de operación.

3.2.2 Caracterización físico-química del afluente y del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales

Caracterizar fisicoquímicamente el afluente y el efluente, es el paso principal para poder plantear las alternativas de mejora al tratamiento actual, el cual se llevó a cabo mediante un estudio a los análisis de las muestras tanto del afluente como del efluente. Para el desarrollo de este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- **Identificación de los puntos de captación, tipo de muestra y proceso de captación.**

La identificación de los puntos estratégicos para la captación de muestra y el tipo de muestra obtenida, se fijaron a partir de lo establecido en la norma COVENIN VENEZOLANA 2709:2002, “Guía para las técnicas de muestreo, aguas naturales, industriales y residuales.”



Mediante lo señalado en dicha norma, se determinó los puntos de captación de muestras y éstas se clasificaron en instantáneas y compuestas. Se obtuvo la modalidad de captación entre manual y automática. Se determinó los puntos indispensables a ser muestreados, estos puntos representaron las características globales del agua del proceso. Las muestras se captaron en sitios fijos, tomando en cuenta que el objetivo del muestreo es obtener una muestra representativa de las características del agua a tratar, los periodos de producción y la facilidad de acceso, cada situación debe manejarse de manera individual. Como en este objetivo se trata de un sistema de tratamiento, la norma COVENIN 2709:2002, establece que es necesario evaluar las características y el flujo de entrada y salida. Esta evaluación permite determinar la eficiencia del sistema y el cumplimiento de las normas ambientales.

A partir de la información anterior, se tomó una muestra para el afluente que descarga en el tanque 1 (figura 1.2), esta muestra está compuesta por 1 L de agua residual, para completar esta cantidad, se tomó 250 mL de agua cada una hora, de la misma manera se realizó con el afluente del tanque 2 (figura 1.2), tomando de igual forma 1 L de solución. Estas muestras se tomaron en envases de vidrio, limpios y secos, se taparon y se distribuyeron al laboratorio especializado para realizar los análisis fisicoquímicos respectivos. Para el efluente, se recogió muestras a la descarga de los reactores, se captó aproximadamente 1 L de muestra en envases de vidrio, se midió temperatura con un termómetro y pH con un pH-metro.

- **Solicitud a el departamento de higiene y seguridad industrial la elaboración de los análisis de las muestras de los efluentes.**

Se solicitó la elaboración de los análisis respectivos a las muestras de los efluentes siguiendo las especificaciones anteriores de toma de muestras. Estos análisis deben contemplar las propiedades físicas y químicas como pH, temperatura, turbidez y la concentración de los contaminantes presentes en el agua residual, cromo total, cianuro total, zinc, sulfuro, cloruros, DBO, DQO, sólidos totales, disueltos y sedimentables, grasas y aceites. Los análisis correspondientes se realizaron mediante lo establecido en “Standard Methods for the examination of wáter and wastewaster, 1992”.



▪ **Revisión y estudio de los resultados de los análisis realizados por el laboratorio**

Para llevar a cabo esta actividad, se determinó principalmente la norma a usar referente a las características de los efluentes líquidos a descargar. La gaceta oficial extraordinaria N° 5305 del decreto 3219, (1999) de las normas para la clasificación y el control de calidad de las aguas en la cuenca del lago de Valencia, establece la cantidad máxima de cada contaminante que puede ser descargado. Mediante lo señalado en dicha norma se determinó cuales de los parámetros analizados se encuentran fuera de los niveles máximos permisibles.

Se tomó los resultados de los análisis realizados por un laboratorio especializado y se comparó uno a uno los parámetros, con los permisibles en el decreto ambiental y mediante esta comparación se determinó cuales sobrepasan los límites. La revisión de los análisis de los afluentes permitió determinar la concentración inicial de cada contaminante y así obtener el porcentaje de remoción alcanzado por el tratamiento actual y de esta manera, la eficiencia del proceso de tratamiento actual.

3.2.3 Propuesta de tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuar a la norma la concentración de los contaminantes.

El propósito de este objetivo es plantear, en base a los objetivos anteriores, posibles tecnologías que permitan adecuar a la norma ambiental, [decreto 3219, (1999)] la concentración de los contaminantes presentes en el agua residual a tratar. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

▪ **Recopilación del material bibliográfico**

Una vez obtenidas las características fisicoquímicas de los efluentes a tratar, se procedió a estudiar las tecnologías existentes, así de esta manera seleccionar la más adecuada para el tratamiento de los mismos y garantizar que sean desechados bajo las normas ambientales correspondientes. Para la selección de las tecnologías a proponer, se debe contar con la bibliografía adecuada, la cual contenga la información necesaria acerca del proceso de galvanizado y del tratamiento adecuado a los efluentes generados en dicha área.



La información recolectada fue extraída de libros e informes especializados en tratamiento de aguas residuales, se realizó una investigación en revistas encontradas en línea y revisión a las normas COVENIN para poseer una visión de los valores en la cantidad de los contaminantes a los que se desea disminuir los actuales, y decretos necesarios para el cumplimiento del objetivo de esta investigación.

▪ **Selección de las mejores alternativas de tratamiento de aguas residuales**

Para llevar a cabo la selección de las mejores alternativas para la adecuación de las aguas residuales, se utilizó principalmente las comparaciones existentes entre cada método y por ende el estudio de las ventajas y desventajas que acarrearán el hecho de usar las tecnologías. En algunos casos se realizó netamente comparaciones entre las ventajas y desventajas y en otras ocasiones con ayuda de las características de cada tecnología se realizaron matrices de selección.

– **Tratamiento de las aguas residuales contenidas en el tanque I**

Mediante el estudio de los análisis realizados a los afluentes, se obtuvo los contaminantes encontrados en las aguas correspondientes al tanque I. A partir de esto se llevó a cabo la propuesta de las tecnologías para adecuar las aguas. La reducción del cromo hexavalente a su forma trivalente constituye el primer paso para el tratamiento, se estudió entonces el uso de diferentes agentes oxidantes entre éstos se encuentran el dióxido de azufre gas y el bisulfito de sodio. Una vez obtenidas todas las características de cada reactivo se realizó una tabla comparativa entre sus ventajas y desventajas y a partir de ello se determinó el reactivo a usar para la reducción del cromo VI a cromo III.

Luego de escoger el agente reductor, se propone verificar a nivel de laboratorio si el reactivo escogido cumple con lo esperado en cuanto a la reducción del cromo hexavalente y a su vez determinar la dosificación del mismo y todas las variables adicionales.

Una vez encontrada la tecnología para la reducción del cromo, se procedió a determinar los agentes precipitantes a implantar para llevar a cabo la precipitación del cromo trivalente y el zinc. Para esto, se realizó de igual manera una tabla comparativa entre las ventajas y desventajas de cada agente entre los cuales se tienen el hidróxido de sodio, el carbonato de sodio y el



hidróxido de calcio. Con el fin de encontrar el mejor agente precipitante se propone realizar una prueba de jarras donde se obtenga de manera mas precisa cual de los tres reactivos nombrados proporciona la mayor disminución en la concentración de los contaminantes y a su vez la dosificación del mismo.

– **Tratamiento de las aguas residuales contenidas en el tanque II**

La propuesta para el tratamiento de las aguas contenidas en el tanque II vino dada por los resultados de los análisis realizados a los afluentes correspondientes al tanque en estudio. Esto proporcionó una mayor información respecto al método a usar. El objetivo fundamental en este apartado es la oxidación del cianuro total encontrado en las aguas a tratar. Se propone mediante lo establecido en la bibliografía el uso de dos agentes oxidantes en este caso el hipoclorito de sodio y el ozono. Seguidamente se realizó una tabla comparativa de las ventajas y desventajas que cada uno de los reactivos posee en relación a la oxidación del cianuro. Mediante esta tabla se determinó el mejor agente oxidante y se propone realizar ensayos de laboratorio para verificación.

– **Tratamiento de fangos**

En base a las características de los desechos existentes y del estudio de cada una de las tecnologías seleccionadas, se aplicó el método de los factores determinantes (matriz de selección), el cual permite conocer la alternativa más factible, en función de la ponderación que se le asigne a cada variable. El método de las matrices de selección, consiste en la elaboración de una matriz en donde se encuentran los factores o variables que afectan de manera general las tecnologías propuestas.

• **Selección de las variables de estudio en cada tecnología**

Se identifican las variables más relevantes que inciden mayoritariamente en cada una de las tecnologías, las cuales son el costo de implantación, facilidad de mantenimiento, porcentaje de sequedad, operatividad y espacio requerido, la operatividad, costo asociado, espacio requerido, los cuales serán detallados en el capítulo IV, para cada uno de estos factores se fijaron niveles, en la tabla 3.1 se muestra la interpretación de cada uno de los niveles.



Tabla 3.1 Criterios para la selección de los niveles de cada variable

Nivel	Significado	Interpretación respecto a la tecnología
0	Deficiente	Alto costo de implantación/ difícil mantenimiento/ muy bajo porcentaje de sequedad/ difícil o peligroso de operar/gran espacio requerido
3	Regular	considerable costo de implantación/ mantenimiento poco sencillo/ porcentaje de sequedad condicionado/ operación poco sencilla y segura/ mucho espacio requerido
6	Bueno	Mediano costo de implantación/ mantenimiento sencillo/ mediano porcentaje de sequedad/ fácil de operar/ mediano espacio requerido
9	Excelente	Bajo costo de implantación/ fácil mantenimiento/ alto porcentaje de sequedad/ muy fácil de operar/ poco espacio requerido

Una vez denominada la escala de puntuación que se puede asignar a cada variable de cada tecnología dependiendo de las ventajas y desventajas, se procedió a ponderar cada variable a estudiar de acuerdo a la importancia que ésta presenta para la selección. Este porcentaje fue distribuido de manera que la sumatoria represente un cien por ciento. Una vez ponderada cada variable, se realizó la multiplicación de la calificación obtenida con el porcentaje de importancia de cada variable, de allí al sumar cada valor obtenido, se selecciona la tecnología o conjunto de estas en las cuales se observa la puntuación más alta.

3.2.4 Verificación a nivel de laboratorio de la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesados y cianuro

Una vez encontradas las tecnologías propuestas para la adecuación en la cantidad de los contaminantes presentes en las aguas residuales, se prosiguió a determinar a nivel de laboratorio la efectividad de operación de dichas tecnologías y la eficacia que éstas poseen en el tratamiento. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- **Reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente**

Los potenciales de oxido-reducción cambian bruscamente al agotarse la especie reductora. En consecuencia, la dosificación del agente reductor se realizará manteniendo el potencial de



oxido-reducción que refleje la totalidad de conversión de cromo hexavalente a trivalente, éste valor se encuentra entre 200 y 300 mV (Sainz, 2005)

Para llevar a cabo la reducción de cromo se utilizó como reactivo bisulfito de sodio. A nivel de laboratorio se procedió a determinar las cantidades óptimas de reactivo a añadir para obtener la mayor disminución en la concentración de cromo total. Para obtener los resultados se realizaron los siguientes pasos:

- Se colocó una muestra de 500 mL de solución a analizar en tres beakers identificados como A₁, A₂ y A₃.
- Se midió el pH con un pH-metro.
- Se agregó ácido sulfúrico para disminuir el pH a 2,5.
- Se agregó bisulfito de sodio en cantidades diferentes a cada beaker (1,5- 2,5 y 3 mL respectivamente), de manera de alcanzar un potencial de oxido reducción de entre 200 y 300 mV
- Posteriormente se comparó el cambio de color de la solución de un color amarillo intenso a un color amarillo claro.
- Se escogió la dosis de bisulfito de sodio mediante el análisis del cambio en la coloración.

▪ Prueba de jarras

Una de las propuestas para la adecuación del agua residual es la precipitación de los metales como hidróxidos, el zinc como Zn(OH)₂ y el cromo como Cr(OH)₃, éstos tienen propiedades anfotéricas, por lo que se debe verificar experimentalmente y determinar por medio de pruebas de jarras, la dosificación de los reactivos, el pH y el tiempo de agitación necesarios para la mayor precipitación de los hidróxidos metálicos antes mencionados. A continuación se realizó las pruebas experimentales utilizando dos reactivos de precipitación diferentes soda cáustica y cal.



Para realizar la prueba de jarras usando soda cáustica (NaOH) se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Se tomó tres (3) beakers y se identificaron como T_{1A}, T_{1B} y T_{1C}.
- Se agregó la muestra a tratar hasta completar 500 mL.
- Se colocó cada beaker en el floculador, éste se colocó a 100 rpm.
- Posteriormente se midió el pH con un pH-metro.
- Se agregó a cada beaker cantidades diferentes de soda cáustica (0,5- 1,8 y 2,5) mL respectivamente, para alcanzar un pH que se encontrara entre el rango óptimo de precipitación (6-9).
- Se dejó en agitación por 10 min.
- Se le adicionó a cada beaker una cantidad constante de arpol (0,2 mL) como agente floculante.
- Se disminuyó la velocidad de agitación a 30 rpm.
- Se dejó en agitación por 10 min.
- Se apagó el floculador y se dejó decantar por 30 min.
- Posteriormente se filtró la solución y se les realizó la prueba correspondiente a cromo total y zinc total.
- Se pesó el precipitado, para ello se secó el papel filtrante en un horno, se colocó en el desecador, luego de unos minutos se pesó el papel filtrante y mediante una comparación con el peso inicial del filtro, se obtuvo la cantidad de precipitado.

Luego de los análisis se determinó el beaker que contenía la solución con la menor cantidad en concentración de cromo y zinc. Se realizó una segunda prueba de jarras dejando la cantidad de soda cáustica constante y variando la cantidad de arpol.

Con el objetivo de realizar una segunda prueba de jarras se identificaron tres nuevos beakers como T_{1D}, T_{1E} y T_{1F}. Se colocaron en el floculador a 100 rpm y se llevó a cabo el mismo procedimiento realizado a T_{1A}, T_{1B} y T_{1C}. Luego de realizar los análisis correspondientes para determinación de cromo y zinc, se encontró las cantidades de reactivos a usar y el pH óptimo de reacción. A continuación se muestra (figura 3.2) de manera esquemática el procedimiento anterior.

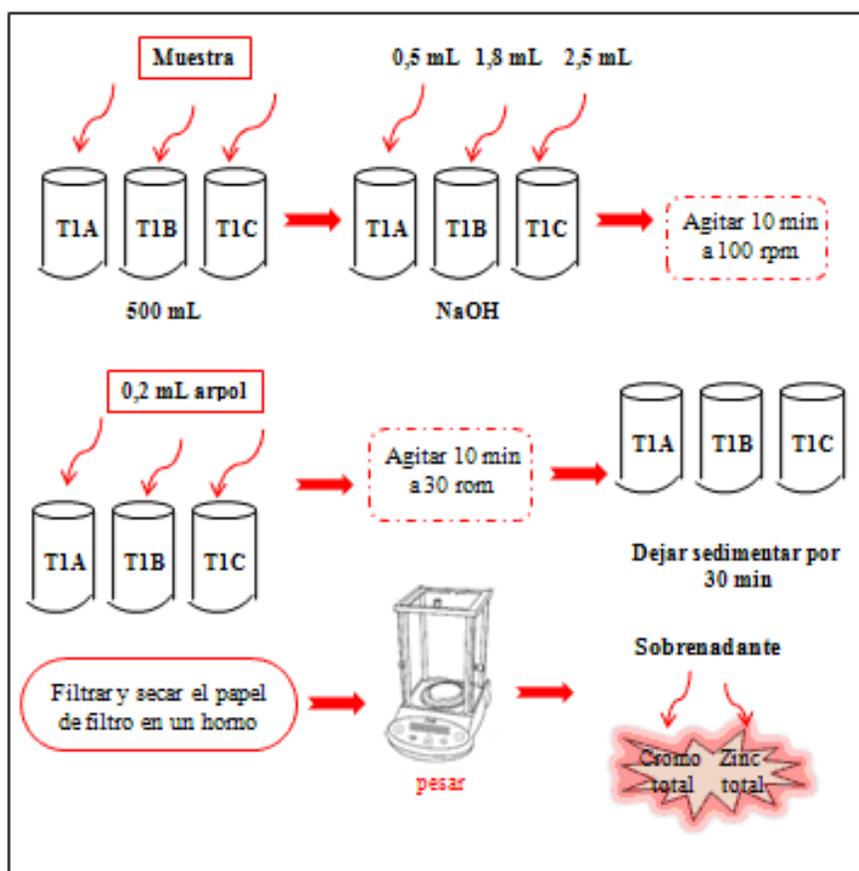


Figura 3.2. Esquema representativo de la prueba de jarras realizada a las aguas residuales provenientes del área de galvanizado de la empresa BIEMCA utilizando NaOH.

Una de las propuestas de mejora viene asociada al hecho de sustituir el agente precipitante por otro reactivo. Para ello se realizó una prueba de jarras con el fin de determinar la eficiencia del uso de otro agente precipitante (cal). Se siguió el mismo procedimiento para realizar la prueba de jarras anterior.



▪ **Determinación de la concentración de cromo**

La determinación de la concentración de cromo se realizó en cada uno de los beakers tratados en la prueba de jarras utilizando soda cáustica y cal. Se siguió el procedimiento expuesto en el “Standard Methods for the examination of wáter and wastewaster, 1992”. Los pasos llevados a cabo fueron:

- Se utilizó ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,2 N y un pH-metro para ajustar la solución a pH 1,0 \pm 0,3.
- Se transfirió la solución a un matraz volumétrico.
- Se diluyó hasta 100 mL y se mezcló.
- Posteriormente se añadió 2,0 mL de solución de difenicarbazida.
- Se mezcló y se dejó reposar 10 min.
- Se transfirió una porción a una célula de absorción de 1 cm
- Se midió la absorbancia a 540 nm
- Se utilizó agua destilada como referencia
- Se determinó la concentración de cromo a partir de la absorbancia por referencia a la curva de calibración.

▪ **Determinación de la concentración de Zinc**

Por medio de lo expuesto en el “Standard Methods for the examination of wáter and wastewaster, 1992”. Se determinó la concentración de Zinc existente en los beakers provenientes de las pruebas de jarras. Se utilizó el método colorimétrico en donde se obtuvo la absorbancia de las soluciones, posteriormente se determinó la concentración en base a lo expuesto en la curva de calibración respectiva. Para llevar a cabo este procedimiento se realizaron los siguientes pasos:

- Se tomó una alícuota de 50,0 mL del sobrenadante.



- Se añadió 1 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, se mezcló cuidadosamente, se filtró y se ajustó el pH a 7 con soda cáustica (NaOH) 6 N.
- Se enfrió las muestras a 25 °C.
- Se agregó 0,5 g de ascorbato sódico, 5 mL de solución tampón, 2,0 mL de solución de KCN y 3 mL de solución de Zincón.
- Se llevó con una pipeta 20,0 mL de la solución anterior a un matraz erlenmeyer limpio de 50,0 mL
- Se añadió 1 mL de ciclohexanona.
- Se agitó durante 10 s.
- Se transfirió la solución a una célula de muestra limpia.
- Se utilizó solución sin ciclohexanona para poner a cero el colorímetro.
- Se determinó la absorbancia de las soluciones problemas.
- A partir de la curva de calibración se determinó la concentración de zinc de la muestra.

Los análisis anteriores se realizaron para determinar la concentración final tanto de cromo total como de zinc total.

▪ Oxidación de cianuro

Para llevar a cabo la oxidación del cianuro, se utilizó como reactivo hipoclorito de sodio. A nivel de laboratorio se procedió a determinar las cantidades óptimas de reactivo a añadir para obtener la mayor disminución en la concentración de cianuro. Para obtener los resultados se realizaron los siguientes pasos:

- Se colocó una muestra de 500 mL de solución a analizar en tres beakers identificados como B₁, B₂ y B₃.
- Se midió el pH con un pH-metro.



- Se agregó soda cáustica para elevar el pH a 12
- Se agregó hipoclorito de sodio en cantidades diferentes a cada beaker (1,0- 1,5- 1,8 mL respectivamente), de manera de alcanzar un potencial de oxidación-reducción cercano a 300 mV (Sainz, 2005).
- Posteriormente se realizó a cada beaker el análisis correspondiente para la determinación de cianuro por lo establecido en el Standard Methods for the examination of water and wastewater, 1992 (Apéndice C), esto para obtener la dosificación de hipoclorito de sodio que permitirá reducir a la norma la concentración de cianuro.

3.2.5 Diseño de un sistema de tratamiento a las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada

Después de seleccionar las alternativas de tratamiento a los efluentes del área de galvanizado y verificar experimentalmente la eficiencia de la tecnología seleccionada, se procedió a aplicar el diseño y operación de las unidades de tratamiento que forman parte de la alternativa escogida. Para ello se realizaron las siguientes actividades y procedimientos que den cumplimiento al desarrollo de este objetivo.

▪ Descripción de las variables relacionadas al diseño e implementación de la propuesta

Estas variables corresponden a la implementación del procedimiento a llevar a cabo para la adecuación del efluente, mediante el cual se proporcione una mejora al tratamiento actual que permita disminuir la concentración de los parámetros según lo establece la norma, estas variables se describen a continuación:

- Reactivos a usar y dosificación

Una vez obtenida la información bibliográfica acerca de todos los reactivos posibles comúnmente usados para tratamientos de efluentes en el área de galvanoplastia y de los resultados de las pruebas de jarras realizadas, se determinó con ayuda del personal de la empresa, aquellos reactivos a dosificar que permitan adecuar al efluente de manera eficiente y que a su vez no generen gastos excesivos a la empresa, ni produzcan riesgos a los operarios.



La dosificación de los reactivos a usar se encontró como resultado de la prueba de jarras del objetivo anterior. La cantidad de estos reactivos debe ser referida al volumen a tratar en la empresa el cual está compuesto por 1500 L de agua. Se realizó una proyección de las cantidades encontradas en las pruebas de jarras y se llevó a los valores correspondientes a dosificar en la empresa. Luego de obtener las cantidades de reactivo que se necesitan añadir al reactor batch de la empresa, se procedió a realizar a escala el tratamiento llevado a cabo en las pruebas de jarras, para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- Se le agregó 750 mL de ácido sulfúrico al reactor batch de 1500 L hasta pH 2,5.
- Se añadió 7,5 L de bisulfito de sodio y se dejó en agitación por 20 min.
- Luego se agregó 7,5 L de soda cáustica hasta obtener un pH de 8.6
- Se dejó en agitación 10 min y se agregó 750 mL de arpol
- Se dejó nuevamente en agitación, al transcurrir 5 min, se apagó la agitación y se dejó sedimentar por 20 min.

Se tomó del sobrenadante una muestra del agua en envases de plástico, limpios y secos. Se realizó con ayuda de un equipo colorimétrico portátil el cual posee la empresa, la determinación de la cantidad de cromo total existente en el agua tratada.



Figura 3.3. Fotografía del kit colorimétrico portátil de la empresa.



Las características del equipo de la figura 3.2 se encontraban en los manuales de operación del kit y en los datos dispuestos en el mismo equipo. Methode kolorimetrisch chrom-test 14756 marca Merck son las especificaciones del equipo el cual posee un rango de medición de 0,1 – 10,0 ppm. Este equipo consta de dos reactivos indicadores denominados Cr-1A y Cr-2A. Se tomó dos tubos de ensayo y se identificaron como T_1 y T_2 . Al tubo de ensayo T_2 se le agregó una cucharada raza de reactivo Cr-1A y tres gotas del reactivo Cr-2A, se agitó para homogeneizar la mezcla. Se agregó a T_1 y T_2 6 mL del agua a analizar, se dejó reposar 5 min y se observó el cambio de color. Una vez transcurridos los 5 min, se colocaron los tubos de ensayo en el equipo y se colocó la escala colorimétrica de manera de obtener concordancia entre el color obtenido en el tubo de ensayo y el encontrado en la escala. A continuación en la figura 3.4 se muestra la disposición de los tubos de ensayo y de la escala colorimétrica que posee el equipo.

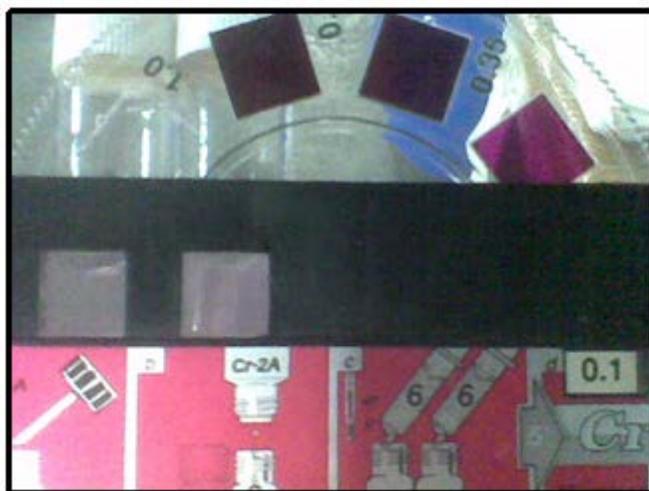


Figura 3.4. Escala colorimétrica con la cual se determina la concentración en ppm de cromo.

Mediante una escala colorimétrica se puede observar la coloración tomada por la muestra y de esta manera se obtuvo la concentración de cromo en ppm contenida en el agua analizada.

▪ **Equipos necesarios para la mejora del tratamiento actual realizado a las aguas residuales del proceso de galvanizado**

A continuación se muestra el procedimiento llevado a cabo para el dimensionamiento y caracterización de los equipos a implementar en el área de tratamiento actual.

- **Medidores de pH y potencial de oxido-reducción**

Se estudió todos los posibles tipos de medidores de pH existentes en el mercado, estos medidores se comparan mediante sus características resaltando, rango de medición, precisión, calibración, compensación de temperatura entre otros. Existen en el mercado medidores que poseen la ventaja de medir tanto pH como temperatura y potencial de oxido reducción, se comparó estos tipos de medidores con aquellos que determinan individualmente las variables correspondientes. Se obtuvo de esta comparación las ventajas y desventajas de cada instrumento y se determinó cual o cuales medidores se instalaran en el proceso de tratamiento de aguas.

- **Diseño de equipos de membrana para eliminación de sólidos**

Para la selección de cualquier proceso de membrana debe considerarse, principalmente, la concentración de sólidos totales y la presencia de compuestos como hierro y aluminio.

Una vez obtenida la información relacionada a los procesos de membrana, se procedió a determinar el proceso que más se adecuara a los requerimientos del sistema. Posteriormente se dimensionó el equipo a instalar. Para adquirir los equipos de membrana en el mercado se requiere de ciertas características, como más relevantes está el caudal de operación y la cantidad de sólidos totales a eliminar. Para la obtención del caudal de operación se realizó un balance de masa y un balance por componente al sistema de membrana (figura 3.5).

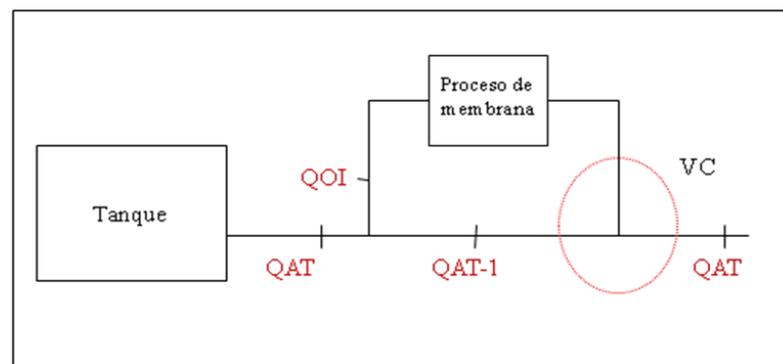


Figura 3.5. Representación esquemática del volumen de control para la instalación del proceso de membrana

La figura 3.5 muestra la distribución tanto del equipo de membrana como del tanque de mezcla. Se observa que existe una bifurcación hacia el proceso de membrana. El punto de unión



de las tuberías encerrado en el círculo representa el volumen de control. Allí se determinará el caudal de operación (QOI), el cual representa la variable de diseño importante para la implantación de cualquier proceso de membrana. El caudal de agua tratada (QAT) y el caudal de agua tratada bifurcada (QAT-1) representan dos parámetros importantes para la obtención del caudal de operación. Esto y la concentración en ppm de sólidos totales tanto en el agua tratada como a la salida del proceso de membrana, representan otros parámetros de gran importancia, los cuales se obtienen de los análisis fisicoquímicos realizados a las aguas.

Mediante el análisis del volumen de control anterior, se obtuvo el caudal a tratar (QOI) requerido para disminuir la cantidad de sólidos totales a un valor menor que 1600 ppm como lo establece la norma.

- Tratamiento de fangos

El diseño para el tratamiento del fango, se basa en la deshidratación o secado del lodo por medio de diferentes tecnologías, se utilizó toda la información bibliográfica necesaria para la escogencia de la mejor alternativa, y los resultados expuestos por la matriz de selección. Teniendo en cuenta variables como costo de implantación, facilidad de mantenimiento, porcentajes de sequedad, operatividad y espacio requerido. Se escogió a partir de toda la información recolectada el tratamiento del fango a realizar tomando en cuenta todos los parámetros antes mencionados.

Una vez obtenida las tecnologías para llevar a cabo el secado de los lodos se procedió a determinar las dimensiones de los equipos a implantar, teniendo en cuenta la cantidad de lodo a tratar.



CAPÍTULO IV

DISCUSIONES

4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de cada objetivo realizado para la propuesta de una alternativa de mejora del tratamiento actual de los efluentes generados en el área de galvanoplastia.

4.1.1 Diagnostico del proceso productivo y del proceso de tratamiento de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanizado de la empresa BIEMCA

El presente objetivo representa el punto de partida de esta investigación ya que se debe conocer como se lleva a cabo el proceso de galvanizado de las piezas y como se realiza el tratamiento actual de los efluentes de dicha área.

▪ Identificación del diagrama de flujo del proceso de galvanizado, revisión de los manuales técnicos e inspección detallada del área de galvanizado.

Se encontró mediante el estudio del diagrama de flujo que el proceso es automático, el procedimiento de galvanizado se lleva a cabo mediante una serie de pasos. En la figura 4.1 se muestra la distribución de los baños y de los tanques de enjuague (T). Se comienza con sumergir las piezas (cajetines) a galvanizar, en un desengrase en caliente con soda cáustica y productos tenso activos (tanque 1-2), luego en un enjuague con agua (tanque 3) para eliminar residuos del desengrase anterior. Posteriormente se lleva a cabo un decapado con ácido clorhídrico al 40% (tanque 4). El decapado se realiza para eliminar las impurezas tales como manchas, contaminantes inorgánicos o herrumbre, de la superficie de las piezas a galvanizar. Inmediatamente después del decapado, se sumergen los cajetines en el tanque 5, allí se enjuagan y se elimina con agua el ácido clorhídrico.

Luego se pasan los cajetines al siguiente tanque donde se realiza un desengrase electrolítico usando soda cáustica y desengrase universal (tanque 6-7). En este baño, se sumergen las piezas, las cuales actúan como cátodos, en una solución alcalina. Una vez terminando el



proceso, se pasan las piezas al tercer enjuague con agua (tanque 8), en este enjuague se elimina cualquier residuo de soda cáustica o desengrase universal encontrado en la superficie de los cajetines.

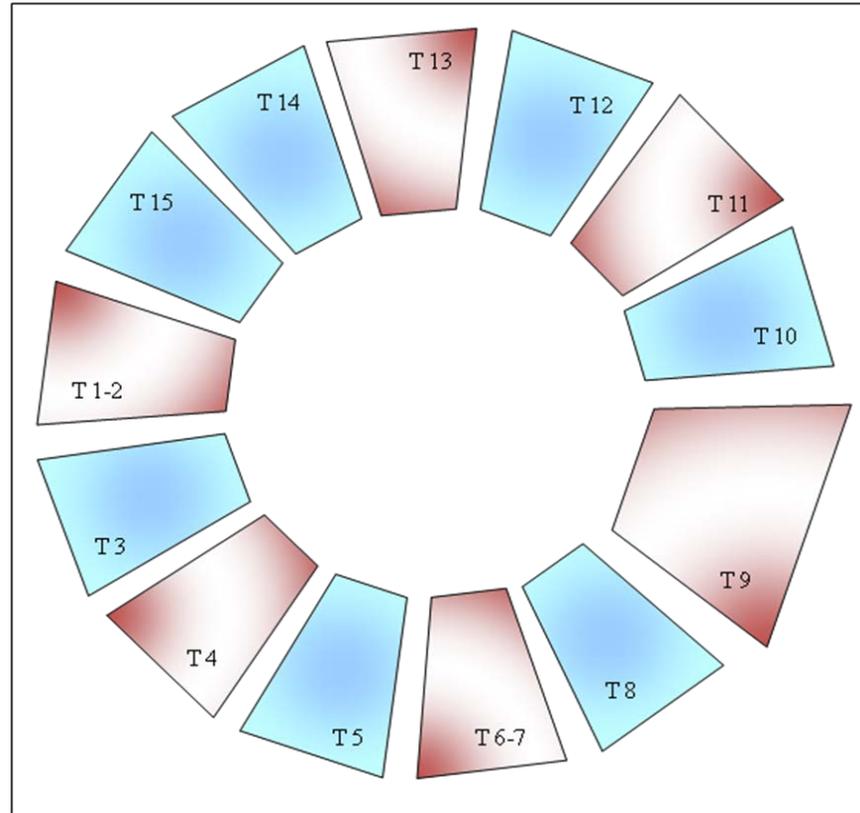


Figura 4.1. Distribución de los baños y los tanques de enjuague (T) en el proceso de galvanizado

Todos los baños anteriores con sus respectivos enjuagues se realizan para acondicionar la superficie de los cajetines. Después de la limpieza completa de la pieza a galvanizar, se someten a un proceso de electrodeposición para obtener las propiedades anticorrosivas y decorativas deseadas.

El proceso de electrodeposición usado en la empresa Bermúdez Industria Electrometalúrgica C.A, se basa en el zincado cianurado, el cual se lleva a cabo en el tanque 9, donde se encuentra dispuesto el electrolito (solución de cianuro de sodio), se utiliza este electrolito por ser el cianuro una sustancia que se acompleja fácilmente con los metales. De esta forma el metal (zinc) correspondiente al ánodo, aporta iones a la solución, la cual contiene entonces el metal que va a ser depositado en forma iónica. El electrolito se descompone por



efecto de la corriente eléctrica separándose del mismo las partículas metálicas que se desean fijar sobre el objeto a galvanizar. Una vez se ha realizado el proceso de zincado, las piezas son sumergidas en el tanque 10 donde se realiza un enjuague con agua para limpiar la superficie de los cajetines de cualquier resto de reactivos del proceso de galvanizado. Luego en el tanque 11 se realiza un decapado fino con ácido nítrico al 3% seguidamente un enjuague con agua (tanque 12).

Posteriormente para incrementar la resistencia a la corrosión, se les somete a un proceso de pasivación crómica o cromatizado, utilizando cromo hexavalente (tanque 13). De aquí en adelante se llevan a cabo dos enjuagues consecutivos (tanque 14 y 15), para eliminar restos de reactivos usados y limpiar la superficie de la pieza galvanizada. Luego de obtener el acabado final, las piezas se secan para eliminar el agua residual y se disponen para el embalaje final.

Los lavados o enjuagues que se realizan a lo largo del proceso, se usan para limpiar las piezas del exceso de reactivo usado en los tanques previos a cada enjuague. Las aguas usadas para cada lavado, son transportadas por medio de tuberías a los tanques de almacenamiento (tanque I y tanque II) y posteriormente se llevan a la planta de tratamiento.

Dependiendo de las características de cada enjuague, las aguas se separan en dos tanques de almacenamiento. En el tanque I se colocan las aguas con características ácidas, éstas son generadas por los tanques 5, 14, 15 (figura 4.1) correspondientes al enjuague del ácido clorhídrico y el enjuague de las sales cromatizantes. En el tanque II se almacenan las aguas que se generan de los enjuagues con características básicas (tanque 3, 8, 10 y 12) que corresponden al lavado del desengrase electrolítico, del galvanizado y del ácido nítrico. Esta agua contiene principalmente cianuro de sodio (NaCN), ya que éste compuesto se encuentra en gran concentración en el tanque de galvanizado. A pesar de que en el tanque II se almacena el enjuague del ácido nítrico, por estar muy diluido, no afecta el pH del agua. La razón por la cual éste no se almacena en el tanque con características ácidas (tanque I) es que el enjuague del ácido nítrico se encuentra después del proceso de galvanizado y allí por medio del arrastre del agua hacia los baños siguientes, se encuentran cantidades altas de cianuro presentes.

De todo el estudio del proceso completo de galvanizado, se obtuvieron los compuestos inorgánicos y metales pesados que están presentes en el afluente, éstos son: ácido clorhídrico (HCl), dicromato de sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cianuro de sodio (NaCN), zinc en solución, ácido nítrico



(HNO₃) y soda cáustica (NaOH). Estos compuestos serán el objeto de estudio para proponer la tecnología que se debe implantar y así adecuar la concentración de dichos contaminantes a los valores que permite el decreto 3219, (1999).

Al realizar la inspección de los equipos presentes en el proceso de galvanizado, se encontró que efectivamente el proceso se realiza de manera automática después de colocar manualmente las gancheras con las piezas a galvanizar. Principalmente en el área se encuentran los tanques de los baños, los cuales poseen una capacidad de 750 L aproximadamente y no se encuentran deteriorados por lo que no presentan fugas de reactivos.

En cuanto a la peligrosidad del proceso, éste no involucra riesgos al operario, mas sin embargo, cuando se refuerza la solución contenida en el tanque donde se realiza el zincado cianurado (tanque 9), el operario está expuesto a riesgos químicos, estos son sustancias cuya presencia en la atmósfera de trabajo puede originar alteraciones en la salud de las personas expuestas. (González, et. al 2006). Estos riesgos están asociados a la toxicidad y peligrosidad de los reactivos usados, a pesar de que la empresa cuenta con un equipo de seguridad completo que ayuda a disminuir el riesgo asociado, se debe instruir al operario de manera más amplia con respecto a la peligrosidad de cada reactivo. La implantación de una cartelera informativa sobre los riesgos asociados a cada reactivo, es la propuesta inicial en esta investigación. A continuación se muestra en la figura 4.2, algunos efectos negativos que pueden encontrarse en los reactivos usados por parte de los operarios que pueden incurrir en la salud y bienestar del mismo.



Figura 4.2. Efectos negativos de algunos reactivos utilizados en el proceso de galvanizado.
Fuente: González, et. al, 2006

Luego de un extenso estudio de los manuales y diagramas del proceso de galvanizado, y de realizar un recorrido por las instalaciones de la empresa cuando se encontraba en marcha el proceso de galvanizado, se inspeccionó el procedimiento realizado por los obreros. Se encontró



que la operación se realiza en gran parte de manera automática. El área de trabajo se divide en cuatro sectores, en el primer sector dos obreros disponen en las gancheras los cajetines a galvanizar, las cuales se encuentran sostenidas en un gancho que gira y se desplaza de manera circular por una corredera automática. En la segunda etapa dos obreros descuelgan las gancheras y las sostienen en los brazos mecánicos de la máquina de galvanizado. En el tercer sector los mismos obreros del sector anterior descuelgan las gancheras con los cajetines ya galvanizados y los llevan al mesón de embalaje. En este cuarto y último sector se colocan las etiquetas correspondientes, se cuentan los cajetines y se colocan en cajas para su distribución.

Lo antes expuesto corresponde al procedimiento de galvanizado, donde se determinaron todas las características relevantes del mismo y las variables involucradas en el proceso. A continuación se evaluó los resultados obtenidos en el estudio del área donde se encuentra instalada la planta de tratamiento actual.

Una forma de obtener información importante del proceso de tratamiento actual de las aguas, es la interacción con el operario, el cual maneja físicamente las variables del proceso. Con entrevistas al operario del área de tratamiento, se verificó el funcionamiento de los equipos.

Se encontró que se realizan mantenimientos preventivos de manera periódica una vez al mes, donde se lleva a cabo la limpieza de los reactores, el acondicionamiento de las bombas y tuberías y una limpieza general del área de trabajo diariamente para eliminar restos de sustancias químicas en los alrededores.

Conocer la manera en la que se lleva a cabo el proceso de tratamiento actual es fundamental para determinar las fallas que están presentes, mediante las cuales no se obtienen los valores en las concentraciones de los contaminantes presentes para adecuarlos a la norma. Esto debido a que si se identifican las fallas, se puede atacar el problema y se obtiene la solución más viable.

El proceso de tratamiento actual es totalmente manual, el operario agrega los reactivos, los cuales se encuentran almacenados cerca del área de tratamiento en contenedores plásticos, directamente a los reactores. En la figura 4.3, se presenta la forma y disposición de los reactores instalados en el área. El material de construcción de los reactores es hierro galvanizado con un



recubrimiento de pintura anticorrosiva, poseen una forma compuesta, rectangular en la parte superior y piramidal en la parte inferior, esta forma característica permite en una misma unidad física la separación de las fases por gravedad.



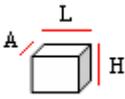
Figura 4.3. Sistema de tratamiento actual instalado en la empresa

Mediante la revisión de los manuales técnicos de los equipos que conforman el área de tratamiento, se encontró que las tuberías de succión de las aguas son de hierro galvanizado de 1", el tiempo de servicio de todos los equipos corresponden a 10 años.

Una variable importante que influye en el tratamiento de las aguas es el volumen del reactor. Para determinar este valor, se realizaron las mediciones correspondientes a las longitudes del reactor, las cuales se encuentran representados en la siguiente tabla (tabla 4.1) se especifica el largo, el alto y el ancho de cada uno de los lados del tanque que corresponde al reactor en estudio. Se encuentran instalados en el área dos tanques, ambos poseen las mismas características y dimensiones.



Tabla 4.1 Dimensiones del reactor

Figura	Largo ($L \pm 0,05$) cm	Alto ($H \pm 0,05$) cm	Ancho ($A \pm 0,05$) cm
	115,00	115,00	115,00
	115,00	120,00	120,00

El procedimiento para el cálculo del volumen del reactor se encuentra detallado en el apéndice A, y el resultado obtenido es: $Vt = (2050 \pm 40)L$. El volumen total del reactor representa una variable importante para el diseño del sistema de tratamiento, ya que ésta especifica el volumen de agua máximo a tratar en cada tanque.

El tanque fue diseñado para contener 2000 L de agua, los cálculos muestran que efectivamente el volumen del reactor es aproximadamente 2050 L con un error de 40 L. el volumen de agua a tratar debe ser menor al volumen total del tanque y este se fijó en 1500 L aproximadamente. Finalmente se obtiene que el caudal de operación a ser tratado en cada tanque es de $2,26 \text{ m}^3/\text{h}$, este valor fue obtenido de manera experimental (apéndice A) correspondiente a un tiempo de llenado de 1500 L en 38 minutos. La determinación del caudal de operación es relevante ya que se debe tener en cuenta la cantidad de agua a tratar en cada batch.

Con el estudio del proceso tanto de galvanizado como del proceso de tratamiento actual se planteó obtener toda la información necesaria para identificar las posibles causas que inciden en el aumento de la concentración de los contaminantes.

Las causas encontradas deben estudiarse y descartarse aquellas que no afecten directamente el problema, es por ello que se debe realizar un estudio mediante herramientas que permitan evaluar los efectos que se producen. A continuación se enfoca de manera detallada la elaboración de dichas herramientas.



▪ **Elaboración del diagrama causa-efecto o Ishikawa**

Una vez realizado el diagnóstico del área de trabajo, se procedió a encontrar las variables más incidentes que interfieren en el tratamiento del agua residual, las cuales no permiten adecuar a la norma la concentración de los contaminantes. Con la ayuda del diagrama de Ishikawa se organizaron las causas involucradas en el problema, las cuales al estar distribuidas por categorías diferentes, permitieron el desarrollo de las posibles soluciones.

Se construyó el diagrama correspondiente a las causas involucradas en el proceso de galvanizado, ya que, en esta área es donde se encuentran la mayor cantidad de variables que producen un aumento en la concentración de los contaminantes. Se organizaron las causas encontradas las cuales se distribuyeron por categorías. En la tabla B.2 (apéndice B) se muestra esta distribución. Se construyó el diagrama de Ishikawa el cual se representa en la figura 4.4 presentada a continuación.

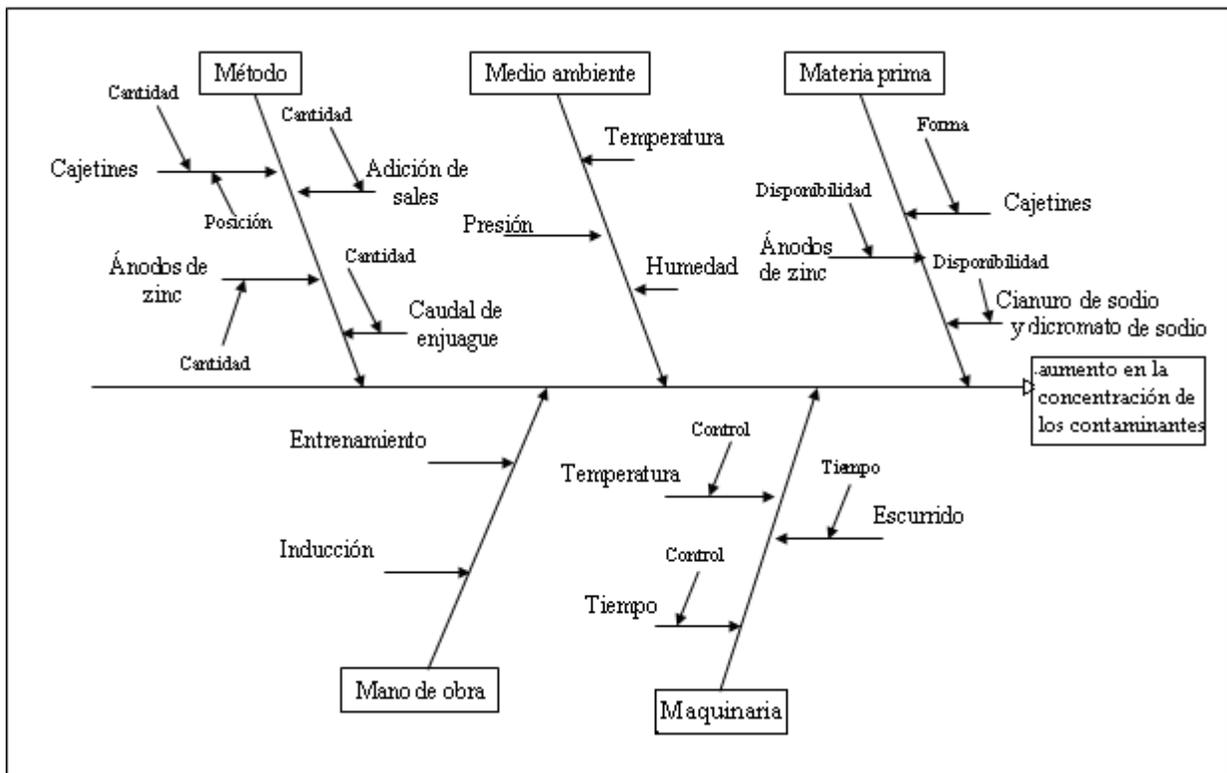


Figura 4.4. Diagrama Ishikawa para el proceso de galvanizado



Se detectaron las causas que incrementan de una u otra manera la generación de desechos electrolíticos. Entre las causas encontradas se tienen:

~ **Método**

Esta categoría representa el procedimiento que se lleva a cabo para la elaboración del galvanizado de los cajetines, donde se contemplan todas las etapas del proceso. Como se puede observar en la figura 4.4, dentro de esta categoría se encuentran la adición de los reactivos químicos usados puntualizando la cantidad de reactivo, la posición y cantidad de las piezas a galvanizar (cajetines) y el caudal en los tanques de enjuague. Siendo ésta una de las principales causas de la generación de desechos, debido a que si el caudal es bajo, el agua de enjuague se satura y se contaminan los baños siguientes, además la concentración del contaminante en dicha agua es alta y afecta su posterior tratamiento. Es decir la concentración de los baños de enjuague debe ser tal que se realice el lavado de las piezas y no se contaminen los baños siguientes, este fenómeno se ve afectado por la variación del pH del agua de lavado.

La cantidad de reactivo para el galvanizado es una causa directa de generación de desechos, sin embargo, en este estudio el análisis en la cantidad de reactivo no es resaltante ya que se debe mejorar el tratamiento actual sin modificar el procedimiento de galvanizado de las piezas.

Es por esta razón que se busca mejorar otras variables que puedan ser manipuladas para adecuar el proceso sin alterar el procedimiento de galvanizado. Se estudia entonces la cantidad y la posición que adoptan los cajetines a ser galvanizados, ésta es una causa que afecta de manera directa el proceso ya que si se disponen muchos cajetines en las gancheras, por poseer éstos una forma hueca y cúbica, por la posición que adoptan, se aumenta la posibilidad de un mayor arrastre a los tanques de enjuagues y a su vez a los tanques siguientes, contribuyendo al aumento de los contaminantes en las aguas, es decir, la cantidad de cajetines galvanizados afecta considerablemente el estado óptimo de los baños debido a que los mismos van perdiendo propiedades a medida que se galvanizan un número mayor de piezas. Esta problemática no puede ser solventada debido a que no se puede cambiar la posición de los cajetines en las gancheras y la



cantidad de piezas a galvanizar viene dada por la cantidad máxima que pueden ser sujetas en las gancheras.

Otra causa directa y la mas importante encontrada en la categoría del método viene dada por la cantidad de agua en los tanques de lavado. Como se dijo anteriormente esta variable representa el punto de mayor incidencia en el aumento de los contaminantes. Después de los análisis realizados para esta categoría, se encontró que se debe realizar una mejora en el caudal de enjuague ya que ésta representa una variable fácil de manipular y no afecta el procedimiento de galvanizado ya implantado en la empresa.

~ **Medio ambiente**

Con respecto al medio ambiente se consideraron variables tales como presión, temperatura y humedad. Observando que dichos parámetros no inciden notablemente en la generación de desechos electrolíticos del área de galvanizado.

~ **Materia prima**

Se contemplan parámetros como forma de los cajetines y disponibilidad de los reactivos a usar. La disponibilidad de la materia prima es de vital importancia debido a que la misma permitirá el mantenimiento de los baños sin necesidad de ser remplazados. De no poseer la materia prima necesaria, se deberá desechar el baño generando así una mayor cantidad de desechos electrolíticos. La forma de los cajetines influye en el arrastre del agua, pero esta variable no puede ser modificada.

~ **Mano de obra**

Esta categoría es de gran importancia para el mejoramiento de cualquier proceso ya que el personal que labora dentro de un área representa la pieza principal de la misma. De esta manera es fundamental que se cuente con una buena capacitación en todas las actividades que debe desempeñar en el lugar de trabajo y así evitar cualquier posibilidad de riesgo y minimizar accidentes por mala operación, lo cual aumentará la generación de desechos electrolíticos. Por tales motivos se contempla en este renglón aspectos tales como: el entrenamiento, la inducción y el conocimiento en el procedimiento para todos los obreros que laboran en el área de



galvanizado. Una buena inducción a los obreros garantiza la adaptación del personal al cargo ejercido y la realización del trabajo con la obtención de los mejores resultados.

La capacitación al operario tiene como finalidad brindar una amplia información no sólo en el área operativa sino también de conocimientos técnicos que permitan que el obrero adquiera una noción general de las reacciones existentes, los riesgos implicados de no realizarse los procesos de manera adecuada y el costo asociado con respecto a la realización del proceso y al tratamiento de los desechos generados.

~ **Maquinaria**

El tiempo de escurrido de las piezas y el control del tiempo de permanencia en los baños representan los parámetros fundamentales de esta categoría. Éstos son aspectos del proceso de muy difícil acceso para modificar ya que el control del tiempo del proceso viene asociado directamente con el galvanizado de la pieza, procedimiento que para este estudio no puede ser modificado. Los cajetines poseen un espesor de recubrimiento requerido, para lo cual se necesita un tiempo de retención en los baños ya establecido. Un tiempo mayor de las piezas en los baños, traería como consecuencia la obtención de un espesor mayor o un mal recubrimiento de los mismos.

En definitiva a pesar de que cada una de las causas influyen en la generación de los desechos electrolíticos de manera directa, se puede observar que el método es el que más influye siendo el caudal de los tanques de enjuague la causa más determinante de esta categoría. A continuación se analiza de manera más detallada la causa más relevante encontrada.

▪ **Estudios de las posibles causas que interfieren en el proceso de galvanizado.**

Como se dijo anteriormente, el caudal de enjuague es la variable a modificar. Para comenzar el análisis se determinó a cuáles tanques de enjuague se les debe modificar el caudal de operación. Para ello se midió el pH inicial de cada agua de enjuague contenida en los tanques, esto con la finalidad de observar cuál es la variación en el pH del agua a lo largo de un día de operación.



La importancia de realizar este procedimiento radica en el hecho de que cada tanque de enjuague posee una solución básica o ácida dependiendo del baño que le precede. La variación de pH indica la saturación del agua de lavado, es decir, si el agua esta más contaminada, se verá reflejado con una variación abrupta del pH.

Por esta razón se estudia este suceso a lo largo de un día de operación y con esto se espera obtener lo tanques a lo cuales se les debería realizar una modificación en el caudal de enjuague, logrando de esta manera mantener valores de pH constante. En la tabla B.3 (apéndice B) se encuentran reportados los valores de pH de cada tanque de enjuague en un día de operación.

Para observar mas fácilmente si existe un excesivo cambio en el valor de pH, se graficó este cambio en función de los intervalos de toma de muestras, las cuales fueron tomadas en intervalos de 1 hora cumpliendo con esto 8 tomas de muestra en un día de trabajo. A continuación se muestra en la figura 4.5 dicho estudio.

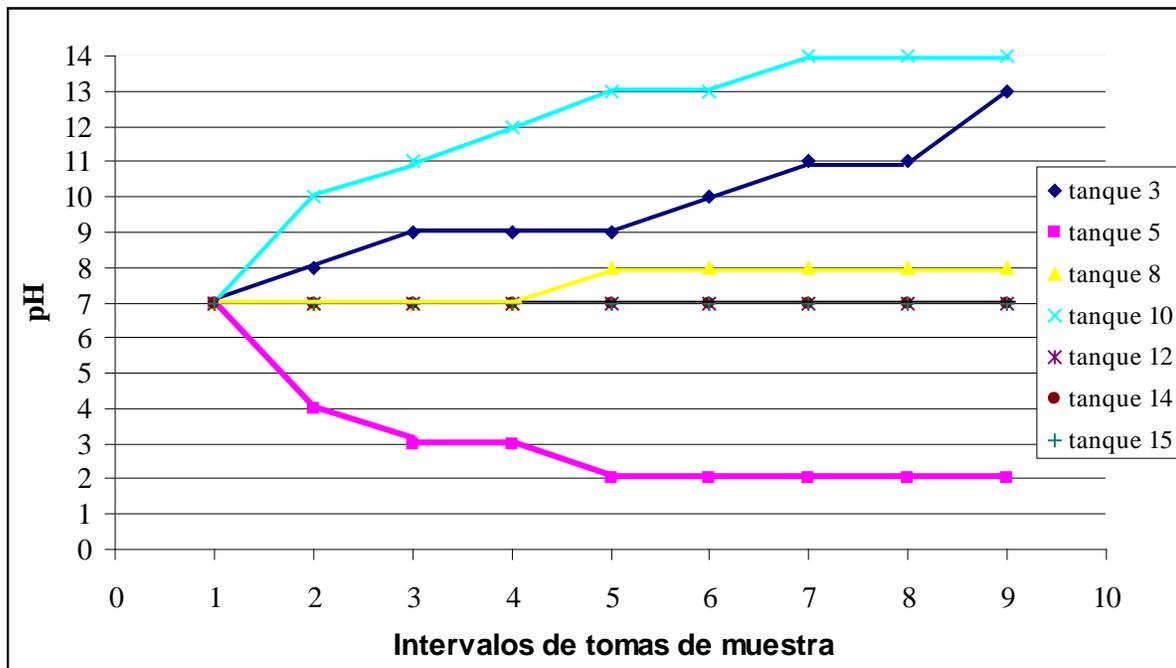


Figura 4.5. Variación del pH de las aguas de enjuague a lo largo de un día de operación

En la figura anterior se observa que a medida que transcurre el tiempo, el pH en los tanques 3, 5 y 10 cambia bruscamente, por lo que estos tanques deben ser analizados. El caudal de enjuague representa la cantidad de agua que se utiliza para eliminar de la superficie de la pieza, los restos de reactivo del baño anterior. En el tanque 3 el pH aumentó ya que el baño



anterior es el desengrase en caliente con soda cáustica. Por la forma característica que poseen los cajetines (apéndice C, figura C.2), el agua contenida en el tanque 1-2, es arrastrada al tanque 3 lo que corresponde a un aumento periódico en la cantidad de soda cáustica en el enjuague. Se observa que el pH alcanza un valor cercano a 14, lo que sugiere que el caudal actual de operación debe aumentarse para que al realizarse el arrastre de la soda cáustica, el agua de enjuague sea mayor y por lo tanto la concentración de la soda cáustica disminuya. De igual manera ocurre en el tanque 10 donde se observa un aumento en el pH alcanzando un valor de 14.

Este aumento se debe a que en el tanque anterior se realiza el zincado cianurado de las piezas y allí se tiene soda cáustica en gran cantidad, esto proporciona un aumento brusco en el pH del tanque 10.

De manera opuesta ocurre en el tanque 5. Se observa en la figura 4.5 que al transcurrir el tiempo el pH disminuye hasta alcanzar un valor de 2. Esto se debe a que en este tanque se realiza el lavado del decapado con ácido clorhídrico.

En los tanque 8, 12, 14 y 15, no se observa variación brusca de pH, lo que sugiere que el caudal de operación establecido es adecuado para el lavado de la pieza, es decir, no se contaminan los baños siguientes y la concentración de los reactivos en las aguas de lavado no aumentan a lo largo del tiempo.

Para solucionar este problema, inicialmente se determinó el caudal de operación actual de cada uno de los tanques a analizar, para ello se realizó los pasos para la metodología del llenado de tobos y los resultados se encuentran reportados en la tabla 4.2 donde se observa que se realizó la medición por triplicado para obtener un promedio del caudal medido y por ende un resultado mas preciso.

Tabla 4.2. Resultado del llenado de tobos para el cálculo del caudal en los tanques de enjuague

tanque	Tiempo de llenado del tobo ($T \pm 0,01$) s		
	3	38	39
5	32	33	34
10	45	45	45

Volumen del tobo: 2 L



Con el tiempo de llenado y el volumen del tobo se determina el caudal de operación de los tanques de enjuagues mediante la ecuación IV del apéndice A y los resultados obtenidos se encuentran reportados a continuación en la tabla 4.3. Se observa que comparando el caudal obtenido para los tres tanques, el menor caudal ($0,044 \pm 0,006$ L/s) corresponde al tanque 10 el cual posee el mayor cambio en el pH con 7 unidades (figura 4.5).

Seguidamente el segundo tanque que posee una gran variación en el pH con 6 unidades corresponde al tanque 3 el cual posee el segundo caudal mas bajo. Por ultimo el tanque 5 el cual posee el mayor caudal (tabla 4.3) es aquel que posee una variación de 5 unidades en el pH (figura 4.5). De todo lo anterior se concluye que mientras el caudal de operación es mas bajo, la variación de pH es más brusca.

Tabla 4.3. Caudal de los baños de enjuague del proceso de galvanizado

Tanque	Caudal ($Q \pm \Delta Q$) L/s
3	$0,053 \pm 0,007$
5	$0,060 \pm 0,008$
10	$0,044 \pm 0,006$

Cada uno de los tanques poseen distintas características, por lo que el aumento de caudal viene dado de manera diferente para cada tanque. Se modificó el caudal de los tanques a valores supuestos y se encuentran reportados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Caudal modificado de los baños de enjuague del proceso de galvanizado

Tanque	Caudal ($Q \pm \Delta Q$) L/s
3	$0,10 \pm 0,01$
5	$0,08 \pm 0,01$
10	$0,10 \pm 0,02$



Se puede decir que este procedimiento representa un tanteo en la variable caudal, mas sin embargo no resultó dificultoso determinar hasta que valor modificar en cada tanque dicha variable, esto ya que con simple medición del pH a lo largo de un día de trabajo, se determinó que los nuevos caudales en el agua se enjuague lograron mantener el pH constante, es decir, sin variaciones bruscas. En la figura 4.6 se muestra de manera gráfica la variación en el pH de operación con el nuevo caudal establecido.

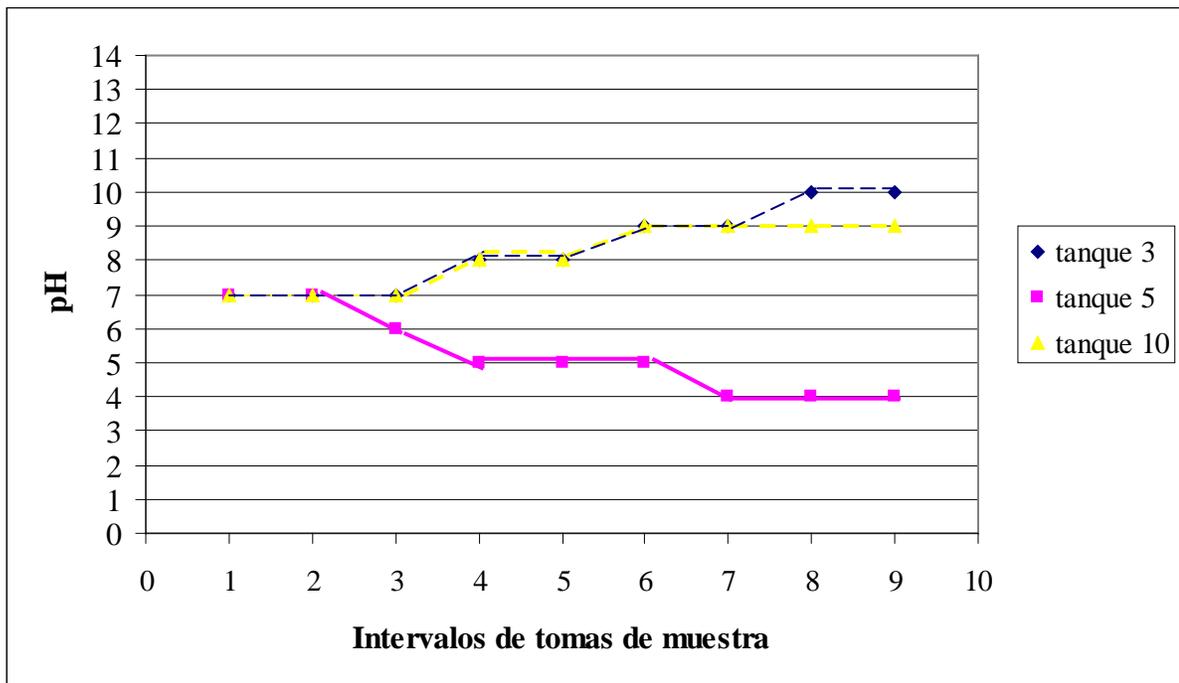


Figura 4.6. Variación de pH con el nuevo caudal de operación en los tanques de enjuague del proceso de galvanizado

De la figura anterior se observa que el valor de pH para el agua de enjuague del tanque 3 disminuyó en 3 unidades usando el nuevo caudal de operación en comparación con el pH obtenido con el caudal anterior. De igual manera ocurre con los tanques 5 y 10, a pesar de observarse una variación en el pH, ésta no es tan brusca y no se llegan a valores máximos.

Con los cambios anteriores realizados, se mejora el proceso de lavado de las piezas, ya que con una menor variación en el pH de cada tanque de enjuague, se asegura una concentración en los baños tal, que se realice un lavado efectivo, un menor arrastre y por ende una menor contaminación en los tanques posteriores.



Todas las medidas de mejora tienen como objetivo obtener la máxima calidad del agua de lavado procedente de cada una de las operaciones. Teniendo el agua de lavado la mejor característica se logra:

- Disminución en la contaminación de los baños posteriores a cada lavado, esto ya que la concentración de iones hidronios en el agua de lavado es menor y al llevarse a cabo el arrastre, la cantidad de reactivo que se traslada al baño siguiente es menor.
- Mejorar el tratamiento del agua, ya que si la cantidad de agua de lavado es mayor, la concentración del electrolito es menor y por ende el proceso de tratamiento es más factible.
- Por último se alarga la vida de los baños por estar estos menos contaminados a lo largo del tiempo.

4.1.2 Caracterización físico-química del afluente y del efluente del proceso de tratamiento de las aguas residuales.

Las caracterizaciones tanto del afluente como del efluente representan puntos importantes a los que se les debe contemplar gran parte del estudio, ya que de allí dependerán las posibles propuestas. El afluente es el agua no tratada a la cual se le debe realizar los análisis físico-químicos para determinar la concentración de los contaminantes antes del tratamiento. Esto para obtener luego del tratamiento y del análisis de efluente (agua tratada) el porcentaje de remoción.

El efluente debe ser caracterizado para determinar cuales parámetros analizados están desviados con respecto a los valores permisibles por la ley ambiental. Para tener una visión más amplia de que tan desviados se ha encontrado las concentraciones de los contaminantes, se solicitó al departamento de higiene y seguridad industrial los análisis realizados con anterioridad. Estos análisis corresponden a los años 2003-2009 y se encuentran en el apéndice C y representan una recopilación de resultados del tratamiento realizado por la empresa.

Los análisis realizados en los años 2003-2009 demostraron que desde años atrás la concentración en los contaminantes estudiados también se encontraban fuera de norma, es decir, la concentración de sólidos totales, cromo total, zinc y cianuro total. Se observa que la



concentración de cada contaminante ha ido aumentando al paso del tiempo, esto es debido al aumento en la producción y por ende el aumento en la concentración de los contaminantes a tratar presentes en el afluente tanto del tanque I como del tanque II. Los resultados arrojados por la recopilación de los análisis anteriores sirvieron de base para obtener las posibles causas que influyen en el aumento de la concentración de los contaminantes.

La caracterización del efluente permitió obtener cuales parámetros representan los puntos críticos para los cuales se diseñará el tratamiento. Adicionalmente, esto permitió la identificación de los tipos de tratamiento de acuerdo a los tipos de desecho. Se seleccionaron los parámetros a analizar de acuerdo a las composiciones de los baños de galvanizado, en los cuales están presentes sustancias como cromo total, zinc y cianuro total y los posibles contaminantes presentes en el transcurso del tratamiento fisicoquímico. Adicional a dichos análisis se realizó demanda química de oxígeno (DQO) por la presencia de materia química susceptible a ser oxidada en reacciones de oxido-reducción.

Se analizó también la cantidad de sólidos suspendidos y sedimentables presentes en el agua, ya que se estudia la posibilidad de aplicar la precipitación química como tecnología para tratar el afluente. Los resultados obtenidos de la caracterización se encuentran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Caracterización físico-química del afluente y del efluente del proceso de galvanizado de la empresa BIEMCA

Parámetros (ppm)	Afluente tanque I	Afluente tanque II	Efluente	Norma
DBO5	<10	<10	62	350
DQO	70	292	360	700
pH	6.7	10.6	7.3	6-9
Aceites y grasas	5	9	10	100
Aceites minerales	4	8	3	20
Sólidos totales	1970	292	2860	1600
Sólidos suspendidos	298	310	86	400
Sólidos sedimentables	3	1	2	100
Cloruros	347	447	249	300
Fósforo total	<0.15	<0.15	0.3	10
Nitrógeno total	17	6	2	40
Cromo total	92.6	1.2	36.4	2
Sulfato	659	457	781	400
Zinc	66.2	150.93	67.9	5
Cianuro total	0.05	2600	16.8	0.2

Fuente: Cemproaca, C.A, 2010



Norma: Gaceta Oficial N° 5305, Decreto N° 3.219, 1999. Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del lago de Valencia.

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 4.5 comparándolos con lo establecido en la norma, se encontró que los compuestos que sobrepasan los límites son cromo total, cianuro total, zinc, sólidos totales y sulfatos. Estos valores corresponden con los reportados en los análisis realizados anteriormente para el lapso del 2003-2009, y representan los parámetros de interés ya que son los contaminantes a disminuir para adecuarlos a la norma.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de remoción del tratamiento actual (tabla 4.6). El cálculo llevado a cabo para la determinación del porcentaje de remoción se encuentra en (Apéndice A, apartado A.4).

Tabla 4.6. Remoción de los contaminantes de la planta de tratamiento actual

Parámetros	Remoción (%)
Cromo total	60,7
Zinc	55,0
Cianuro total	99,3

Estos porcentajes de remoción se determinaron con el fin de obtener la eficiencia del tratamiento actual realizado en la empresa. A pesar de ser estos porcentajes de remoción altos, no se logra adecuar a la norma los valores de concentración respectivo, por lo que se deduce que el tratamiento realizado si es el adecuado como tratamiento físico-químico, sin embargo se debe proponer mejorar el tratamiento actual respecto a la cantidad en volumen de reactivos adicionados, para llevar a cabo las respectivas reacciones de oxidación, reducción y precipitación de metales. No se encuentra reportado en la tabla 4.6 el porcentaje de remoción de sólidos totales y sulfatos, ya que actualmente la planta de tratamiento no realiza ningún procedimiento para adecuar la concentración de dichos contaminantes.

A partir de esto se comienza con las propuestas para mejorar el tratamiento actual, y la implementación de acondicionamiento de lodos.



4.1.3 Propuesta de tecnologías para el tratamiento de los efluentes del área de galvanizado que permitan adecuar a la norma la concentración de los contaminantes.

El tratamiento de las aguas representa un tema de gran importancia en el mundo hoy en día. Todas las industrias deben actualmente poseer un tratamiento de sus efluentes para evitar sanciones legales y contaminaciones al ambiente. Por esta razón se plantea como meta, proponer tecnologías que adecuen los efluentes de la empresa en estudio y así obtener valores en la concentración de los contaminantes por debajo de los máximos permitidos por la ley ambiental.

▪ Propuesta de mejora al tratamiento del tanque I

Los parámetros a disminuir en el tanque I como se explicó anteriormente son la cantidad de cromo total y zinc. A continuación se detallan las modificaciones propuestas para cada etapa de tratamiento del tanque I.

~ Reducción de cromo VI a cromo III

Para el tratamiento de las aguas con cromo hexavalente el procedimiento normal es reducir el cromo al estado trivalente y posteriormente precipitarlo como hidróxido de cromo III. Dos agentes reductores recomendados son el dióxido de azufre gas y el bisulfito de sodio en solución ácida. Con ayuda del personal de la empresa se escogió como agente reductor el bisulfito de sodio ya que este reactivo es usado actualmente por la empresa por lo que está disponible para el tratamiento. Teniendo en cuenta que el porcentaje de remoción actual (Tabla 4.6), para este parámetro es mayor al 50 %, se propone continuar utilizando el bisulfito de sodio, sin embargo se debe ajustar la cantidad de reactivo agregado y el pH de la reacción. Esta dosificación se encontrará a partir de los resultados obtenidos en la verificación a nivel de laboratorio para la reducción del cromo hexavalente al cromo trivalente.

En consecuencia la dosificación del agente reductor se realiza manteniendo el potencial de oxido-reducción que refleje la totalidad de conversión de cromo hexavalente a cromo trivalente, el cual corresponde a un rango entre 200 y 300 mV (Sainz, 2005). Este parámetro junto con el pH y la dosificación del reactivo serán los que se ajusten en la verificación a nivel de laboratorio.



~ **Precipitación de cromo III y Zinc**

Para la remoción de cromo trivalente y zinc mediante precipitación química, los reactivos mas utilizados actualmente son el hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na₂CO₃) o el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) por lo tanto es necesario realizar un cuadro comparativo como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Ventajas y desventajas de los reactivos seleccionados para precipitación de cromo trivalente y zinc

	Hidróxido de sodio	Carbonato de sodio	Hidróxido de calcio
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Es el reactivo utilizado en la empresa por lo que no presenta problema de disponibilidad. - Reacción rápida¹. - Se disuelve fácilmente². 	<ul style="list-style-type: none"> - Efectivo neutralizador¹. - Ampliamente disponible². - No es tan costoso¹. 	<ul style="list-style-type: none"> - Su precio es considerablemente mas bajo que la mayoría de los reactivos¹. - Precipita metales pesados eficientemente¹.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Es corrosivo para los metales y tejidos². - Costo medianamente alto¹. 	<ul style="list-style-type: none"> - No proporciona valores de pH tan altos². - La reacción es lenta¹. - Se necesitan grandes cantidades¹. - Es dificultoso de disolver². 	<ul style="list-style-type: none"> - Genera gran cantidad de lodo¹.

Fuente: ¹Jiménez, 2001, ²Manahan, 2007

De esta comparación se puede decir que las mejores opciones para este caso son el hidróxido de sodio y el hidróxido de calcio, ya que poseen ventajas considerables. El carbonato de sodio sin embargo, es efectivo para precipitación de metales pero posee una gran cantidad de desventajas con respecto a los otros dos que lo elimina de la escogencia entre los agentes precipitantes.

Se propone realizar una prueba de jarras para determinar cual de los agentes precipitantes escogidos disminuye la concentración tanto de cromo trivalente como de zinc a los valores permisibles en la norma. Con la realización de la prueba de jarras además de determinar cual de



los dos agentes precipitantes es el más eficiente, también se debe obtener la dosificación del reactivo y el pH de la solución óptimo para la mayor precipitación. El método más comúnmente usado para eliminar los iones del metal es precipitar el ión como hidróxido metálico como se explicó anteriormente. El proceso puede ser automatizado y controlado fácilmente por un controlador simple de pH. Elevando el pH de la solución con el material alcalino escogido, los compuestos metálicos se convierten en insolubles y son precipitados en la solución. Se debe tener en cuenta que los hidróxidos de los metales a precipitar en este caso con anfoteritos (figura 2.8) y serán redissueltos dentro de una forma compleja a un pH de 11,5 a 13,0. Por lo que en la prueba de jarras, el pH es la variable más importante y se debe mantener a un valor de entre 7,5 y 8,0 como se observa en la figura 2.8.

▪ **Propuesta para el tratamiento en el tanque II**

El tanque II está compuesto por cianuro en forma de cianuro de sodio (NaCN). El tratamiento actual realizado por la empresa utiliza hipoclorito de sodio como agente oxidante, por lo que se estudia las ventajas y desventajas (tabla 4.8) del uso de este reactivo con respecto a otro agente oxidante, en este caso el ozono.

Tabla 4.8. Ventajas y desventajas de los agentes oxidantes propuestos para oxidación de cianuro.

	Hipoclorito de sodio	Ozono
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - La oxidación es rápida¹. - Excelente agente oxidante¹. - Alto porcentaje de remoción². - Económico³. - Fácilmente disponible³. 	<ul style="list-style-type: none"> - Poderoso oxidante². - Reacciones rápidas¹. - No debe estar en solución².
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente tóxico¹. - Debe estar en solución². 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy costoso³.

Fuente: ¹Sainz, 2005; ²Jimenez, 2001; ³Rigola, 1990.

Con la comparación de las ventajas y las desventajas de los reactivos estudiados y con la ayuda del personal de la empresa, se determinó que el mejor agente oxidante es el hipoclorito de sodio ya que presente más ventajas, entre ellas: es un excelente agente oxidante, es económico y fácilmente disponible. La principal desventaja del uso del ozono es que éste es muy costoso.



Se propone realizar a nivel del laboratorio un procedimiento experimental que determine la dosificación de hipoclorito de sodio a usar. Teniendo en cuenta que el potencial de oxidación-reducción cambia abruptamente cuando todo o casi todo el cianuro pasa a cianato de modo que es aconsejable operar a 250 mV (Sainz, 2005) de potencial oxidante, esto agregando hipoclorito de sodio.

~ Tratamiento de lodos

En esta sección se asignó a cada tecnología un valor correspondiente a las ventajas y desventajas de cada una de ellas. La ponderación asignada a cada uno de los factores estudiados depende principalmente de los requerimientos y necesidades de la empresa, teniendo en cuenta las sugerencias realizadas por el personal experto en el área y mediante las consultas bibliográficas realizadas. En la siguiente tabla se muestra las diferencias de cada tecnología puntualizando las ventajas y desventajas que cada una de ellas presenta (tabla 4.9), a partir de las cuales se elabora la matriz de selección.

Tabla 4.9. Ventajas y desventajas de las tecnologías para secado de lodos.

	Eras de secado	Filtros de vacío	Centrifugación	Filtración a presión	Sacos filtrantes
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de implantación². - Bajo mantenimiento². - Porcentaje de sequedad (30-40%)². 	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de sequedad (30-35%)². 	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de sequedad (20-25%)¹ - Fácil de operar¹. - Mano de obra mínima¹. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto porcentaje de sequedad (45-50%)². - Se obtiene un efluente muy clarificado debido al elevado porcentaje de captura¹. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy bajo costo de implantación². - Fácil mantenimiento².
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Se necesita gran superficie y mano de obra¹. - Tiempo largo para deshidratación¹. - Extracción manual de lodo². 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de implantación². - Complejidad del sistema sobre todo de vacío². - Complejo mantenimiento² - Alto consumo de reactivos². 	<ul style="list-style-type: none"> - Dosificación de polielectrolitos². - Costo medianamente alto². - Complejidad del sistema². 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere cierta mano de obra¹. - Uso de reactivos¹. - Genera mayor cantidad de fangos¹. - Alto costo¹. 	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de sequedad obtenido bajo². - Sólo para producción de fangos mínima².

Fuente: ¹Ramalho, 2003, ²Sainz, 2005



La tabla 4.9 sirve de base para evaluar las tecnologías en cada uno de los criterios utilizados. Esto criterios se establecieron en la metodología y a continuación se muestra el resultado obtenido en la ponderación asignada a cada variable dependiendo de las ventajas y desventajas presentes para cada tecnología, estos criterios forman parte de la matriz de selección.

▪ Costo asociado

Esta variable con una ponderación del 15% contempla no solo el costo para la instalación de la tecnología, sino también el costo que involucra la operación y el mantenimiento de la misma.

Para el caso de las eras de secado se le asignó un puntaje de 9 ya que posee un bajo costo de instalación y es necesaria una elevada superficie disponible para tratar los volúmenes de lodo producido. Los costos relevantes con el uso de filtración al vacío corresponden a un puntaje de 0 en la escala, obteniéndose esto por tener este método un alto costo de implantación. Esto implica la realización del mecanismo de rotación del cilindro, el costo en la adquisición de materiales filtrantes (telas) y a su vez la aplicación de vacío para extraer el agua.

En cuanto a la centrifugación recibe 3 puntos ya que posee un costo de implantación medianamente alto, esto implica la adquisición de la carcasa sólida y la instalación de un raspador transportador para remover el lodo.

Con respecto a la filtración a presión se le asignó 3 puntos ya que a pesar que el costo inicial no es muy elevado, implica un alto costo en mano de obra. Sin embargo esta tecnología puede ser automatizada eliminando el costo por mano de obra pero a su vez aumentando el costo de inversión de los equipos automatizados.

La característica más importante del método de secado de lodo por sacos filtrantes es su bajo costo de implantación lo que le asigna un puntaje de 9. Se utiliza un material poroso que permite el paso del agua y retiene los fangos. Este saco es resistente a compuestos químicos y degradable a medio plazo. Gracias a su bajo precio suelen ser desechados, es decir, una vez colmatado el medio filtrante, es eliminado junto con los lodos retenidos.



▪ **Facilidad de mantenimiento**

Con un ponderación de 10 % el mantenimiento es un proceso importante para selección de la mejor tecnología ya que implica tanto el tiempo de mantenimiento como la complejidad y uso de mano de obra.

Las eras de secado requieren un bajo mantenimiento por lo que se le asignó 6 puntos. Esto debido a que una vez secado el lodo, si el área de secado no es muy grande, se puede realizar manualmente la extracción del lodo con maquinaria. Si el área del lecho es muy grande, el mantenimiento puede realizarse con palas. Al realizar la limpieza se pierden pequeñas cantidades de arena la cual debe ser repuesta para el siguiente ciclo.

Por el contrario la filtración al vacío se le asignó 3 puntos, ya que es difícil de limpiar por la forma característica del cilindro y a su vez la restauración del material filtrante es complicado. Al igual que éste, el método por centrifugación requiere de un mantenimiento difícil por la forma de la carcasa sólida y la disposición de los rodillos y el raspador transportador, por lo que también se le asignó 3 puntos. La filtración a presión obtiene 6 puntos en la matriz de selección, ya que la forma de las cámaras revestidas con telas filtrantes permiten una limpieza accesible por el personal obrero. Esta limpieza se realiza usando agua a altas presiones (80-100 bar).

Los sacos filtrantes obtienen la mayor puntuación en esta categoría (9 puntos) ya que son desechables y su mantenimiento es nulo, es decir, una vez usado el saco, se retira y se desecha. A pesar de que esta operación es manual, la dificultad a la hora de remplazar un saco por otro es mínima.

▪ **Porcentaje de sequedad**

El secado de los lodos consigue reducir el peso de los mismos por lo que el manejo y la disposición se hacen más fáciles de realizar y el costo que implica llevar a cabo estas operaciones disminuye. Es por esta razón que esta categoría corresponde a la más importante para seleccionar la mejor tecnología con una ponderación de 40 %.

Con relación a las eras de secado se obtuvo una puntuación de 6. Mediante esta tecnología se obtiene un porcentaje de sequedad de 35-40 % (tabla 4.9). Esto debido a que el



secado se realiza en dos etapas, una donde se elimina la mayor cantidad de agua por gravedad y la otra en donde el aire y el sol completan el secado. Esta tecnología se usa para cantidades de lodo pequeñas y el porcentaje de sequedad vendrá dado por el espesor de lodo dispuesto en la era. Si la cantidad de lodo es pequeña su secado mediante esta técnica será más rápido.

De igual manera se le asignó una puntuación de 6 al método de filtración por vacío obteniéndose mediante esta tecnología un porcentaje de sequedad de 30-35 %. Esto ya que se cuenta con un efectivo sistema en donde se adhiere el lodo a la superficie de la tela mediante un vacío de 90 KPa. A medida que gira el tambor y la capa de lodo emerge del tanque, se pasa aire a través de éste para ayudar a la deshidratación. Por el contrario la técnica de centrifugación no genera altos porcentajes de sequedad (20 a 25 %) (tabla 4.9) por lo que se le asigna una puntuación de 3. Las centrifugas son relativamente compactas pero no pueden lograr concentraciones de sólidos del 25 % y en muchos casos es difícil separar en forma económica sólidos a un 12-15 % de lodos.

La tecnología que obtiene la mayor puntuación en esta categoría es la filtración a presión con 9 puntos. El filtro prensa funciona exitosamente con muchos lodos. Las cámaras revestidas con material filtrante retienen los sólidos pero permiten que el líquido escape por las estrías que tienen las capas metálicas de apoyo. A medida que escapa el líquido, la pasta adyacente a la tela actúa como un filtro adicional para el resto del lodo y la pasta se deshidrata hacia el centro.

El porcentaje de deshidratación depende de la naturaleza del lodo y de la duración del ciclo de presión. Los sacos filtrantes obtienen una puntuación de 6 ya que a pesar de que no se obtiene un gran porcentaje de sequedad en el proceso (10-15 %), este aumenta si los sacos se almacenan luego de ser utilizados, es decir, cuando la fase de filtración termina y los sacos están llenos del lodo, son separados del proceso de tratamiento y cerrados herméticamente, pudiendo ser apilados para una fácil eliminación posterior. Durante esta fase de almacenamiento al aire libre, la deshidratación de los fangos continúa de forma natural pudiendo alcanzarse sequedades del orden del 30 %, lo que significa un ahorro importante, tanto en su eliminación (costo de transporte) como por su sencilla manipulación.



▪ Operatividad

En esta categoría con una ponderación del 20 % se incluye la complejidad de la operación de cada una de las tecnologías, tomando en cuenta el manejo del equipo, la disposición de los subdesechos y la higiene y seguridad laboral que implica el uso de cada técnica.

Las eras de secado y la centrifugación obtienen la mayor puntuación de esta categoría. Con 9 puntos, la primera es fácil de operar, se realiza manualmente, precisa de mano de obra para la extracción del lodo deshidratado. Adicional a esto el obrero no está involucrado en riesgos químicos ya que no se usan reactivos adicionales. Sin embargo, existen riesgos físicos al realizarse la limpieza de las eras de secado. La segunda tecnología es fácil de operar, requiere de una mínima mano de obra. Los sacos filtrantes obtienen 3 puntos ya que son muy fáciles de operar, los subproductos son fáciles de disponer y no genera riesgos a los operarios. El filtro prensa y la filtración por vacío obtienen 0 puntos ya que el sistema de vacío es complejo, son algo difíciles de operar y se requiere de una inducción a los operarios.

▪ Espacio requerido

Esta es una de las variables más críticas para la empresa ya que se dispone de un pequeño espacio donde actualmente se almacenan los reactivos y desechos del tratamiento actual, por lo que la ponderación de esta variable es de 15 %. Los sacos filtrantes representan la técnica en la cual se usa el menor espacio por lo que la puntuación es de 9 puntos. Las eras de secado obtienen 6 puntos porque a pesar de que para esta tecnología se necesita gran espacio, éste va a depender directamente de la cantidad de lodo a tratar, en la empresa la producción de lodo es baja por lo que esta tecnología es adecuada. La filtración por vacío, la centrifugación y la filtración a presión se calificaron con 3 puntos por ser maquinarias donde se encuentran piezas de gran tamaño y por ende su espacio requerido es mayor. Con toda la información encontrada en la tabla de ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías (tabla 4.9) se construye la matriz de selección y el resultado obtenido se observa en la tabla 4.10.



Tabla 4.10. Matriz de selección de las tecnologías para el secado de los lodos

	%	Eras de secado		Filtros de vacío		centrifugación		Filtración a presión		Sacos filtrantes	
Costo de implantación	15	9	135	0	0	3	45	3	45	9	135
Facilidad de mantenimiento	10	6	60	3	30	3	30	6	60	9	90
Porcentaje de sequedad	40	6	240	6	240	3	120	9	360	6	240
Operatividad	20	9	180	0	0	9	180	0	0	3	60
Espacio requerido	15	6	90	3	45	3	45	3	45	9	135
Total	100		705		315		420		510		660

Resultó que la mejor tecnología es la era de secado con 705 puntos, ésta tecnología representa la mejor opción para el secado de los lodos generados en el tratamiento de los electrolitos del área de galvanizado. Principalmente por su bajo costo de implantación su facilidad de operación y el alto porcentaje de sequedad que se obtiene mediante esta técnica. Si embargo se observa en la tabla 4.10 que los sacos filtrantes obtiene una puntuación bastante alta cercana a las eras de secado. El uso de ambas tecnologías puede ser una solución viable para el secado de los lodos.

4.1.4. Verificación a nivel de laboratorio de la propuesta seleccionada para la disminución de metales pesados y cianuro

A escala de laboratorio se determinó si las propuestas para la disminución de metales pesados y cianuro son eficientes. Se obtuvo adicionalmente la dosificación requerida del reactivo a usar, y el procedimiento necesario para disminuir la concentración de los metales y el cianuro presente en el agua a tratar.

Es de gran importancia antes de comenzar el diseño, llevar a cabo ensayos de laboratorio, con el fin de determinar entre otros los siguientes parámetros de diseño:

- * Reactivo o reactivos más adecuados al proceso.
- * Dosis de reactivos a utilizar en la reacción de óxido-reducción.
- * Dosis de reactivo para ajuste de pH.



- * pH óptimo de reacción.
- * Tiempos de retención.
- * Potenciales de óxido-reducción.
- * Generación de precipitados y volumen de fangos formados.
- * Calidad del agua tratada.
- * Condiciones de presión y temperatura de trabajo.

A continuación se explica detalladamente los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio

▪ **Reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente**

La importancia de realizar tratamientos basados en reacciones tipo redox, es la eliminación de determinados contaminantes de las aguas residuales. El cromo hexavalente es altamente tóxico y debe ser eliminado de las aguas residuales antes de ser vertidos a la red cloacal ya que crearía importantes problemas en los tratamientos biológicos de las depuradoras urbanas.

El control de estos procesos se realiza por la medida del potencial de óxido-reducción del sistema, o lo que es lo mismo su capacidad de transferencia de electrones. Dentro de los procesos de reducción, el más conocido es el del cromo, de forma hexavalente a trivalente, cuya toxicidad es del orden de 100 veces menor, y la posterior precipitación del hidróxido insoluble, eliminándolo por decantación en forma de lodo.

Mediante lo dicho anteriormente, el potencial de óxido-reducción representa la variable de estudio para llevar a cabo la reducción del cromo a su forma menos tóxica. La velocidad de reacción es fundamental para obtener los mejores resultados del tratamiento, es por ello que adicional al potencial de óxido-reducción, se debe encontrar el pH en donde la reacción se lleve a cabo mas rápidamente. Otra variable importante para la reducción del cromo VI es el agente reductor a usar y la dosificación del mismo. Anteriormente se encontró que el reactivo mas adecuado es el bisulfito de sodio.



La ventaja del uso del bisulfito de sodio es su menor consumo, y la disminución en la producción de lodos. No conviene prepararlo a altas concentraciones por su facilidad de cristalización. La figura 4.7 muestra la variación en la reducción del cromo hexavalente en función del pH de la solución, allí se observa que el valor de pH para llevarse a cabo la mayor reducción del cromo está entre 2,0 y 2,5 adicionalmente se observa que a un pH cercano a 5 la reacción se lleva a cabo en 200 min. lo que equivale a 3 horas por lo que esto no es conveniente para la empresa, se debe asegurar que todo el cromo VI se reduzca pero teniendo el menor tiempo de reacción posible.

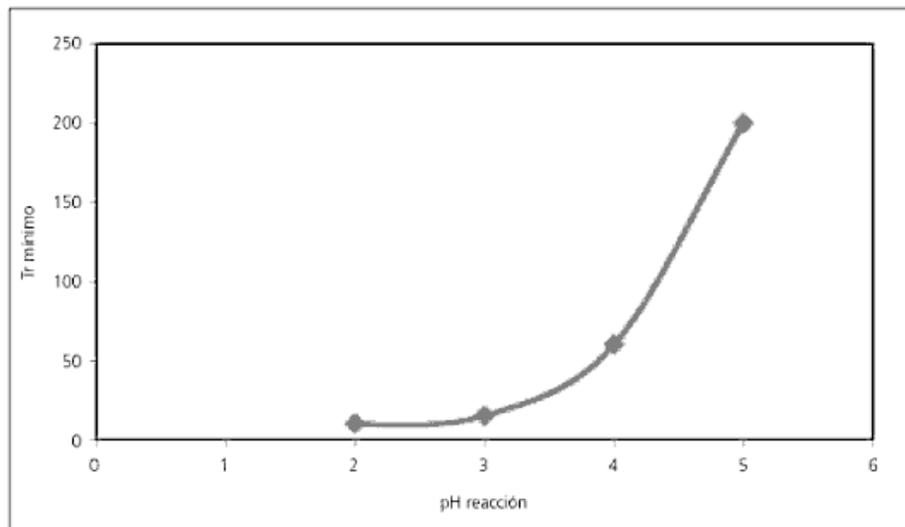


Figura 4.7. Tiempo de reacción de reducción de cromo hexavalente en función del pH

Fuente: Sainz, 2005

Es por ello que el pH debe mantenerse en valores entre 2 y 3 para que la reacción se lleve a cabo en aproximadamente 15 min. Entonces como ha de mantenerse el pH en este rango, el agente reductor a usar debe asegurar que la reacción se logre, es decir, cada agente reductor lleva asociado un valor óptimo de pH (Sainz 2005). La tabla 4.11 muestra el valor de pH correspondiente para cada agente reductor.



Tabla 4.11. Reactivos empleados para la reducción del cromo con sus respectivos pH de trabajo

Reactivo	Formula química	pH de reacción
Sulfato de hierro	FeSO ₄	2,0
Bisulfito de sodio	NaHSO ₃	2,5
Dióxido de azufre	SO ₂	2,9

Fuente: Sainz, 2005.

Lo anterior muestra que se debe encontrar un balance entre el pH de operación usando el bisulfito de sodio y el pH en el cual se lleva a cabo la reacción en el menor tiempo. Por lo que el pH de operación se fijó en 2,5 concordando esto con las propiedades del agente reductor y el rango óptimo para el tiempo de reacción. Adicionalmente el potencial de óxido-reducción se debe encontrar entre 200 y 300 mV ya que en este rango de operación se realiza la total reducción del cromo a su estado trivalente. En resumen se estudió a nivel de laboratorio la cantidad de bisulfito de sodio la cual a un pH de 2,5 genera un potencial de oxido-reducción tal que se encuentre entre 200 y 300 mV. Asegurando con todas estas condiciones que, el bisulfito de sodio reaccione y se reduzca el cromo hexavalente.

Los resultados obtenidos del ensayo de laboratorio para reducción de cromo hexavalente a trivalente se encuentran reportados en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Resultados del ensayo realizado para reducción del cromo hexavalente

Muestra	Cantidad de Bisulfito de sodio agregado (V _B ±0,01)ml	Potencial de óxido-reducción (POR±1)mV
1	1,50	230
2	2,00	255
3	2,50	280

A pesar de que las tres muestras logran mantener el potencial de óxido-reducción entre el rango buscado (200-300mV). Se obtiene que la muestra 3, con una dosificación de 2,50 ml a un pH de 2,5 presenta una variación significativa en la coloración, pasando esta de ser un amarillo



oscuro a un amarillo claro. Esto debido a la conversión del cromo hexavalente al cromo trivalente. Por esta variación en la coloración se escoge la muestra 3 como la mejor dosificación de bisulfito de sodio.

Precipitación del hidróxido de cromo y del hidróxido de Zinc

Al realizar las pruebas de jarras correspondientes para las aguas del tanque I que contiene cromo trivalente y zinc en solución, se obtuvo la dosificación del agente precipitante a usar. Se realizó la prueba de jarras con el propósito de determinar la eficiencia del uso de los dos agentes precipitantes hidróxido de sodio (soda cáustica) e hidróxido de calcio (cal). En la figura 4.8 se observa la distribución de las muestras a tratar dispuestas en el floculador. Estas son denominadas como T1A, T1B y T1C para el primer grupo de jarras correspondientes al análisis para la precipitación del hidróxido de cromo y el hidróxido de zinc usando como agente precipitante la soda cáustica.

El segundo grupo de jarras corresponden a las muestras T1D, T1E y T1F, este grupo se analizará con el fin de precisar el punto óptimo de precipitación de hidróxido de cromo e hidróxido de zinc. Los resultados de la prueba de jarras para el tanque I usando soda cáustica como agente precipitante, se encuentran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Dosis de reactivos utilizado en la prueba de jarras usando soda cáustica como agente precipitante.

Muestra	Volumen de NaOH (Vn±0,01) mL	Volumen de arpol (Va±0,01) mL	pH ±0,1	Peso del lodo (Pl±0,0001) g
T1A	0,50	0,20	6,5	0,5220
T1B	1,80	0,20	7,8	0,6160
T1C	2,50	0,20	8,5	1,3150
T1D	2,50	0,10	8,4	1,3220
T1E	2,50	0,25	8,6	1,4720
T1F	2,50	0,30	8,8	1,6160

Temperatura (28,0±0,1)°C

Volumen de la muestra: 500 mL



En la tabla anterior se muestran cuatro variables involucradas, el volumen de soda cáustica a usar representa la cantidad de reactivo necesario para que la reacción se lleve a cabo y todo el cromo trivalente se convierta en hidróxido de cromo, al igual que todo el zinc se convierta en hidróxido de zinc.

Se sabe con anterioridad (figura 2.8) que es indispensable obtener un pH tal que los hidróxidos formados no se redissuelvan, es por ello que otra variable expuesta en la tabla 4.13 es el pH de la muestra. Por lo que el pH de la reacción está directamente ligado a la cantidad de soda cáustica agregada. Con respecto al volumen de arpol agregado, éste viene relacionado con la cantidad de lodo producido. El arpol es el agente floculante el cual ayuda a la precipitación de los hidróxidos formados, por lo que su estudio es de gran importancia debido a las bajas velocidades de sedimentación del hidróxido de cromo y del hidróxido de zinc y la necesidad de obtener el máximo rendimiento en este proceso. Es práctica habitual el llevar a cabo una floculación previa, con el fin de reagrupar las partículas y compactarlas de tal forma que el tamaño de los floculos aumente y por consiguiente la velocidad de sedimentación sea mayor.

Una vez explicada la importancia de estudiar las variables reportadas en la tabla 4.13, se analizan los resultados obtenidos.

En la figura 4.8 se observan las diferencias que existen entre las muestras T1A, T1B y T1C. La primera contiene 0,50 mL de soda cáustica y 0,20 mL de arpol (tabla 4.13), en esta muestra no existe turbidez en comparación con la muestra T1B y T1C. A medida que se aumentó la cantidad de soda cáustica agregada (tabla 4.13) se obtuvo mayor turbidez en las muestras (figura 4.8). Mediante este grupo de jarras se dedujo que en la muestra T1C se encontraba la mayor cantidad de precipitado por lo que se realizó un segundo grupo de jarras donde se dejó constante la cantidad de soda y se varió la cantidad de arpol agregado.



Figura 4.8. Distribución de las muestras del grupo I en el floculador

Al aumentar el volumen de soda cáustica, el pH aumenta, logrando establecer su valor entre 6,5 y 9,0 dentro del cual se obtiene el rango óptimo esperado. Con respecto al volumen del arpol agregado, se comenzó con 0,2 mL ya que a partir de este valor se observó precipitados.

Se dejó constante en las primeras tres muestras para observar la dependencia del cambio en el pH con respecto al peso del lodo obtenido y se obtuvo que a medida que aumentó el pH también aumentó la cantidad de lodo producido, es decir, se obtuvo que en la muestra T1C se generó la mayor cantidad de lodo. Se dejó constante el volumen de NaOH agregado (2,5 mL) con el propósito de observar la cantidad de lodo que se produce variando el volumen de arpol y se encontró la mayor cantidad de lodo producido (1,6160 g) en la muestra T1F, esto se evidencia en la figura 4.9 donde se observa gran turbidez.

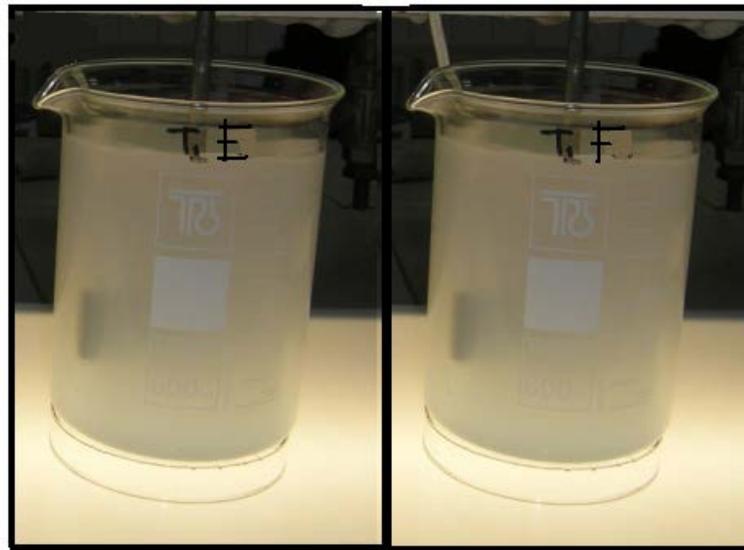


Figura 4.9. Distribución de las muestras del grupo II en el floculador

Una vez analizado los resultados de la prueba de jarras, se determinó la concentración tanto de cromo total como el zinc total (tabla 4.14) de los sobrenadantes de las muestra T1E y T1F ya que en éstos se obtuvo el mayor precipitado (tabla 4.13).

Tabla 4.14. Concentración de los contaminantes presentes en el sobrenadante de la solución del tanque I tratado con soda cáustica

Muestra	Concentración de cromo total (Ccr±0,4) ppm	Concentración de zinc (Czn±0,4) ppm
T1E	1,9	3,8
T1F	2,3	2,0

Valor de norma: cromo total 2 ppm, zinc 5 ppm

Se determinó que la solución que se encuentra dentro de los estándares previstos por la norma, corresponde a la muestra T1E. A partir de estos resultados se obtiene entonces que la cantidad de soda cáustica para una muestra de 500mL es de 2,5 mL y 0.25 mL de arpol (tabla 4.13), a usar para la precipitación mas eficiente en el tanque I, la cual logra adecuar a la norma la concentración de los contaminantes.

Los resultados de la prueba de jarras para el tanque I usando hidróxido de calcio (cal) como agente precipitante, se reportan en la tabla 4.15.



Tabla 4.15. Parámetros finales del grupo de jarra de la prueba del tanque I con Ca(OH)_2

Muestra	Volumen de Ca(OH)_2 ($V_n \pm 0,01$) mL	Volumen de arpol ($V_a \pm 0,01$) mL	pH $pH \pm 0,1$	Peso del lodo ($P_l \pm 0,0001$) g
T2A	1,90	0,20	6,8	0,8150
T2B	2,50	0,20	7,4	0,9930
T2C	3,30	0,20	8,3	1,0160
T2D	3,30	0,10	8,0	1,6760
T2E	3,30	0,25	8,4	1,8960
T2F	3,30	0,30	9,0	1,1140

Temperatura ($28,0 \pm 0,1$) °C

Volumen de la muestra: 500 mL

En lo que respecta a la verificación a nivel de laboratorio usando cal como agente precipitante, las muestras son denominadas T2A, T2B, T2C para el primer grupo y T2D, T2E y T2F para el segundo grupo de jarras.

De igual manera que usando soda cáustica, se varió la cantidad de cal agregada en las tres primeras muestras para observar la dependencia en el pH. Una vez obtenido que la muestra T2C genera la mayor cantidad de lodo (1,0160 g), se varió el volumen de arpol y se observó que en la muestra T2D y T2E se genera la mayor cantidad de lodo, todo lo anterior se encuentra reflejado en la tabla 4.15.

Se determinó la concentración de cromo total y zinc total para estas dos muestras (tabla 4.16) y los valores obtenidos son los siguientes. Cabe destacar que en ambas muestras se obtiene que la solución se encuentra dentro de los estándares previstos por la norma.

Tabla 4.16. Concentración de los contaminantes presentes en el sobrenadante de la solución del tanque I tratado con cal

Muestra	Concentración de cromo total ($C_{cr} \pm 0,4$) ppm	Concentración de zinc ($C_{zn} \pm 0,4$) ppm
T2D	1,7	4,8
T2E	1,8	3,0

Valor de norma: cromo total 2 ppm, zinc 5 ppm



Se obtuvo mediante los resultados de las pruebas que los dos agentes precipitantes son eficientes y llegan a adecuar a la norma la concentración de cromo total y zinc. Sin embargo, el uso de la cal generó mayor cantidad de lodos (tabla 4.15) lo cual representa una desventaja en el método ya que se debe tratar una mayor cantidad de residuos y adicionalmente se generan mayores gastos. Sin mencionar que a medida que aumenta en volumen de lodo, se hace difícil de adecuar posteriormente, ya que éste contiene sustancias peligrosas de tratar. Debe tenerse en cuenta que los fangos generados al contener hidróxido de cromo son calificados como residuos peligrosos, siendo su destino final vertederos de seguridad. De aquí la importancia de que la cantidad de lodo generado sea mínima.

Por lo antes expuesto y tomando en cuenta que la soda cáustica es el reactivo actualmente usado en la empresa y por tanto de fácil adquisición, se escogió este como reactivo precipitante.

En conclusión para una muestra de 500 mL se debe agregar 2,50 mL de soda cáustica y 0,25 mL de arpol (tabla 4.13) obteniendo 1,9 ppm de cromo total y 3,0 ppm de zinc (tabla 4.14) y 1,6160 g de lodo producido.

▪ Oxidación de cianuro

La forma más tóxica es el HCN (ácido cianhídrico), los cianuros se oxidan a cianato (CN^-) que es veinte veces menos tóxico que el cianuro (Jiménez, 2001). Se puede deducir el tipo de tratamiento que resulta efectivo para la disminución del cianuro, considerando sus características ácido base y redox. El ión cianuro es la base conjugada del ácido débil HCN. La acidificación de soluciones de cianuro origina la liberación del gas cianuro de hidrógeno venenoso y no es, por tanto, una buena solución al problema. (Baird, 2001).

Es importante tener en cuenta que el cianuro de hidrogeno tiene una presión de vapor relativamente alta, 100 Kpa a 26 °C, por lo cual se volatiliza con rapidez a condiciones ambientales, causando un decrecimiento en la concentración de cianuro en la solución (Pérez e Higuera, 2008). En la figura 4.10, se puede observar que a un valor de pH = 9.3 la mitad del cianuro total existe como HCN y la otra mitad como ión CN^- . Del mismo modo, a pH mayores que 9.3, el cianuro total se encuentra como ión CN^- y a pH menores como HCN. El punto que se encuentra mostrado en la figura 4.10 (punto A), representa las condiciones a las que se tiene que



ajustar el afluente a tratar (tanque II) para que todo el cianuro se oxide a cianato. El punto A se encuentra a un pH de 12 y cumple con un potencial de óxido-reducción (Eh) de 0,3 V.

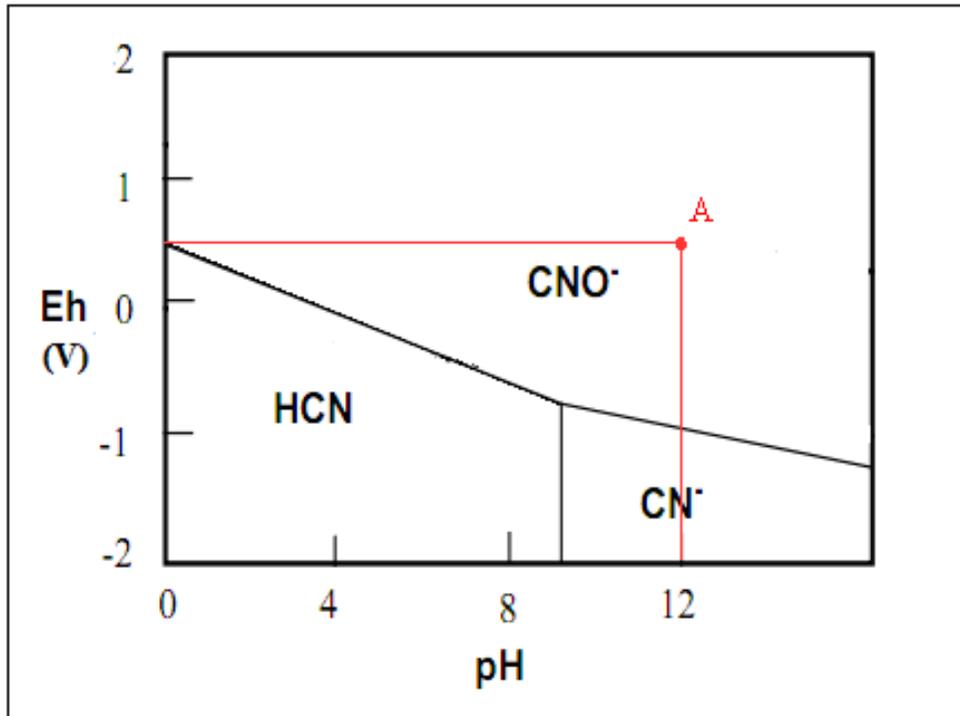


Figura 4.10. Diagrama potencial en función de pH para el CN^- a 25°C .
Fuente: Pérez e Higuera, 2008

Es conveniente entonces estudiar otra característica del cianuro correspondiente al potencial de oxidación-reducción. Como se puede observar en la figura 4.10, el potencial de óxido-reducción depende del pH de la solución y a su vez representa la conversión total o parcial del cianuro a formas menos tóxicas.

Es decir, la evaluación a nivel de laboratorio se realizó a pH 12 asegurando que todo el cianuro se encontraba como CN^- y no existirá la posibilidad de tener en solución el ácido cianhídrico que pueda volatilizarse y emanarse al ambiente produciendo daños a la salud del operario. Adicionalmente por lo encontrado en la figura 4.10, la oxidación de cianuro correspondiente a pH 12, debe darse a un valor de potencial de óxido-reducción cercano a 0,3 V o lo que es lo mismo 300 mV.



Los resultados del ensayo realizado en el laboratorio para la oxidación de cianuro se encuentran reportados en la tabla 4.17 donde se muestra la dependencia de la cantidad de agente oxidante, que en este caso es el hipoclorito de sodio, conclusión a la que se llegó en la propuesta de las tecnologías, con respecto al cambio en el potencial de óxido-reducción.

Tabla 4.17. Ensayo realizado a la muestra del tanque II para oxidación de cianuro

Muestra	Cantidad de hipoclorito de sodio agregado ($V_B \pm 0,01$)ml	Potencial de óxido-reducción (POR ± 1)mV
1	1,00	269
2	1,50	288
3	1,80	295

Mediante el análisis realizado se determinó que la dosificación de hipoclorito de sodio para la oxidación completa del cianuro es de 1,8 mL en 500 mL de muestra a tratar. Con este valor se alcanzó un potencial redox de 295 mV.

4.1.5. Diseño de un sistema de tratamiento a las aguas residuales del proceso de galvanoplastia en función de la tecnología seleccionada.

El diseño del sistema de tratamiento contempla una serie de pasos importantes. Éstos se distribuyeron en los objetivos desarrollados y se obtuvieron de cada uno de ellos toda la información necesaria y para luego ser ensamblada de manera de obtener el procedimiento para la adecuación del agua residual a tratar.

En la figura 4.11 se representa con un diagrama de bloques los pasos para realizar el diseño global del sistema de tratamiento.

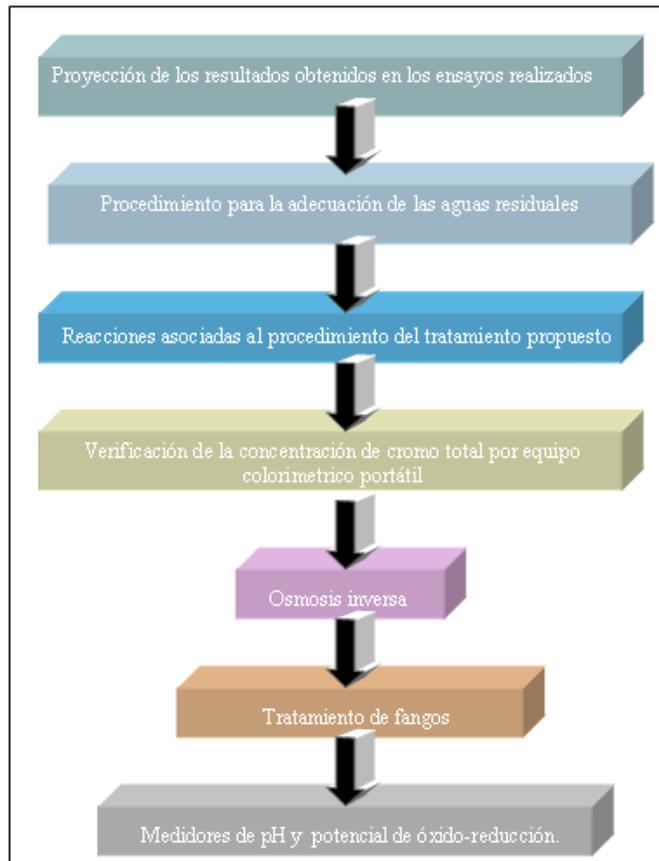


Figura 4.11. Representación esquemática de los pasos para el diseño del tratamiento de los efluentes generados en el área de galvanoplastia

▪ **Proyección de los resultados obtenidos en los ensayos realizados**

A manera de diseño, los parámetros para la operación del batch de 1500 L en la empresa se pueden apreciar a continuación, tomando en cuenta que la proyección realizada es netamente teórica ya que el proceso realizado es sencillo y no involucra muchas variables, los resultados obtenidos mostrarán valores teóricos aproximados a los reales. Con la finalidad de verificar estos valores, es necesario llevar a cabo a manera de ejemplo el procedimiento propuesto haciendo uso de los valores obtenidos de las proyecciones teóricas realizadas. Se observa en la tabla 4.18 los valores teóricos encontrados a partir de los resultados experimentales realizados. Allí se muestra que efectivamente el potencial redox se encuentra en el rango de operación explicado anteriormente y que este viene dado en función del pH.



Lo anterior muestra que el volumen a añadir al reactor instalado en la empresa para disminución de cromo hexavalente es de 7,5 L aplicando los valores de pH y potencial de óxido-reducción obtenidos.

Tabla 4.18. Parámetros proyectados para la reducción del cromo en el tanque I

Reducción de cromo VI a cromo III		
Volumen de bisulfito de sodio proyectado (V_B) L	pH de operación (pH_o) adim	Potencial de oxido-reducción (Ev) mV
7,5	2,5	280

La tabla 4.19 muestra que el pH debe mantenerse en 8,6 para realizar una efectiva precipitación de hidróxido de cromo e hidróxido de zinc utilizando 7,5 L de soda cáustica como agente precipitante y 750 mL de arpol. Cabe destacar que estos valores son diferentes a los encontrados en el tratamiento actual, resaltando que en este caso se obtuvo una menor cantidad de arpol a usar.

En el tratamiento actual realizado se usa 4 L de arpol como floculante, estos resultados proponen disminuir este volumen en un 80 % lo cual influye drásticamente en la cantidad de floculante utilizado, por ende, se obtiene un ahorro en los gastos que esto implica

Tabla 4.19. Parámetros proyectados de los resultados de la prueba de jarras para precipitación de hidróxidos metálicos presentes en tanque I.

Precipitación de $Cr(OH)_3$ y $Zn(OH)_2$			
Volumen de Soda caustica proyectado (V_N) L	Volumen de arpol proyectado (V_A) mL	pH de operación (pH_o) adim	Peso del lodo proyectado (P_L) Kg
7,5	750	8,6	4,416

Con respecto a los valores proyectados para la oxidación del cianuro, los resultados se representan en la tabla 4.20. Allí se observa que la cantidad de hipoclorito necesario para llevar el potencial de óxido-reducción a un valor cercano a 300 mV corresponde con una dosificación de 5,4 L a un batch de 1500 L.



Tabla 4.20. Parámetros proyectados para la oxidación de cianuro en el tanque II

Oxidación de cianuro		
Volumen de hipoclorito de sodio proyectado (V_H) L	pH de operación (pH_o) adim	Potencial de oxido-reducción (Ev) mV
5,4	12	295

▪ **Procedimiento para la adecuación de las aguas residuales procedentes del área de galvanizado.**

Después de obtener todos los parámetros necesarios para llevar a cabo el tratamiento del agua residual generada en el área de galvanizado, se realizó un esquema de los pasos a seguir para llevar a cabo el tratamiento. Adicional al procedimiento esquematizado se realizó la explicación detallando las variables de diseño y las reacciones que ocurre en cada paso del tratamiento de las aguas.

En las figuras 4.12 y 4.13 se observa que principalmente el ajuste del pH y la reacción redox tienen lugar en el mismo reactor. Estos procesos deben realizarse en automático, con el fin de garantizar la calidad del efluente final del proceso. Los sistemas de medida y control serán el pH y el potencial de óxido-reducción, por lo que se debe adquirir en la empresa medidores de estos parámetros.

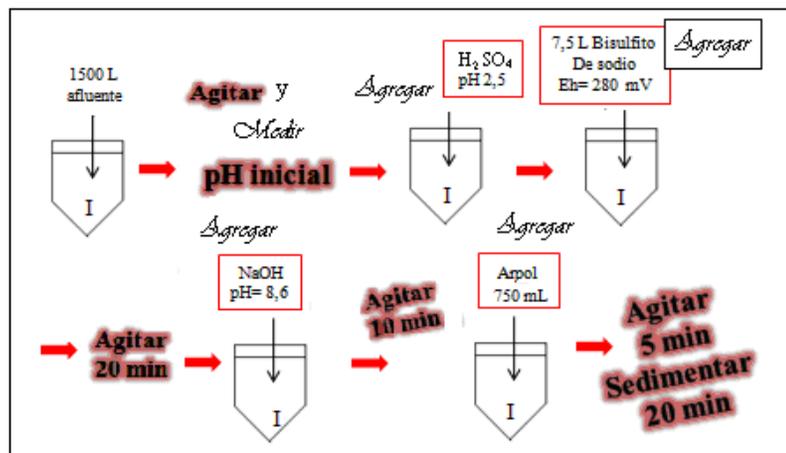


Figura 4.12 Representación esquemática del proceso de tratamiento de las aguas residuales para el tanque I



La figura 4.12 muestra que inicialmente se llena el tanque I con 1500 L de agua a tratar, se agita por unos segundos para homogeneizar, se mide el pH inicial del agua. Se agrega ácido sulfúrico con el fin de disminuir el pH hasta un valor de 2,5. Seguidamente se agrega 7,5 L de bisulfito de sodio hasta alcanzar un potencial de óxido-reducción de 280 V. esto para reducir el cromo hexavalente a cromo trivalente. Dejar en agitación por 20 minutos, transcurrido el tiempo se agrega soda cáustica hasta obtener un pH de 8,6. Se deja en agitación por 10 minutos mas, se agrega 750 mL de arpol para ayudar a la precipitación de los hidróxidos formados. Transcurridos 5 minutos de agitación se deja sedimentar por 20 minutos.

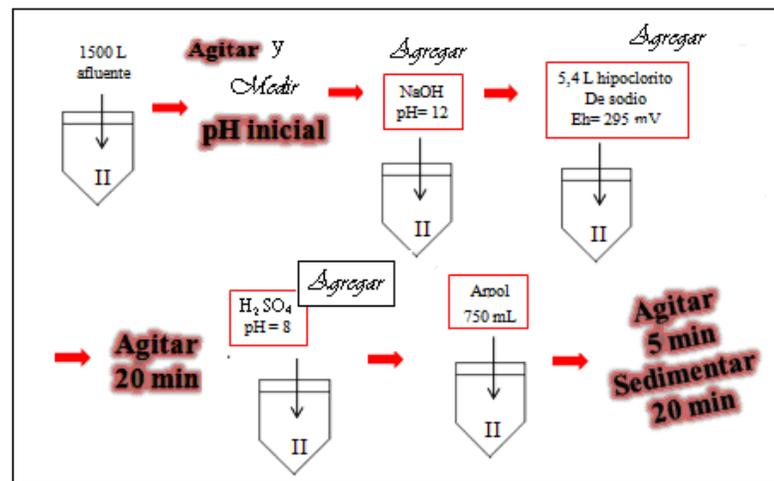


Figura 4.13 Representación esquemática del proceso de tratamiento de las aguas residuales para el tanque II

En la figura 4.13 se indican los pasos a seguir para el tratamiento del tanque II. Como primer paso se llena el tanque con 1500 L de afluente a tratar. Se agita por unos segundos para homogeneizar y se mide el pH inicial del agua. Se agrega soda cáustica hasta alcanzar un pH de 12, luego se agrega 5,4 L de hipoclorito de sodio hasta alcanzar un potencial de óxido-reducción de 295 mV. Se deja en agitación por 20 minutos. Se agrega ácido sulfúrico para disminuir el pH a 8 para luego agregar 750 mL de arpol como agente floculante. Transcurridos 5 minutos de agitación se deja sedimentar por 20 minutos.

▪ **Reacciones asociadas al procedimiento del tratamiento propuesto**

Como se mostró anteriormente las figuras 4,11 y 4.12 representan esquemáticamente el procedimiento propuesto para la adecuación de concentración de cromo total, zinc total y cianuro

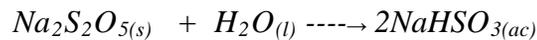


total. Este procedimiento se estableció a partir de todos los resultados de los ensayos realizados a nivel de laboratorio. A cada paso del nuevo tratamiento se encuentra asociada una reacción química, es por ello que adicionalmente luego de diseñar el procedimiento del tratamiento propuesto, se debe identificar las reacciones que ocurren y así avalar mediante reacciones químicas los cambios realizados al tratamiento actual.

~ **Reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente**

Las reacciones redox que ocurren con el uso del bisulfito de sodio son:

- * Hidrólisis del $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ utilizado como reactivo



- * Formación del anhídrido crómico

El anhídrido crómico se forma al agregar ácido sulfúrico concentrado a un cromato o un dicromato.



- * Reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente



Eh= 280 mV

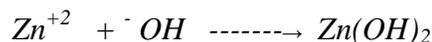
~ **Precipitación de los hidróxidos**

El proceso de precipitación de metales pesados se lleva a cabo de forma generalizada para la formación de los hidróxidos metálicos correspondientes

- * Precipitación de hidróxido de cromo



- * Precipitación del hidróxido de zinc

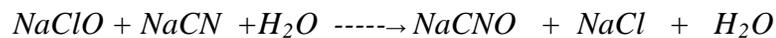




~ **Oxidación de cianuro**

La siguiente reacción al igual que la reducción del cromo consiste en una reacción redox donde inicialmente el cianuro es oxidado a cianato y posteriormente a anhídrido carbónico.

- * Primera fase: la velocidad de oxidación de cianuro a cianato aumenta con el pH y exceso de cloro. El hipoclorito de sodio en medio acuoso reacciona con el cianuro de sodio presente formando cianato de sodio y cloruro de sodio.



El pH de la reacción debe mantenerse elevado para mantener la cinética de la reacción y evitar la formación de gases tóxicos como HCN (figura 4.10).

- * Segunda fase: la reacción depende del pH y el tiempo de reacción. El cianato de sodio reacciona con el exceso de hipoclorito de sodio produciendo anhídrido carbónico, nitrógeno y cloruro de sodio.



En este caso la cinética de la reacción aumenta según disminuye el pH ligeramente alcalino (8-8,5).

▪ **Verificación de la concentración de cromo total por equipo colorimétrico portátil.**

Después de obtener las variables proyectadas de la cantidad de reactivo a usar y diseñar el procedimiento paso a paso se llevó a cabo el tratamiento en la empresa. Se tomó una muestra del sobrenadante del tanque I y se determinó la concentración de cromo contenida. Para ello se usó un equipo colorimétrico encontrado en la empresa, esto para asegurar que mediante los cambios realizados en el procedimiento de tratamiento se logra adecuar a la norma la concentración de cromo, ya que no se cuenta con equipos colorimétricos para los otros contaminantes, se logra al menos determinar si el nuevo procedimiento adecua a la norma la cantidad de cromo total.



Se realizó paso a paso lo establecido en la metodología, una vez transcurridos 5 minutos se observó el cambio de color de la solución contenida en el tubo de ensayo (T2) y como se observa en la figura 4.14, el color obtenido es rosado oscuro. El otro tubo de ensayo (T1) contiene la muestra tratada la cual sirve de comparación al colocarla en el equipo colorimétrico.

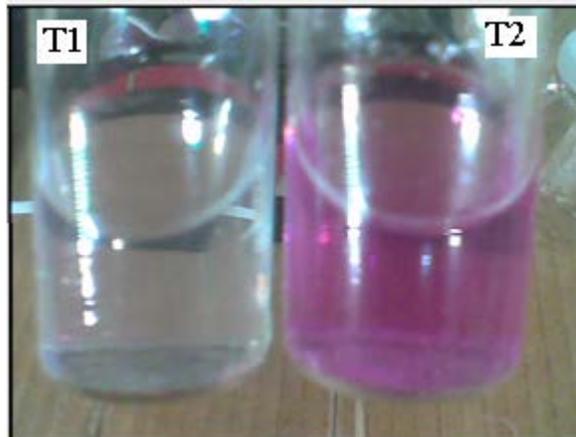


Figura 4.14. Coloración del sobrenadante del tanque I en el primer tratamiento

Se tiene en la figura 4.15 se observa que el color de la escala que concuerda con la coloración obtenida en el tubo de ensayo es el correspondiente a 0,35 ppm de concentración de cromo total.

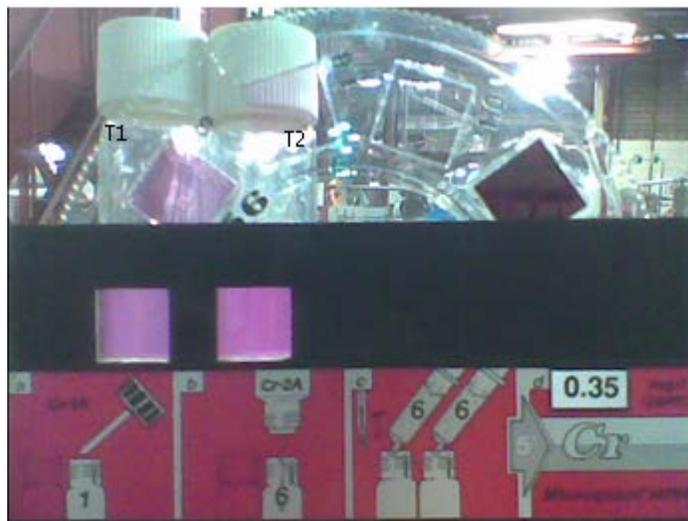


Figura 4.15. Escala colorimétrica y concentración del cromo total en el sobrenadante del tanque I en el primer tratamiento



Se descargaron los reactores, y se repitió el procedimiento de tratamiento propuesto, se encontró una coloración diferente (figura 4.16) al agregar al sobrenadante del tanque I, contenido en los tubos de ensayo, los reactivos necesarios para llevar a cabo la determinación de la concentración de cromo total mediante el equipo colorimétrico portátil. Se observa una coloración mas clara con respecto a la anterior (figura 4.14). El color que se obtiene es un rosado claro.

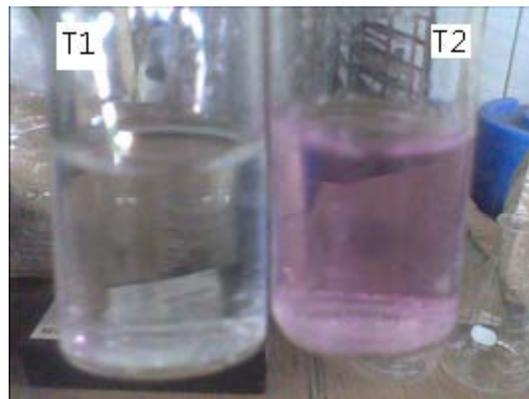


Figura 4.16. Coloración del sobrenadante del tanque I en el segundo tratamiento

El correspondiente valor en la concentración del cromo total para el cambio de color obtenido en la figura 4.16, esta representado en la figura 4.17 donde nuevamente se observa la escala colorimétrica y se obtiene el valor que corresponde a dicha coloración la cual fue de 0.1 ppm de cromo total.

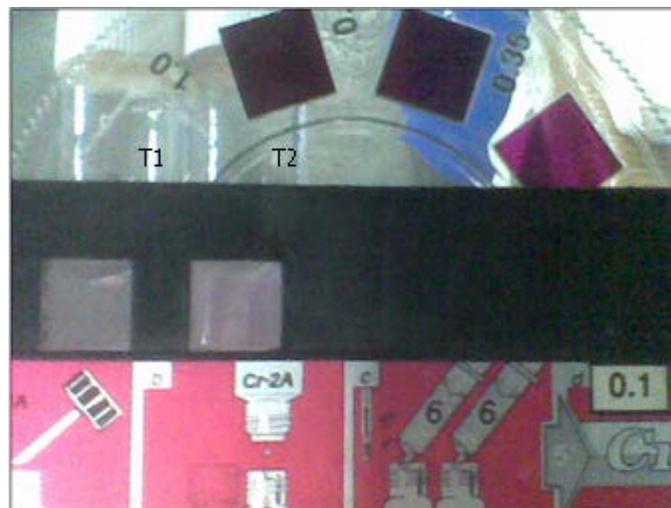


Figura 4.17. Escala colorimétrica y concentración del cromo total en el sobrenadante del tanque I en el segundo tratamiento



Se obtuvo una diferencia en la concentración de cromo de 0,1 ppm con respecto a la concentración obtenida en el primer tratamiento 0,35 ppm. A pesar de no reportarse el mismo valor en la concentración de cromo, se observa que ambos poseen una concentración por debajo de la norma.

A continuación en la tabla 4.21 se muestra el resultado del análisis realizado por un laboratorio especializado para el sobrenadante del tanque I una vez ejecutado el nuevo tratamiento. Este análisis contempla el estudio de los siguientes parámetros: cromo total, zinc y sulfatos, los cuales son los contaminantes presentes en dicha agua.

Tabal 4.21. Resultados de análisis fisicoquímicos para efluente del tanque I después de realizar el nuevo tratamiento

Parámetros (ppm)	Efluente tanque I	Norma
Cromo total	0,27	2,0
Sulfatos	182	400
Zinc	4,81	5,0

Fuente: Cemproaca, C.A.

Fecha: 21-03-2011

Se observa en la tabla anterior la comparación entre el valor de los parámetros encontrados en el efluente del tanque I luego de realizar el nuevo tratamiento. Los tres parámetros estudiados se encuentran por debajo de las exigencias establecidas en la norma. Se concluye que el tratamiento propuesto adecua eficientemente a la norma la concentración de los contaminantes.

Cabe destacar que inicialmente una propuesta para mejorar el tratamiento actual realizado en la empresa radicaba en el hecho de tratar los sulfatos presentes en el efluente. Sin embargo con los resultados encontrados en la tabla 4.21 se concluye que con los cambios realizados para la reducción del cromo hexavalente, se logra adecuar a la norma la concentración de sulfatos. Esto debido a que el agente reductor propuesto es el bisulfito de sodio y el ión sulfato se produce en la reacción para la reducción de cromo hexavalente. Ajustando todas las variables necesarias (pH y potencial de óxido-reducción) para que se lleve a cabo esta reacción eficientemente, se obtienen cantidades de sulfatos que no sobrepasan los límites permisibles por el decreto 3219, por lo que no es necesario tratar adicionalmente la concentración de sulfatos presentes en el agua.



▪ **Osmosis inversa**

La osmosis inversa es una técnica muy útil y bien desarrollada para la purificación y desalinización del agua. Consiste en forzar el agua a través de una membrana semipermeable que permite su paso pero no el paso de otro material. La capa de agua es forzada a través de los poros en la membrana bajo presión. El diámetro del poro para la separación óptima debe ser dos veces el espesor de la capa de agua (Manahan, 2007).

El diseño para el proceso de membrana a utilizar se basó en la determinación del caudal de operación, ya que esta variable junto con la concentración de sólidos totales encontrada en los análisis del agua residual, generan los parámetros importantes para el dimensionamiento del equipo.

Mediante un balance de masas y un balance por componente del volumen de control mostrado en la figura 3.5, se obtiene que para una concentración de 2860 ppm de sólidos totales (tabla 4.5), el caudal de operación a tratar por el equipo de osmosis inversa es de 1,4 m³/h. (el cálculo de esta variable se encuentra reportado en el apéndice A).

Para la obtención del equipo de osmosis inversa se debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- ~ Caudal de operación QOI: 1,4m³/h
- ~ Concentración de sólidos a la entrada: 2860 ppm

Existen en el mercado diferentes equipos de osmosis inversa. A continuación se muestran dos ejemplos que cumplen con las especificaciones antes mencionadas. La elección de uno u otro equipo depende de los requerimientos, mas que todo económicos, que posee la empresa.

• **Osmosis inversa ROHD 800 a 9600 L/h**

Este equipo presenta las siguientes características:

- Funcionamiento automático.
- Completamente ensamblados en estructura de acero inoxidable.



- Incluye filtración protección 5 micras.
- Bomba de presión en acero inoxidable AISI-316.
- Membranas poliamida TFC.
- Rotámetros.
- Válvulas de regulación.
- Tuberías de alta presión en acero inoxidable AISI-316.
- Límites de presión de trabajo 0,5 – 3,5 °C.
- Temperatura de trabajo 5 °C a 35 °C.

Este equipo posee un amplio rango de operación con respecto al volumen de agua a tratar, y posee una concentración máxima de sólidos totales a tratar de 3000 ppm, por lo que este equipo cumple con todas las características necesarias requeridas para este estudio.

- **Osmosis inversa RVO**

Las características más relevantes de este equipo son las siguientes:

- Funcionamiento automático.
- Completamente ensamblados en estructura de acero inoxidable.
- Incluye filtración protección 5 micras.
- Bomba de presión en acero inoxidable.
- Membranas poliamida TFC.
- Microprocesador.
- Rotámetros.
- Válvulas de regulación.
- Tuberías de alta presión en acero inoxidable.
- Bomba en acero inoxidable para trabajar con aguas de alta salinidad.
- Límites de presión de trabajo 0,5 – 3,5 °C.
- Temperatura de trabajo 5 °C a 35 °C.

Adicional a estas características, este equipo posee una capacidad de operación de 280 L/h a 2400 L/h cumpliendo con esto a las especificaciones encontradas para la instalación del



proceso de membrana correspondiente a un caudal de operación de 1400 L7h y 2860 ppm de sólidos totales.

▪ **Tratamiento de fangos**

Los resultados de la construcción de la matriz de selección para la escogencia de la mejor tecnología para la adecuación de los lodos (objetivo 3) dieron como resultado que la mejor tecnología viene dada con la implantación de los sacos filtrantes para la recogida de los lodos junto con la implantación de las eras de secado para completar la deshidratación de los lodos. Estos resultados se deben a que el costo de implantación de esta tecnología no es muy alto y el porcentaje de sequedad obtenido está alrededor del 35 al 40 %, siendo este último el parámetro más importante para la selección.

Una era de secado consiste en un lecho de arena sobre el que se vierte el lodo, teniendo lugar dos efectos complementarios:

- * **Primera etapa:** deshidratación por filtración del agua sobre la arena. Esta fase suele durar aproximadamente dos días y es en la que se pierde la mayor cantidad de agua.
- * **Segunda etapa:** evaporación de una parte del agua ligada al lodo por la acción del sol y del aire. Esta fase es mucho más lenta y puede tardar entre 5 y 10 días.

Las eras de secado consisten en una superficie de arena soportada sobre otros materiales más gruesos y que dispone en su fondo de una tubería drenante para recogida de líquido filtrante. Teniendo en cuenta la figura 4.18. Se observa que el lecho de secado tiene generalmente una forma rectangular.

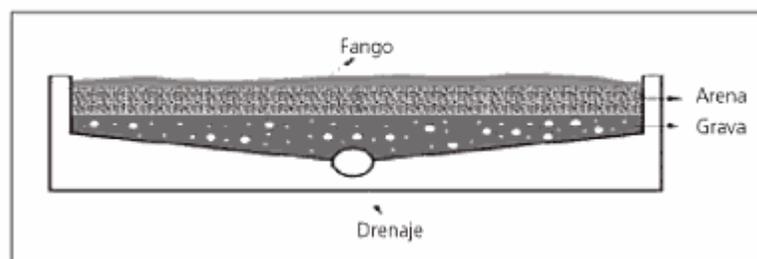


Figura 4.18. Esquema de una era de secado
Fuente: Sainz, 2005.



Una vez obtenida la información acerca de la forma característica de las eras de secado y las etapas que se realizan para llevar a cabo el secado del lodo, se realiza el diseño correspondiente para las eras de secado.

~ **Diseño de la era de secado**

El diseño de la era de secado consiste en determinar el área necesaria para la disposición de la cantidad de lodo generado en la empresa. Se establecen varios parámetros de estudio entre los cuales se tiene:

- Obtención del área
- Dimensionamiento
- Materiales de construcción

Como primer parámetro importante a determinar se tiene:

Obtención del área

El volumen máximo de lodo a secar será el recogido de los reactores (tanque I y tanque II), la cantidad de lodo correspondiente para el tanque I viene dado por los resultados de las proyecciones obtenidos en la Tabla 4.19. (4,416 Kg de lodo por batch). Con respecto a la cantidad de lodo producido por el tanque II, se mantuvo el promedio de lodo que se genera actualmente, este corresponde a 1,600 Kg/día aproximadamente. La cantidad de lodo total a disponer en las eras de secado será la sumatoria del lodo producido por los reactores, correspondientes a 6 Kg por batch aproximadamente.

Cabe destacar que se realizan de 2 a 3 tratamientos por día por lo que la cantidad diaria de lodo producido será de 18 Kg/día o lo que es lo mismo 6120 Kg/año siendo 340 días un año laboral. Para obtener el área total del lecho se utilizó la ecuación IX (apéndice A) y el resultado fue de 61,2 m². Este valor representa el área necesaria para la instalación de las eras de secado.



Dimensionamiento

Para definir el largo y el ancho de las eras de secado no se tiene un criterio fijo, teniéndose más en cuenta la disposición del terreno para fijarlos, sin embargo de acuerdo a (Romero, 1999) se recomienda construir mínimo dos eras de secado. Para un área menor a 100 m^2 lo más conveniente es construir 2 eras de secado, pues esto facilitará las labores de recolección del lodo seco. Las dimensiones unitarias habituales de las eras son de 6 m de ancho y unas longitudes de entre 6 – 12 m (Sainz, 2005). Teniendo esto en cuenta cada era tendrá 31 m^2 de área. Manteniendo las dimensiones habituales cada era de secado será de 10 m de largo y 3.1 m de ancho. La figura 4.19 muestra las dimensiones de las eras de secado correspondiente al área obtenida. Las eras tendrán una profundidad de 1 m, de los cuales 10 cm. son para el tubo colector (drenaje), sobre el cual se dispondrán 10 cm. de grava gruesa con un tamaño entre $3/8$ de pulgada y $3/4$ de pulgada, encima de estos se pondrán 10 cm. de grava de un tamaño entre $1/8$ de pulgada y $3/8$ de pulgada, para terminar con 30 cm. de arena fina (0,5 – 0,9) mm, quedando 40 cm. de los cuales se usarán 30 cm. para la el secado de lodos y 10 cm. de borde libre.

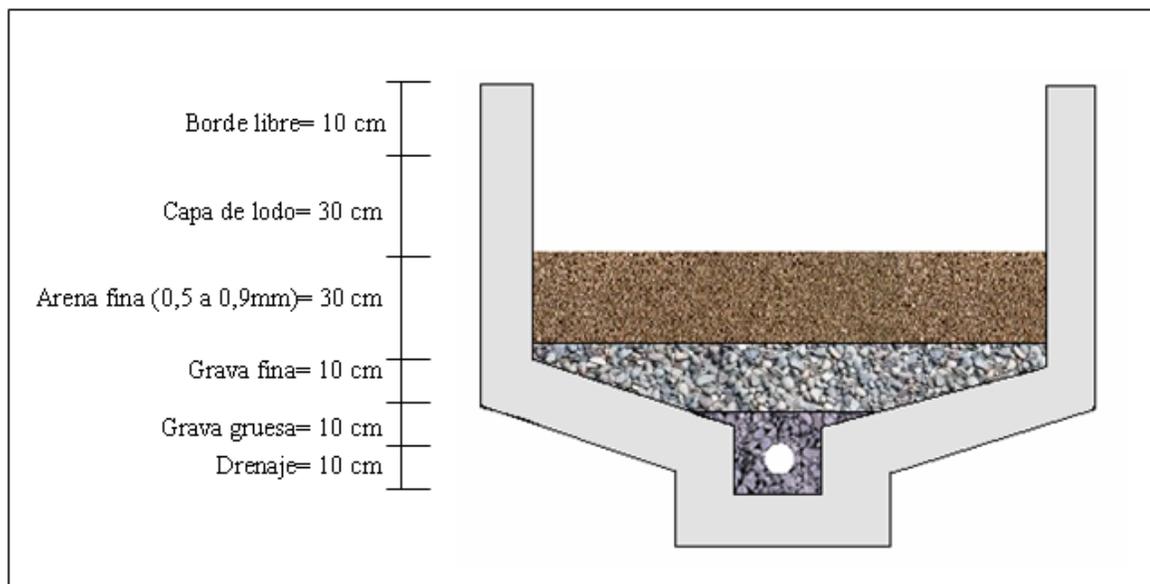


Figura 4.19. Dimensiones de la era de secado a implantar en la empresa



Para el drenaje se dispone en las eras un falso fondo con una pendiente del 1% con respecto al ancho y un tubo colector en el centro de la misma. Los valores de la pendiente, tamaño de la tubería de drenaje y tamaños de la arena y la grava son recomendados por la bibliografía consultada (Romero, 1999).

Costo asociado

La empresa busca mejorar a corto plazo el tratamiento actual que se realiza a los afluentes generados en el área de galvanoplastia. Es por esta razón que se especifica a continuación un aproximado al costo de implantación de los equipos propuestos. Las eras de secado poseen un bajo costo de implantación por ser fáciles de construir. Los materiales a usar son básicos en el ámbito de la construcción (bloques, cemento, arena, grava y tubería) los costos asociados dependen de la cantidad que se requiera para la construcción de la era, sin embargo, los costos individuales (2,9 Bs. 20,0 Bs. 7,0 Bs. 4,0 Bs y 40,0 Bs) orientan hacia el costo total en materiales. No se toma en cuenta el costo por mano de obra. Con respecto a la implantación de la osmosis inversa es necesario adquirir una membrana, una bomba multipazos de acero inoxidable, un filtro pre-osmosis, dos manómetros, una válvula de presión, la estructura y el tablero. Todos estos materiales tienen un costo aproximado de 14.000 Bs. No se toma en cuenta el costo por mano de obra para la instalación del equipo, ni los materiales adicionales necesarios para la implantación como herramientas.

Es importante resaltar que todos estos costos varían con el tiempo y que los establecidos en esta sección viene dado por presupuestos realizados en fecha junio 2011. La empresa deberá realizar un presupuesto más amplio donde se exprese la mano de obra requerida y la cantidad de materiales necesarios para la construcción e implantación de los equipos, sin embargo, con un aproximado se puede mostrar que el costo asociado no es muy alto, esto debido a que dando como ejemplo la era de secado, una vez implantada solo se tendrá costos por mantenimiento ya que es una obra que no necesita ser sustituida. Con respecto a la osmosis es un equipo que a pesar de necesitar una sustitución de las membranas terminada su vida útil, el equipo se mantiene instalado. Las mejoras que se obtiene en el proceso son altas por lo que, el costo que involucre la implantación de estos equipos se verá reflejado en ahorros a largo plazo los cuales vienen dado por las posibles multas impuestas si no cumplen las leyes ambientales pertinentes.



▪ **Medidores de pH y potencial de oxido-reducción**

Muchas de las operaciones a realizar en el tratamiento del agua de la empresa requieren del ajuste específico de algunas variables importantes como lo son en este caso en potencia redox y el pH. Como se habló anteriormente, tanto la reducción de cromo hexavalente como la oxidación de cianuro requieren de valores específicos de potencial redox y de pH, por lo que la empresa debe adquirir un equipo especialmente calificado para la determinación de estas variables de manera confiable en cualquier instante de tiempo.

En el mercado existe una clasificación extensa de estos medidores y la escogencia de uno u otro va a depender de los requerimientos de la empresa. Entre los medidores que cumplen con los requerimientos se tiene:

- ~ **pH-metro de pH PCE-228**
- ~ **Medidor de potencial Redox ORP**
- ~ **Medidor de pH PCE-PH 22**

A continuación se definen de manera detallada los equipos antes mencionado, mostrando sus características mas importantes.

~ **pH-metro de pH PCE**

Este pH-metro PCE-228 de mano es de muy fácil manejo para medir pH / mV / °C (figura 4.19) En el pH-metro los valores de pH y la temperatura pueden ser almacenados directamente en la tarjeta de memoria SD (formato Excel) o, mediante la interfaz RS-232 puede transmitir los valores directamente al PC. La compensación de temperatura se realiza de manera manual o automática por medio de un sensor de temperatura. Todo ello proporciona una medición de pH de gran fiabilidad. El pH-metro tiene una calibración de tres puntos que se puede realizar de forma automática (figura 4.20). Con el pH metro combinado se pueden determinar el valor de pH, la temperatura o el potencial REDOX (POR). El pH-metro se alimenta con baterías. En la tabla 4.22 se muestran las especificaciones técnicas del equipo.



Figura 4.20. Equipo de medición de pH tipo 1
Fuente: PCE Group, 1999.

En la figura anterior se muestra un equipo de medición de pH con adaptación de dispositivo para medir potencial redox el cual posee las siguientes características:

- Mide pH, redox y temperatura.
- Alta precisión.
- Indicación de batería baja.
- Gran pantalla LCD.
- Manejo sencillo.
- Carcasa robusta.
- Incluye electrodo de pH PE 03 y sensor de temperatura de acero noble.
- Calibración automática.
- Compensación de temperatura automática o manual.



Tabla 4.22. Especificaciones técnicas del medidor pH PCE-228

Especificaciones técnicas	
Rangos de medición	0,00 - 4,00 pH
	(-1999 – 1999) mV (sólo con el electrodo REDOX opcional)
	0,0 - 65,0 °C (sólo el sensor de temperatura)
Resolución	0,01 pH
	1 mV
	0,1 °C
Precisión (a 20°C)	± (0,02 pH + 2 dígitos)
	± (0,5 % + 2 dígitos)
	±0,5 °C
Calibración	calibración automática de tres puntos
Compensación de temperatura	automática de 0 - 65°C o manual entre 0 y 100°C retirando el sensor de temperatura
Electrodo	electrodo de pH PE-03 relleno de gel, cable de 1 metro y clavija BNC rango de temperatura: 0 - 60 °C
Peso	490 g

Fuente: PCE Group, 1999.

~ **Medidor de potencial Redox ORP, para medir el potencial de oxidación o de reducción de una solución**

Este medidor de potencial Redox se presenta como una solución sencilla y económica para medir este parámetro del agua (figura 4.21). El medidor de potencial Redox cuenta con todas las propiedades que se pueden requerir a un sencillo aparato para medir el potencial de oxidación o de reducción de una solución. La oxidación / reducción de una solución es la capacidad que tiene de absorber o emitir sus sales diluidas. Este parámetro cobra especial importancia en el tratamiento del agua y en balnearios o piscinas, especialmente para comprobar el poder desinfectante del cloro. Cuanto más positivos sean los valores de medición, mejor será el proceso de regeneración del agua.



Figura 4.21. Equipo de medición de potencial de oxido-reducción tipo 2
Fuente: PCE Group, 1999.

En la figura anterior se muestra un equipo de medición de potencial redox y las especificaciones técnicas del equipo se encuentran en la tabla 4.23. Las características de este equipo son:

- Rango de medición de ± 999 mV.
- Aparato manejable con carcasa estable.
- Electrodo Redox integrado con hilo de platino.
- Sencillo manejo.
- Proporciona valores seguros y fiables.

Tabla 4.23. Especificaciones técnicas del equipo de medición de potencial redox

Especificaciones técnicas	
Rango de medición	± 999 mV
Resolución	1 mV
Precisión	± 5 mV
Calibración	-
Compensación de temperatura	-
Condiciones ambientales	0 - 50 °C / 95 % H.r.
Alimentación	4 baterías de 1,5 V
Dimensiones	175 x 41 x 23 mm
Peso	78 g

Fuente: PCE Group, 1999



~ **Medidor de pH PCE-PH 22**

Medidor para la medición simultánea del valor pH y temperatura

El medidor de pH resistente al agua detecta de forma rápida y precisa el valor de pH y la temperatura (figura 4.22). Gracias a la indicación doble, ambos valores se muestran simultáneamente. En este medidor de pH el electrodo está integrado en la carcasa y los valores de medición se ajustan gracias a la compensación de temperatura automática.



Figura 4.22. Equipo de medición de potencial de oxido-reducción tipo 3
Fuente: PCE Group, 1999.

En la figura anterior se muestra un equipo de medición, en la tabla 4.24 se muestra las especificaciones técnicas del equipo de potencial redox el cual posee las siguientes características:

- Indicación simultánea del valor pH y la temperatura: no es necesario disponer de un termómetro por separado.
- compensación de temperatura automática.
- indicación de temperatura (°C, °F).
- función mín, máx, y retención de datos.
- registrador de datos de 100 valores (recuperables en pantalla)
- calibración automática: le ahorra tiempo y le suministra una alta precisión.
- desconexión automática.



Tabla 4.24. Especificaciones técnicas del equipo de medición pH PCE-PH 22

Especificaciones técnicas	
Rangos de medición	0,0 - 14,0 pH (-5 - +80,0) °C
Resolución	0,01 pH 0,1 °C
Precisión	± 0,02 pH ± 0,8 °C
Calibración	automática en pH 4,7 o 10
Compensación de temperatura	(-5+80) °C
Pantalla	pantalla LCD de 4 dígitos
Condiciones ambientales	0+ 60 °C / <80 % H.r.
Dimensiones	186 x 40 mm
Alimentación	4 baterías de 1,5 V AAA (incluidas)
Peso	130 g

Fuente: PCE Group, 1999

La escogencia de uno u otro equipo va a depender de la empresa. Esto ya que los tres equipos cumplen con los requerimiento operacionales de medición. La variable de escogencia viene dada por el costo que implica la adquisición de uno u otro equipo. Variable que determinará la empresa.



APENDICE A

CÁLCULOS TÍPICOS

A.1. Volumen de los reactores encontrados en el proceso actual de tratamiento de las aguas

Para el cálculo del volumen del reactor es necesario obtener las dimensiones del mismo, estos valores se encuentran reportados en la tabla 4.1 a continuación se procedió a determinar el volumen del reactor.

Volumen de la parte cúbica:

$$V_c = L * A * H \quad (\text{Roldán, 2005}) \quad (\text{I})$$

donde:

V_c : Volumen del cubo (cm^3)

L : Largo del cubo (cm)

A : Ancho del cubo (cm)

H : Alto del cubo (cm)

Cálculo del error:

$$\Delta V_c = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta H}{H} \right) * V_c \quad (\text{Guerrero, 2007}) \quad (\text{II})$$

Volumen de la parte piramidal:

$$V_p = \frac{L * A * H}{3} \quad (\text{Roldán, 2005}) \quad (\text{III})$$

donde:

V_p : Volumen de la pirámide (cm^3)

L : Largo de la pirámide (cm)

A : Ancho de la pirámide (cm)

H : Alto de la pirámide (cm)

Sustituyendo en I se tiene que:

$$V_c = (115\text{cm}) * (115\text{cm}) * (115\text{cm})$$



$$V_c = 1520875 \text{ cm}^3$$

$$V_c = 1520,875 \text{ L}$$

Sustituyendo en III se tiene que:

$$V_p = \frac{(115 \text{ cm}) * (115 \text{ cm}) * (120 \text{ cm})}{3}$$

$$V_p = 529000 \text{ cm}^3$$

$$V_p = 529 \text{ L}$$

Sustituyendo en II

$$\Delta V_c = \left(\frac{1 \text{ cm}}{115 \text{ cm}} + \frac{1 \text{ cm}}{115 \text{ cm}} \frac{1 \text{ cm}}{115 \text{ cm}} \right) * 1520,875 \text{ L}$$

$$\Delta V_c = 39.68 \text{ L}$$

$$\Delta V_c = 40 \text{ L}$$

Por lo que el volumen viene expresado de la siguiente manera:

$$V_t = V_c + V_p$$

$$V_t = 1520,875 \text{ L} + 529 \text{ L}$$

$$V_t = 2049,875 \text{ L}$$

$$V_t = (2050 \pm 40) \text{ L}$$

A.2 Caudal de operación de los tanques de enjuague del proceso de galvanizado

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Creus, 2005}) \text{ (IV)}$$

donde:

Q : caudal de operación (L/s)

V : volumen del tobo (L)

t : tiempo de llenado del tobo (s)



- **Calculo del error**

$$\Delta Q = \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta t}{t} \right) * Q \quad (\text{Guerrero, 2007}) (V)$$

donde:

ΔQ : Error del caudal de operación (L/s)

ΔV : Error del volumen del tobo (L)

Δt : Error del tiempo de llenado del tobo (s)

Sustituyendo en la ecuación I los valores correspondientes para el tanque 3, se tiene que:

$$Q = \frac{2,00L}{38,00s}$$

$$Q = 0,0526 \frac{L}{s}$$

Calculando el error:

$$\Delta Q = \left(\frac{0,25L}{2,00L} + \frac{0,01s}{38,00s} \right) * 0,0526 \frac{L}{s}$$

$$\Delta Q = 0,006588 \frac{L}{s}$$

$$\Delta Q = 0,007 \frac{L}{s}$$

Por lo que el resultado queda expresado como:

$$Q = (0,053 \pm 0,007) \frac{L}{s}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los tanques 5 y 10 y los resultados se encuentran en la tabla 4.3.

A.3. Caudal de agua residual a tratar en los reactores

Para el cálculo del caudal a tratar en los reactores se midió el tiempo de llenado de los mismos el cual fue de 38 min, y haciendo uso de la ecuación IV sabiendo que el volumen a tratar es aproximadamente 1500L se determinó:



$$Q = \frac{1,5m^3}{0,633h}$$

$$Q = 2,37 m^3/h$$

Calculo del error:

$$\Delta Q = \left(\frac{0,25L}{1,5L} + \frac{0,01s}{2280s} \right) * 2,37m^3 / h$$

$$\Delta Q = 0,395m^3 / h$$

$$\Delta Q = 0,4m^3 / h$$

Por lo que el volumen de agua a tratar es:

$$Q = (2,4 \pm 0,4)m^3 / h$$

A.4. Porcentaje de remoción de los contaminantes mediante el tratamiento actual

$$\% R = \frac{Ca - Ce}{Ca} * 100 \quad (\text{Corcho y Duque, 2005}) \quad (VI)$$

donde:

$\%R$: porcentaje de remoción (%)

Ca : concentración en el afluente (ppm)

Ce : concentración en el efluente (ppm)

Para el cromo total, utilizando los resultados de los análisis tabla 4.5y sustituyendo en Vise tiene que:

$$\% R = \frac{92,6 ppm - 36,4 ppm}{92,6 ppm} * 100$$

$$\% R = 60,7\%$$

De la misma manera se realiza con el cianuro y el porcentaje de remoción es:

$$\% R = 99,4\%$$



A.5 Caudal de operación para el equipo de osmosis inversa

En la figura 3.5 se muestra el volumen de control a estudiar. En este punto se llevará a cabo un balance de masa y un balance por componente, esto con la finalidad de obtener un sistema de ecuaciones, el cual arroje el valor de la incógnita (caudal de operación)

La concentración de sólidos totales del agua residual es de 2860 ppm y se debe obtener una concentración menor a 1600 ppm como lo exige la norma, por lo que se realiza el calculo asumiendo a la salida 1200 ppm de sólidos totales.

Balance de masa

$$QAT - 1 + QOI = QAT \quad (\text{Patiño, 2000}) \text{ (VII)}$$

Balance por componente

$$Xst * QAT - 1 + Xst * QOI = Xst * QAT \quad (\text{Patiño, 2000}) \text{ (VIII)}$$

donde:

QOI: caudal de operación (m^3/h)

QAT: caudal de agua tratada (m^3/h)

QAT-1: caudal de agua tratada bifurcada (m^3/h)

Xst: composición de sólido total (ppm)

El caudal de agua a tratar se obtuvo en el apartado A.3 $QAT = (2,4 \pm 0,4)m^3 / h$

De la ecuación VIII se obtiene el caudal de agua bifurcada de la siguiente manera:

$$QAT - 1 * 2860 ppm = 2,4 \frac{m^3}{h} * 1200 ppm$$

$$QAT - 1 = 1,00m^3 / h$$

Despejando el caudal de la osmosis inversa de la ecuación VII se tiene que:

$$QOI = 2,4m^3 / h - 1m^3 / h$$

$$QOI = 1,4m^3 / h$$



A.6 Área necesaria para la implantación de las eras de secado

$$A = \frac{Pl}{d} \quad (\text{Orozco, 2004}) \text{ (IX)}$$

donde:

A: área era de secado (m^2)

Pl: producción de lodo (Kg/año)

d: parámetro de diseño para eras de secado ($Kg/m^2 \cdot \text{año}$)

Sustituyendo los datos se tiene que.

$$A = \frac{6120 \text{ Kg} / \text{año}}{100 \text{ kg} / \text{año} * m^2}$$

$$A = 61,2 m^2$$



APENDICE B

TABLAS DE RESULTADOS

Tabla B.1. Resumen de las características más resaltantes de los reactivos usados en el proceso de tratamiento de las aguas

Reactivo	Estado de agregación	Apariencia	Densidad Kg/m ³	Pureza %
Bisulfito de sodio	Sólido	Cristalino	423	98
Hipoclorito de sodio	Sólido	Blanco	1210	99
Soda caústica	Sólido	Blanco	2100	98
Ácido sulfúrico	Líquido	Aceitoso ambar	1800	99
Arpol	Líquido	Jabonoso	970	99

Tabla B.2. Distribución por categorías de las causas mas incidentes en el aumento de la concentración de los contaminantes.

Categoría	Causas	Sub-causas
Método	<ul style="list-style-type: none"> - Cajetines - Adición de la sal de cianuro y cromo - Ánodos de zinc - Caudal de enjuague 	Posición / cantidad Cantidad Cantidad Cantidad
Medio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> - Presión - Temperatura - Humedad 	
Materia prima	<ul style="list-style-type: none"> - Cajetines - Ánodos de zinc - Cianuro y dicromato de sodio 	Forma Disponibilidad Disponibilidad
Mano de obra	<ul style="list-style-type: none"> - Entrenamiento - Inducción 	
Maquinaria	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Ecurrido y tiempo 	Control Tiempo Control



Tabla B.3. Variación del pH en los baños de enjuague del proceso de galvanizado

Tanque	Variación de pH								
	Tanque 3	7	8	9	9	9	10	11	11
Tanque 5	7	4	3	3	2	2	2	2	2
Tanque 8	7	7	7	7	8	8	8	8	8
Tanque 10	7	10	11	12	13	13	14	14	14
Tanque 12	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Tanque 14	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Tanque 15	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Tabla B.4. Variación del pH de operación a lo largo de un día de trabajo

Tanque	pH								
	3	7	7	7	8	8	9	9	10
5	7	7	6	5	5	5	4	4	4
10	7	7	7	8	8	9	9	9	9

Tabla B.5. Parámetros finales del grupo de jarras de la prueba de jarras del tanque I usando cal como agente precipitante.

Muestra	Volumen de cal agregado (Vc±0,01)mL	Volumen arpol agregado (Va±0,01)mL	pH	Conc. de cromo total ppm	Conc. de zinc ppm	Peso del lodo Pl±0,001g
T ₂ A	1,90	0,20	6,8	6,3	36	0,815
T ₂ B	2,50	0,20	7,4	5,1	5,2	0,993
T ₂ C	3,30	0,20	8,3	2,1	7,1	1,016
T ₂ D	3,30	0,10	8,0	1,7	4,8	1,676
T ₂ E	3,30	0,25	8,4	1,8	3,0	1,896
T ₂ F	3,30	0,30	9,0	6,4	3,3	1,114

APENDICE C

FIGURAS Y TABLAS



Figura C.1. Forma de los cajetines galvanizados en la empresa Biemca.



Figura C.2. Distribución de los cajetines en las gancheras.



Tabla C.1. Análisis realizados a las aguas tratadas en la empresa Biemca en el periodo 2003-2009

CEMPROACA, C.A.

Centro Profesional de Análisis de la Calidad Ambiental

“BIEMCA”

ZONA INDUSTRIAL SAN MIGUEL- MARACAY, EDO ARAGUA
 TABLA COMPARATIVA EXIGENCIAS MPPA Nro. 3219
 DESCARGA FINAL PLANTA DE TRATAMIENTO

Parámetros ppm	22-04-2009	02-10-2008	23-09-2003	18-03-2003	Norma
DBO5	62	<10	<5	12	350
DQO	360	290	67	64	700
pH	7,3	9	9	8,2	6-9
Aceites y grasas	10	8	1	12	100
Aceites minerales	3	3	----	----	20
Sólidos totales	2800	2700	1600	1726	1600
Sólidos suspendidos	86	108	58	22	400
Sólidos sedimentables	2	0	0	0	100
Cloruros	449	149	199	170	300
Fósforo total	0,3	0,2	<0,2	0,25	10
Nitrógeno total	2	2	12	1	40
Cromo	5,49	9,86	1,3	1,5	2
Sulfato	781	623	50	827	400
Zinc	67,9	22,18	3,2	48	5
cianuro	3,2	3	3,8	9,2	0,2

CEMPROACA, C.A.

RIF: J-07525217-9



Figura C.3. Colocación de las gancheras en la máquina de galvanizado



Figura C.4. Llenado de tobo para determinación de caudal de los tanques de enjuague del proceso de galvanizado



Figura C.5. Medición del pH usando papel indicador

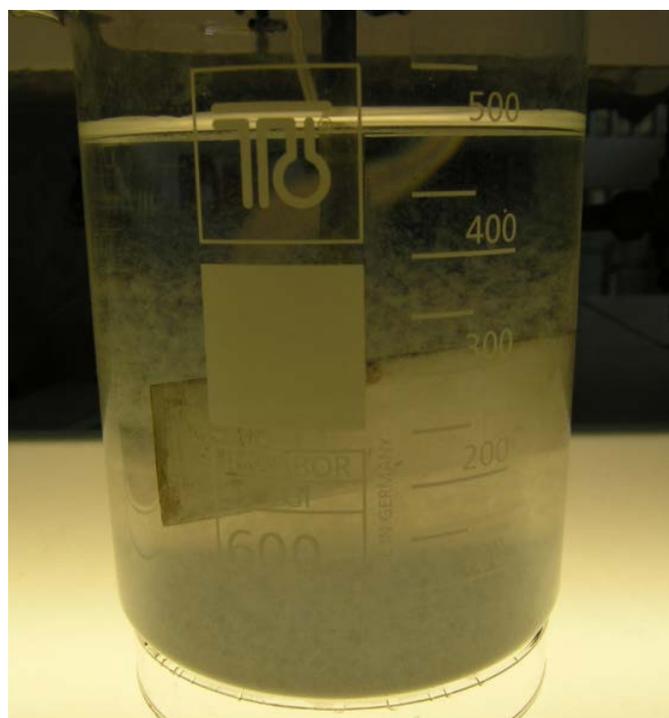


Figura C.6. Formación del hidróxido de zinc y del hidróxido de cromo en la muestra T1C





CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El caudal de agua actual de los tanques de enjuague es la principal causa en el aumento de la concentración de los desechos electrolíticos, el cual se ajustó a través de la variación del pH de los tanques de enjuague.
- El tanque 3, el tanque 5 y el tanque 10 fueron los que obtuvieron la variación de pH más brusca. Al tanque 3 se aumentó 88,6 % el caudal de enjuague, el tanque 5 se incrementó un 66,7 % y el tanque 10 se incrementó un 81,8%
- Los parámetros analizados que se encuentran fuera del decreto son: sólidos totales con 2860 ppm, cromo total con 36,4 ppm, sulfatos 781 ppm, zinc 67,9 ppm y cianuro total 16,8 ppm.
- Se propusieron como posibles tecnologías para la reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente el uso del bisulfito de sodio como agente reductor. Para la precipitación del hidróxido de cromo y el hidróxido de zinc, se propusieron como agentes precipitantes: el hidróxido de sodio, el hidróxido de calcio.
- Se propuso para la oxidación del cianuro el uso del hipoclorito de sodio como agente oxidante, por ser económico y fácilmente disponible. Para el tratamiento de los lodos producidos, las eras de secado con 705 puntos corresponden a la mejor tecnología a implantar, junto con los sacos filtrantes con 660 puntos.
- Con respecto a la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente se obtuvo que se debe agregar 2,5 mL de bisulfito de sodio alcanzando un potencial de óxido-reducción de 280 mV, para una muestra de 500 mL.
- La prueba de jarras correspondiente para el estudio de las condiciones de precipitación arrojó que el mejor agente precipitante es el hidróxido de sodio, el cual genera la menor cantidad de lodos y a su vez adecua a la norma la concentración de cromo total y el zinc.
- Para una muestra de 500 mL, se debe agregar 2,5 mL de hidróxido de sodio y 0,25 mL de arpol como agente floculante a un pH de 8,6. con estas condiciones se obtiene una concentración de 1,9 ppm de cromo total y 2,0 ppm de zinc.



- Para la oxidación del cianuro se debe tratar una muestra de 500 mL con 1,8 mL de hipoclorito de sodio y un potencial de óxido-reducción de 295 mV.
- El parámetro proyectado a un batch de 1500L para la reducción del cromo hexavalente es de 7,5 L de bisulfito de sodio. Para la precipitación tanto del hidróxido de cromo y del hidróxido de zinc se debe agregar 7,5 L de hidróxido de sodio y 750 mL arpol obteniéndose 4,416 kg de lodo producido. Para la oxidación de cianuro se debe agregar 5,4 L de hipoclorito de sodio.
- Mediante el uso del equipo colorimétrico se obtuvieron concentraciones de cromo total de 0,35 ppm y 0,1 ppm. Ambos por debajo de los límites permisibles por la norma.
- El caudal de operación a tratar en la osmosis inversa es 1,4 m³/h con una carga de sólidos totales de 2860 ppm.
- Las eras de secado a implantar son dos las cuales poseen 10 m de largo y 3,1 m de ancho.

Recomendaciones

- Se recomienda dar a los trabajadores una inducción en cuanto al procedimiento realizado tanto en el área de galvanizado como en el área de tratamiento.
- Eliminar el uso de papel indicador de pH y adquirir equipos que arrojen valores más puntuales ya que esta variable es una de las más importantes en el proceso y debe mantenerse en los valores óptimos.
- Adquirir medidores de potencial de óxido-reducción para determinar el punto final de las reacciones y colocar medidores de caudal a los tanques de enjuague (T₃, T₅ y T₁₀).
- Realizar carteleras informativas donde se encuentren diagramas o esquemas que muestren paso a paso el procedimiento que se debe realizar en la planta de tratamiento, esto para disminuir los errores que se generan de la desinformación del operario.
- Realizar estudios posteriores a los lodos para encontrarles alguna utilidad evitando el almacenamiento de los mismos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, A., Florencia, A. y López, M. (2006). El proceso de la entrevista. Conceptos y modelos. Madrid: Editorial Lumosa.

Acuña, J. (2005). Mejoramiento de la calidad: un enfoque a los servicios. Costa Rica: editorial tecnología de Costa Rica.

Aguilar, M. (2002). Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales: coagulación-floculación. España: Editorial Graf S.L.

Baird, C. (2001). Química ambiental. España: editorial Reverte S.A

Charama, J. y Ruiz. C., (2008). Propuesta para el tratamiento de los electrolitos generados en el área de galvanoplastia de la empresa retrogradados venezolanos (ROTOVEN) S.A. Trabajo especial de grado sin publicación. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Valencia.

Corcho, A. y Duque, G. (2005). Acueductos: teoría y diseño. 3ª edición. Colombia: editorial universidad de Medellín.

Creus, A. (2005). Instrumentación industrial. 7ª edición. España: marcombo.

Díaz, D. y Condori, I. (2008). Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el método INCO en efluentes mineros. Universidad nacional de ingeniería. Facultad de ingeniería química y textil: Perú.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia: Centroagua.



Fernández, L. (2008) Manual para la formación en medio ambiente. 1era edición. Valladolid: Editorial Lex Nova.

Fonfría, R. y Ribas, J. (2003). Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. Colombia: Editorial Marcombo.

Freire, L. y Villacís, E. (2009). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en una industria cartonera. (Publicación en línea). Escuela superior politécnica del litoral.

Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/1970>

(Consulta: 2010, enero 20)

Garay, F. y Rodríguez, R. (2008). Propuesta de alternativa de tratamiento para la adecuación de los efluentes industriales de la empresa PERFECT PISTON LTDA. Trabajo especial de grado sin publicación. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Valencia.

Guerrero, A. y Díaz, G. (2007). Introducción a los errores en la medición. Colombia: instituto tecnológico metropolitano

Gomella, C. y Guerrée, H. (1999). Tratamiento de aguas para abastecimiento público. España: Editores técnicos asociados.

González, A., Floria, P y Maestre, D. (2006). Manual para el técnico en prevención de riesgos laborales. Madrid: editorial fundación confemetal.

Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México. Mexico: Editorial limusa.

Lira, L. (2008). Propuesta de acondicionamiento de las características físicas y químicas del efluente de la planta de tratamiento de la Corrugadora Suramericana C.A. Trabajo especial de grado sin publicación. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Valencia.



Lozano, J. y Wiesner, I., (2009). Memoria técnica de la implementación del sistema de tratamiento externo de efluentes de papelera nacional S.A. (publicación en línea). Escuela superior politécnica del litoral.

Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/2454>

(Consulta: 2010, enero 20).

Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del lago de valencia. Decreto 3219. Gaceta oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela, 5021, Diciembre 18, 1995.

Norma Venezolana para las aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo N° 2709. Gaceta oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela. 36395. mayo 25,2002.

Manaham, S. (2007). Introducción a la química ambiental. Mexico: Editorial Reverté.

Metcalf & Eddy (1995). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, 3era edición. España: McGraw-Hill

Franson, M. (1992). Método normalizado para el análisis de aguas potables y residuales. España: Diaz de Santos.

Orozco, J. (2004). Bioingeniería de aguas residuales, teoría y diseño. España: Editorial Acodal.

Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., alfayate, J. (2004). Contaminación ambiental, una visión desde la química. 1era edición. España: Editorial Thomson.

Ortega, J., (1990). Corrosión industrial. España: Editorial Marcombo.

Patiño, A. (2000). Introducción a la ingeniería química. Mexico: McGraw Hill.



Pérez, J. e Higuera, O. (2008). Comportamiento electroquímico del cianuro. Universidad tecnológica de Pereira. Publicado en: Revista Ingeniería y Desarrollo. Número 24.

Ramalho, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.

Raudel, O., Sepulveda, K., Villalobos, F. (2002). El agua y el medio ambiente: muestreo y análisis. México: Editorial Plaza y Valdéz S.A.

Ribeiro, B., Paim, T., Rocha, D. (2008). Utilización de hidróxido de magnesio en la precipitación de metales pesados. Revista UDA en línea. Brasil. Disponible: www.ingenieria.uda.cl.

Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. España: Editorial Marcombo.

Roldan. J. (2005). Fórmulas y datos practicos para ingenieros. España: Thomson paraninfo

Sainz, J. (2005). Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Madrid: Editorial fundación EOI

Romero. J. (1999). Purificación del agua. Colombia. Editorial escuela colombiana de ingeniería.

Seoáñez, M. (2004). Depuración de aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Bracelona: Editorial Mundi prensa.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Vicerrectorado investigación y postgrado (1998). Manual de trabajo de grado de maestría y tesis doctorales. Caracas.

Weber, W. (2003). Control de calidad del agua, procesos fisicoquímicos. Barcelona, Ediatorial Reverté S.A.