

Maestría en Ingeniería Civil

**Diagnóstico del Tratamiento del Efluente de una Empresa de
Galvanoplastia**

**Beatriz Andrea Dávila Giraldo
Nury Paola Bayona Avella**

Bogotá, D.C., 17 de Septiembre de 2018

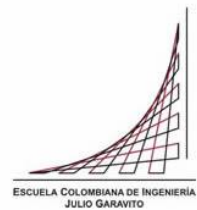


**Diagnóstico del Tratamiento del Efluente de una Empresa de
Galvanoplastia**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Jairo Alberto Romero Rojas
Director**

Bogotá, D.C., 17 de Septiembre de 2018



La tesis de maestría titulada “Diagnóstico del Tratamiento del Efluente de una Empresa de Galvanoplastia”, presentada por Beatriz Andrea Dávila Giraldo y Nury Paola Bayona Avella, cumplen con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado
Mónica Andrea Vargas

Jurado
Germán Ricardo Santos

Bogotá, D.C., 30 de Octubre de 2018

Dedicatoria

Este trabajo de grado queremos dedicarlo a Dios, quien nos ha dado la fortaleza para culminar con éxito estos estudios, haciéndonos mejores profesionales y así afrontar de la mejor manera posible los problemas que se presentan a diario y que afectan a la sociedad.

También dedicamos este trabajo a nuestros padres, pues han sido ellos quienes han creído desde el primer momento en nosotras, nos han apoyado y animado para sacar adelante este proyecto de vida.

A ellos, pues indudablemente su incondicionalidad y su voz de aliento para con nosotras ha sido la base para no desistir en los momentos difíciles.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director de tesis, Jairo Alberto Romero Rojas, por su confianza, apoyo y dedicación en el desarrollo del presente trabajo; por compartir su conocimiento y experiencia laboral lo cual ha sido primordial en el éxito para la culminación de esta etapa de nuestras vidas.

También queremos agradecer a cada uno de los profesionales que compartieron algo de su conocimiento con nosotras en las asignaturas vistas, ya que ha logrado ampliar nuestra visión académica y profesional.

Finalmente queremos agradecer a cada una de las personas que nos apoyaron o hicieron parte del desarrollo y culminación de la maestría.

Resumen

La industria de Galvanoplastia en su proceso productivo involucra aproximadamente de 30 a 40 m³ semanales de agua, tanto en los baños de proceso como en las etapas de lavado y enjuague. Las descargas de estas aguas residuales están compuestas por efluentes que se caracterizan por su carga contaminante tóxica en términos de su contenido de cianuro, metales pesados como el cromo hexavalente, ácidos y álcalis. El proceso de recubrimiento metálico, en general, es muy poco efectivo ya que sólo una pequeña cantidad de las sustancias utilizadas en éste se deposita en la pieza. Hasta un 90% de las sustancias pueden evacuarse a través de las aguas residuales.

Actualmente la empresa en estudio tiene una planta de tratamiento de agua residual industrial, con capacidad para remover contaminantes como metales pesados. El problema radica en el no cumplimiento de la resolución 631 de 2015 de todos los parámetros establecidos, consecuente con la pérdida del permiso de vertimiento al sistema de alcantarillado y costo adicional para tratamiento de estas aguas por entes privados autorizados.

Por lo expuesto anteriormente se realiza un análisis del proceso productivo de la industria seleccionada, identificando los puntos de vertimiento, analizando la caracterización suministrada por la misma y el tratamiento que la industria posee para estas aguas.

Del diagnóstico realizado se concluye que el tratamiento utilizado no tiene las eficiencias requeridas para el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015, por tal razón se plantea una optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales que permita cumplir la norma de vertimiento.

Índice general

| | |
|---|----|
| Introducción | 10 |
| 1 Antecedentes..... | 12 |
| 1.1 Pretratamientos superficiales:..... | 13 |
| 1.2 Procesos de terminación | 13 |
| 2 Industrias Típicas de Galvanoplastia | 14 |
| 2.1 Galvanizado en caliente con electrolitos ácidos..... | 14 |
| 2.2 Galvanizado en caliente con electrolitos de zinc cianurados. | 16 |
| 2.3 Galvanizado en caliente con electrolitos de zinc alcalinos. | 18 |
| 3 Industria Objeto de Estudio..... | 20 |
| 3.1 Diagrama del proceso productivo de la empresa..... | 20 |
| 3.2 Diagrama de flujo de insumos del proceso industrial | 21 |
| 3.3 Diagrama de flujo de aguas residuales de la industria..... | 26 |
| 4 Caracterización del Agua Residual Industrial..... | 29 |
| 4.1 Caracterización del Agua Residual de la Industria en estudio..... | 30 |
| 5 Norma de Vertimiento Aplicable a la Industria | 30 |
| 5.1 Necesidades de tratamiento | 31 |
| 6 PTAR Existente | 32 |
| 7 Optimización de la PTAR | 34 |
| 8 Bibliografía..... | 37 |

Índice de tablas

| | | |
|---------|--|----|
| Tabla 1 | Caracterización agua residual galvánica. | 29 |
| Tabla 2 | Caracterización agua residual industrial. | 29 |
| Tabla 3 | Características de las aguas residuales típicas para una industria de galvanoplastia. | 29 |
| Tabla 4 | Característica de los análisis de metales pesados en 3 empresas galvanotecnias de Bogotá | 29 |
| Tabla 5 | Característica de los análisis de metales pesados en la Empresa Seleccionada | 30 |
| Tabla 6 | Valores máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales | 31 |
| Tabla 7 | Porcentajes de remoción requeridos | 31 |
| Tabla 8 | Concentraciones efluente de la PTAR..... | 34 |

Índice de figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Diagrama de flujo del proceso de galvanizado en caliente con electrolitos ácidos..... | 14 |
| Figura 2 | Diagrama de flujo proceso galvanizado en caliente con electrolitos de zinc cianurados | 17 |
| Figura 3 | Pasivación crómica. Walter Surface Technologies Inc. | 18 |
| Figura 4 | Diagrama de flujo proceso galvanizado en caliente con electrolitos alcalinos | 19 |
| Figura 5 | Diagrama del proceso productivo de la empresa..... | 20 |
| Figura 6 | Diagrama de insumos del proceso de cincado | 21 |
| Figura 7 | Diagrama de insumos del proceso de niquelado | 22 |
| Figura 8 | Diagrama de flujo del proceso de zincado..... | 27 |
| Figura 9 | Diagrama de flujo del proceso de niquelado..... | 28 |
| Figura 10 | Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales | 32 |
| Figura 11 | Optimización PTAR | 34 |

Introducción

Actualmente muchas de las corrientes hídricas en Colombia se ven afectadas por la creciente contaminación generada por los vertimientos de aguas residuales, creando condiciones anóxicas (casos ríos Bogotá, Medellín, Cali, Sogamoso, etc.). También se ha incrementado la problemática de eutrofización y colmatación de cuerpos de agua, como sucede en las Lagunas de Fúquene y Sonzo, y los humedales en la Sabana de Bogotá.

Es importante analizar la contaminación de los ríos ya que en nuestro país los ríos son la fuente principal de abastecimiento de agua potable y por ende es necesario reducir la contaminación de los mismos implementando sistemas de tratamiento de aguas residuales antes de verterlas nuevamente a un cuerpo de agua.

La industria de galvanoplastia aplica procesos que llevan involucrado consumo de agua, tanto en los baños electrolíticos como en las etapas de lavado y enjuague. Las descargas de estas aguas residuales están compuestas por efluentes que se caracterizan por su carga contaminante tóxica debido a la presencia de cianuro y de metales pesados, los cuales, entre otras características, son inhibidores de tratamientos biológicos; además, producen contaminación de suelos debido a las descargas no controladas de los residuos líquidos con un potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

El tema es pertinente y relevante ya que actualmente es uno de los mayores problemas que aqueja a la sociedad. Según el Inventario Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento, cerca de 1.300 cuerpos de agua están siendo contaminados por ser los receptores de los vertimientos municipales e industriales.

La oferta hídrica se ha reducido notablemente, en términos de calidad, debido a la presencia de elementos nocivos para los diferentes usos del recurso, por el vertimiento de sustancias patógenas, tóxicas, mutagénicas, corrosivas o abrasivas.

Se realiza un análisis de una industria de galvanoplastia con el fin de proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado que cumpla con los requerimientos establecidos en la resolución 631 de 2015.

Se parte de los antecedentes hallados en este tipo de industria, con el fin de identificar los diferentes procesos productivos y clasificar la industria a estudiar dentro de ellos. Una vez clasificada, se describe el proceso productivo de la industria con el fin de identificar en que etapas del proceso se generan aguas residuales, analizando la caracterización de los parámetros físico-químicos de ellas para determinar los requerimientos de tratamiento y así dar cumplimiento a la normatividad vigente.

Posteriormente se procede a evaluar la planta de tratamiento existente, identificando las unidades de tratamiento y los insumos y condiciones utilizados para el funcionamiento de la misma.

Finalmente, después de analizar el efluente, se plantea una optimización de la misma, con el fin de alcanzar las remociones requeridas.

1 Antecedentes.

Según el Centro de Economía de Buenos Aires los residuos generados por la industria de Galvanoplastia se consideran potencialmente contaminantes debido a sus características, encontrándose conformados mayoritariamente por metales pesados tales como zinc, níquel, cromo hexavalente, cobre, cadmio, los cuales son considerados, entre otros aspectos, inhibidores de tratamientos biológicos de residuos líquidos y dañinos para la salud.

Chávez Porras, Cristancho Montenegro, & Ospina Granados, 2009, establecen que la Galvanoplastia es una técnica que consiste en la electrodeposición de un recubrimiento metálico sobre una superficie que puede ser o no metálica. Se recomienda por costos o por razones estructurales modificar las características del material base, principalmente resistencia a la corrosión, dureza, apariencia, conductividad eléctrica y rozamiento.

El Ministerio del Ambiente del Ecuador, define la galvanoplastia como el proceso en el que, por medio de la electricidad, se cubre un metal sobre otro a través de una solución de sales metálicas (electrólisis) con el objetivo de modificar sus propiedades superficiales, aumentar su resistencia a la corrosión y al ataque de sustancias químicas e incrementar su resistencia a la fricción y al rayado, es decir se confieren a las piezas propiedades diferentes a la de los materiales base. Los procesos de galvanoplastia se dividen en dos: electroformación de láminas para moldes y revestimientos de protección o decoración. Para el primer caso, los metales de más uso son el estaño y el cromo, y para el segundo caso, el níquel, el cobre y la plata.

De acuerdo con la Guía de las Buenas Prácticas para el Sector de Galvanotecnia realizada por el Equipo profesional de Propel Fundes Colombia, en el año 2001, los procesos de una industria de Galvanoplastia son:

- Pretratamientos superficiales
- Procesos de terminación

1.1 Pretratamientos superficiales:

Esta etapa involucra los primeros baños químicos, en los cuales el objetivo es acondicionar la superficie para recibir los substratos metálicos u óxidos que posteriormente se le incorporen.

- a. **Desengrase:** Tiene por objeto eliminar los aceites y grasa de la superficie para que no intervengan en las siguientes etapas. Las soluciones empleadas son normalmente alcalinas. Dependiendo del tipo de acabado se escogen soluciones fuertes o débiles. Las soluciones fuertemente alcalinas causan un efecto decapante en la superficie. Hay casos donde se utiliza desengrase con ácidos y su aplicación depende del tipo de aceite o grasa que está presente en la superficie del metal. A veces son empleados procesos más avanzados de desengrase tales como desengrase electrolítico y ultrasonido. Este proceso necesariamente debe ser precedido de un enjuague para remover la solución desengrasante de la superficie del metal y evitar contaminación de los baños siguientes.
- b. **Acondicionamiento:** Se hace con ácido sulfúrico y ácido crómico y es una etapa que requiere control para garantizar una buena adhesión. La temperatura de esta fase oscila entre 50 y 70 °C.
- c. **Sensibilización y activación de la superficie:** En este proceso se introduce el uso de cloruro estanoso, a temperatura ambiente y por corto tiempo.

1.2 Procesos de terminación

En el proceso de electrólisis, los ánodos (anodizado) o cátodos (depósito electrolítico) se suspenden de barras exteriores, las cuales van conectadas a sistemas que conducen la corriente eléctrica proveniente del rectificador o generador.

- a. **Premetalizado:** Se hace un metalizado previo, sin uso de corriente con soluciones que contienen iones cobre o níquel.
- b. **Metalizado:** Es el depósito metálico definitivo y se realiza adecuando el voltaje y la densidad de corriente al metal con que ha de recubrirse: niquelado, cromado, cobrizado, zincado, dorado, cadmiado, entre otros.

Como lo establece Morales Posada & Acosta Niño, (Sistema de Electrocoagulación como tratamiento de Aguas Residuales Galvanicas, 2010) existen tres tipos de galvanizado en caliente: uno con electrolitos de zinc cianurados en alta o media concentración de cianuro; otro, con electrolitos ácidos y; finalmente otro, exento de los electrolitos cianurados que se denomina alcalino. Sin embargo, se realizan las mismas operaciones de todo proceso de galvanotecnia: desengrase, enjuague 1, decapado, enjuague 2, baño de flux, secado, inmersión del zinc fundido, enfriamiento.

2 Industrias Típicas de Galvanoplastia

2.1 Galvanizado en caliente con electrolitos ácidos.

A continuación, se presenta el proceso de galvanizado en caliente con electrolitos ácidos (Figura 1)

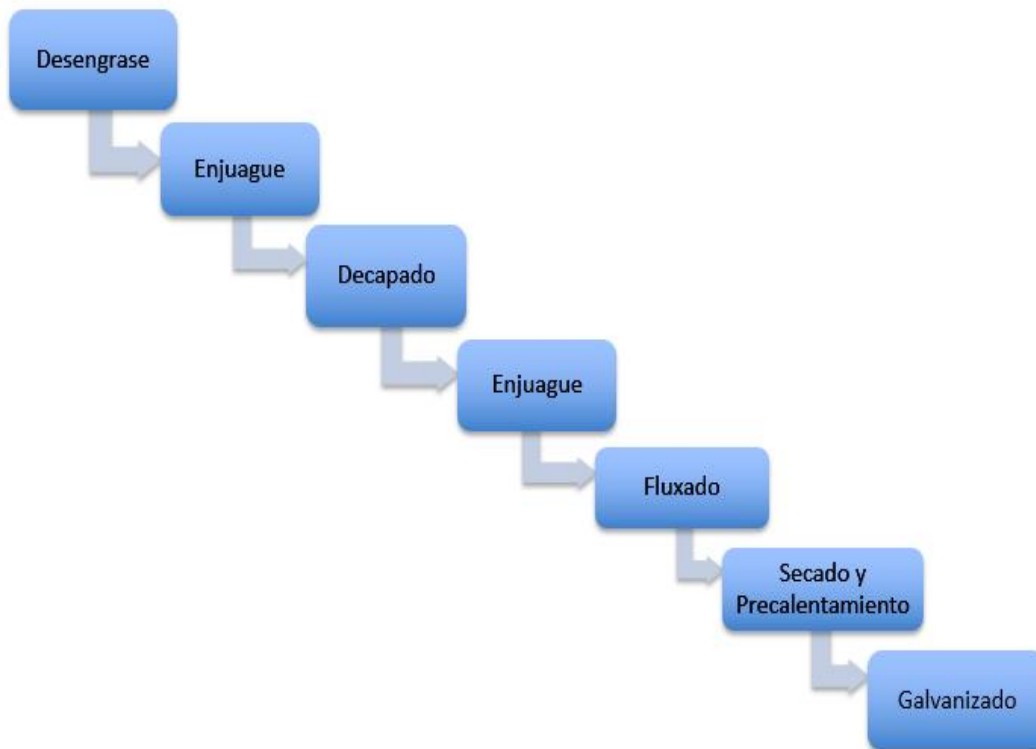


Figura 1 Diagrama de flujo del proceso de galvanizado en caliente con electrolitos ácidos

Según La asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas A.G, el galvanizado en caliente con electrolitos ácidos es un proceso que por medio de la inmersión recubre una pieza de acero con una capa de zinc.

Según La Asociación Técnica Española de Galvanizado (ATEG), dependiendo de la técnica utilizada, se obtienen recubrimientos bajos (7-42 micras) mediante el galvanizado “en continuo o sendzimir” (UNE EN ISO 10346) o de alta duración (45-200 micras) mediante el “galvanizado general” (UNE EN ISO 1461).

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las etapas del proceso.

- **Desengrase:** Se sumerge la pieza en una solución desengrasante ácida con el fin de producir una primera limpieza. En esta etapa se eliminan aceites y grasas producto de los procesos de fabricación de las piezas.
- **Decapado ácido:** La pieza es sumergida en una solución ácida con el fin de remover óxidos y otras impurezas presentes en la superficie de la pieza. Los óxidos se producen durante procesos previos, así como la corrosión producto del almacenamiento.

Los ácidos que se pueden utilizar son el ácido sulfúrico o clorhídrico (H_2SO_4 ó HCl), sin embargo, el ácido sulfúrico es más nocivo, peligroso y tiene un alto costo energético por lo cual su utilización es prácticamente nula en el proceso de galvanizado.

- **Enjuague:** Una vez finalizado el decapado se sumerge el material en agua limpia para evitar el arrastre de ácido y hierro a las siguientes etapas del proceso. Se recomienda realizar doble enjuague en esta parte del proceso para garantizar la limpieza de la pieza.
- **Fluxado:** La pieza es sumergida en una solución acuosa compuesta por cloruro de zinc y cloruro de amonio ($ZnCl_2$ y NH_4Cl), con un reporte molar 1:2 o comúnmente llamada Sal Doble. La temperatura de trabajo está entre 18 y 70 °C. El objetivo del fluxado es mejorar la interacción entre la pieza y el zinc e impedir la formación de óxidos antes del galvanizado, garantizando un tiempo de espera de aproximadamente 4 horas.
- **Secado y precalentamiento:** Esta etapa del proceso se da entre el fluxado y el galvanizado. Las piezas deben ser secadas, lo que les quita la humedad. El

secado debe realizarse por el mayor tiempo posible sin exceder una hora. Adicionalmente en esta etapa se favorece el rendimiento térmico del crisol de galvanizado gracias a que su temperatura es elevada, sin que exceda los 100°C.

- **Galvanizado:** En esta etapa la pieza es sometida a un baño de zinc, normalmente se le puede agregar plomo, estaño, aluminio o bismuto. El espesor de la cobertura del galvanizado depende en gran medida de la temperatura del baño. Según ensayos, a menores temperaturas se obtienen menores coberturas. En este punto del proceso también son importantes para el espesor de cobertura las velocidades de descenso y de izaje de las piezas. Se recomienda que la velocidad de izaje sea lo más baja posible para lograr un mayor escurrimiento del zinc sobre la pieza galvanizada, mientras que la velocidad de descenso deberá ser lo más alta posible con el fin de que el tiempo de inmersión de la pieza sea menor.

El tipo de acero de la pieza también influye en el espesor de la cobertura. A mayor tamaño de grano en la pieza base, mayor será la cobertura. Por otro lado, para superficies menos rugosas, las coberturas darán menores.

Otro aspecto importante en el espesor de cobertura es el tiempo de inmersión, en cuanto éste sea mayor, mayor será la cobertura (Pérez, 2018).

2.2 Galvanizado en caliente con electrolitos de zinc cianurados.

En la Figura 2 se presenta el proceso de galvanizado en caliente con electrolitos de zinc cianurados.

- **Decapado mecánico:** En esta etapa se van limitando las impurezas que se encuentran adheridas a la superficie de la pieza. Se utiliza un material agresivo en estado sólido, el cual puede ser arena de sílice, escorias, granalla de acero, entre otras. Este material es proyectado a gran velocidad mediante aire comprimido y de esta forma se van quitando las impurezas de las piezas a galvanizar.
- **Enjuague:** Una vez finalizado el decapado se sumerge el material en agua limpia para evitar el arrastre de impurezas a las siguientes etapas del proceso. Se recomienda realizar el lavado en contracorriente con el fin de minimizar el consumo de agua.

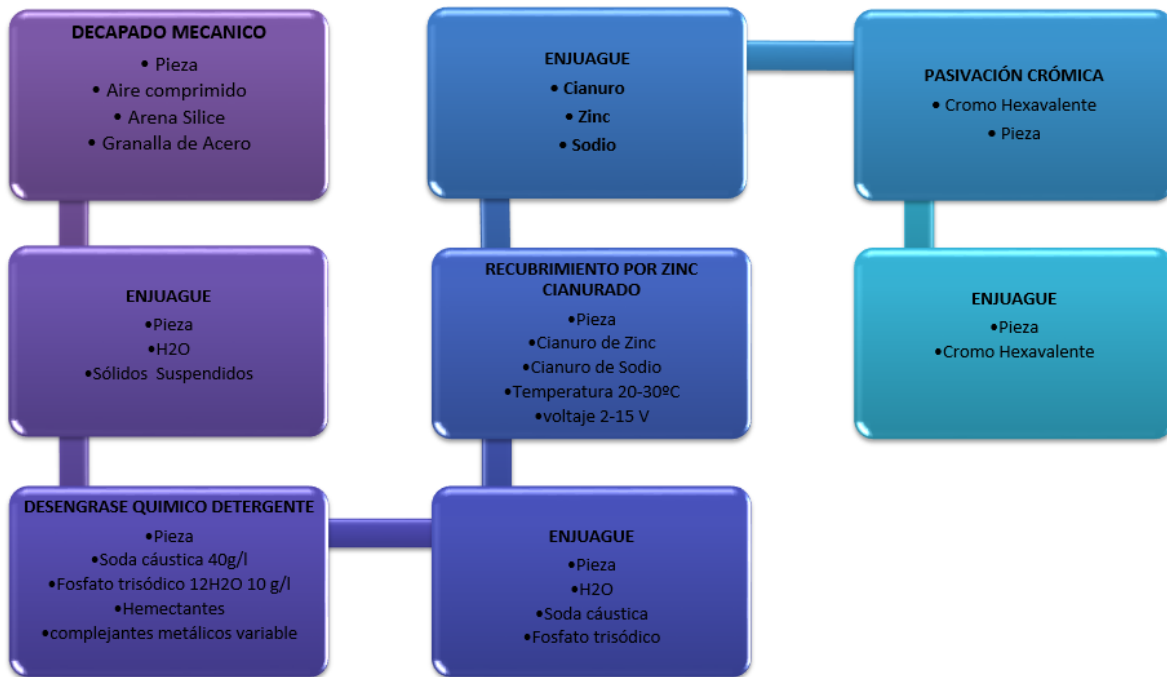


Figura 2 Diagrama de flujo proceso galvanizado en caliente con electrolitos de zinc cianurados

- **Desengrase químico detergente:** Se eliminan las grasas gracias a los elementos tenso activos presentes, los cuales disminuyen la tensión superficial del baño y que se añaden a una solución alcalina. Las condiciones óptimas de trabajo son un pH entre 12 y 14 y temperaturas entre 60 y 90 °C. Adicionalmente se utiliza algún mecanismo de agitación como el aire para favorecer el efecto mecánico de la limpieza. En los medios alcalinos utilizados se pueden encontrar la siguiente formulación (Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya, 2003):
 - ✓ Soda cáustica 40 g/l
 - ✓ Carbonato sódico 25 g/l
 - ✓ Fosfato trisódico 12H₂O 10 g/l
 - ✓ Metasilicato sódico 5H₂O 10 g/l
 - ✓ Humectantes 2-5 g/l
 - ✓ Complejantes metálicos variable
- **Recubrimiento por zinc cianurado:** Consiste en recubrir la pieza con el fin de proteger el hierro dadas sus características anticorrosivas y decorativas. Este tipo de recubrimiento se basa en la reacción que se presenta a continuación:



Las condiciones óptimas de trabajo son una temperatura entre 20 y 30 °C, una densidad de corriente catódica entre 2 y 6 A/dm² y voltaje entre 2 y 15 V.

- **Pasivación crómica:** Es una capa pasiva de óxido de cromo, la cual es formada por una reacción química que sucede cuando el cromo que se encuentra en el acero inoxidable entra en contacto con el oxígeno en el aire. Esta capa protege la superficie de acero inoxidable de la corrosión. Para que esta etapa del proceso se lleve a cabo con éxito, la superficie debe estar completamente limpia y libre de cualquier contaminante. (Figura 3)

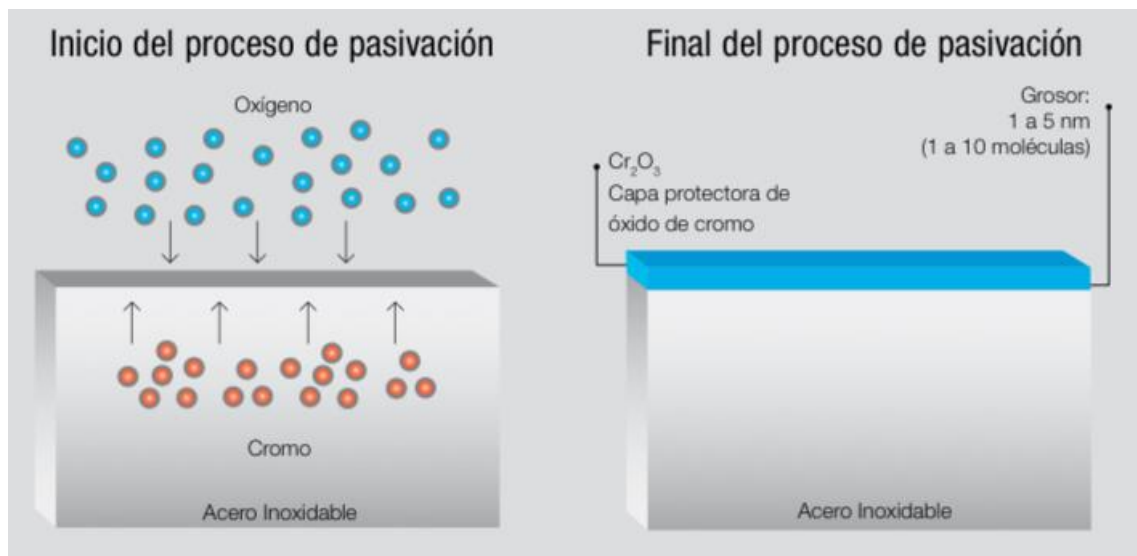


Figura 3 Pasivación crómica. Walter Surface Technologies Inc.

La pasivación puede ser de cuatro tipos:

- ✓ Pasivación azul, es decir resistencia a la corrosión baja.
- ✓ Pasivación verde, es decir alta resistencia a la corrosión.
- ✓ Pasivación amarilla con una resistencia a la corrosión similar a la pasivación verde.
- ✓ Pasivación negra con una resistencia de tipo medio.

2.3 Galvanizado en caliente con electrolitos de zinc alcalinos.

En la Figura 4 se presenta el proceso de galvanizado en caliente con electrolitos de zinc alcalinos.



Figura 4 Diagrama de flujo proceso galvanizado en caliente con electrolitos alcalinos

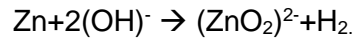
Cada una de las etapas del proceso se describen brevemente a continuación, excepto las que ya se hayan descrito en los otros dos procesos de galvanizado en caliente.

- **Desengrase químico disolvente:** En esta etapa del proceso se eliminan las grasas, las pinturas y los barnices. Consiste en la inmersión, por un tiempo prefijado, de la superficie a tratar en una solución química empleando disolventes tanto en fase vapor (en la cual normalmente se utilizan disolventes cloratos, los cuales se evaporan en el baño para producir los vapores disolventes) como en fase frío (donde se emplean los mismos compuestos, pero se aplican por inmersión).

Los disolventes más utilizados para el desengrase son:

- ✓ Tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno
 - ✓ Cloruro de metileno
 - ✓ Triclorofluoretano
 - ✓ Cloroformo, como en básicos.
- **Recubrimiento por zinc alcalino:** Consiste en recubrir la pieza con una solución de zinc alcalina. El zinc reacciona con los alcalinos dando zincados

solubles y liberando hidrógeno. Se basa en la reacción que se presenta a continuación:



Las condiciones óptimas de trabajo son temperatura entre 20 y 30 °C, densidad de corriente catódica de 2 a 4 A/dm² y voltaje de 2 a 15 V.

Para este recubrimiento, la formulación básica más común es óxido de zinc 9,5 g/l, hidróxido sódico 90-120 g/l y abrillantadores 10-50 ml/l.

3 Industria Objeto de Estudio

3.1 Diagrama del proceso productivo de la empresa

La industria seleccionada es una empresa que se dedica a la fabricación de cerraduras residenciales y comerciales, cierrapuertas, puertas y marcos cortafuegos, barras antipánico, sistemas de control de acceso, entre otras. La empresa emplea el proceso de galvanizado en caliente con electrolitos ácidos.

El proceso productivo de la empresa se describe en la Figura 5.

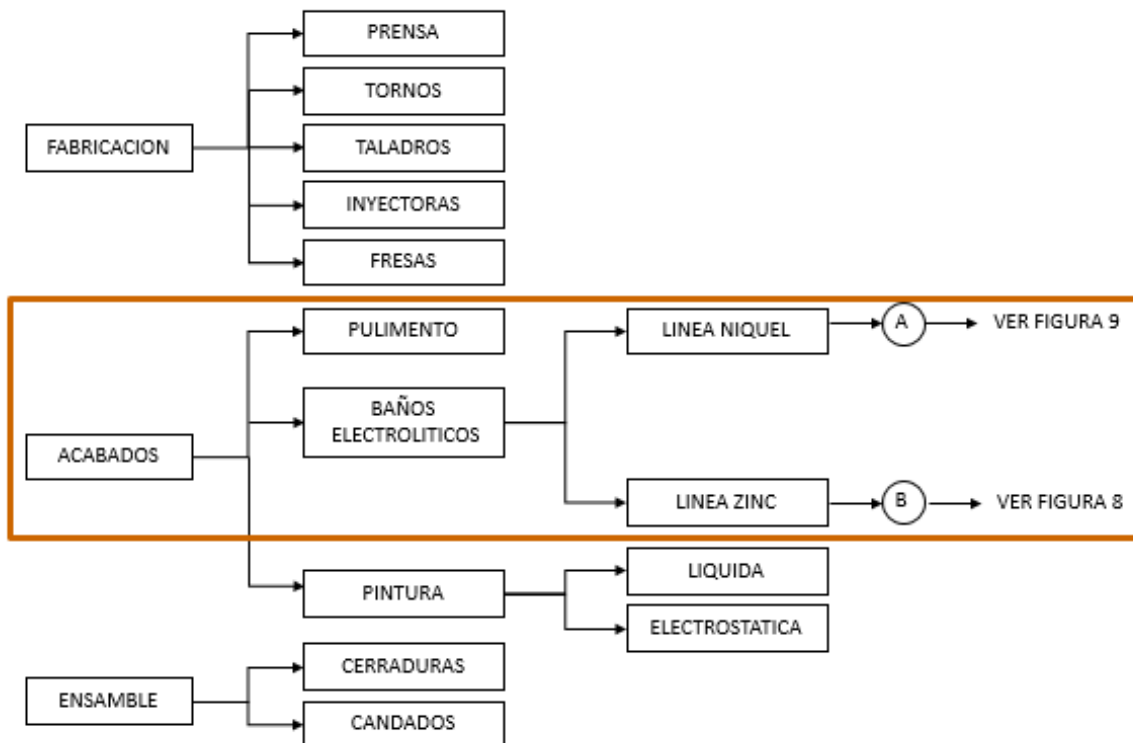


Figura 5 Diagrama del proceso productivo de la empresa

3.2 Diagrama de flujo de insumos del proceso industrial

El proceso de galvanizado de la industria en estudio mediante un proceso de electrolitos ácidos se presenta en las Figura 6 y Figura 7.

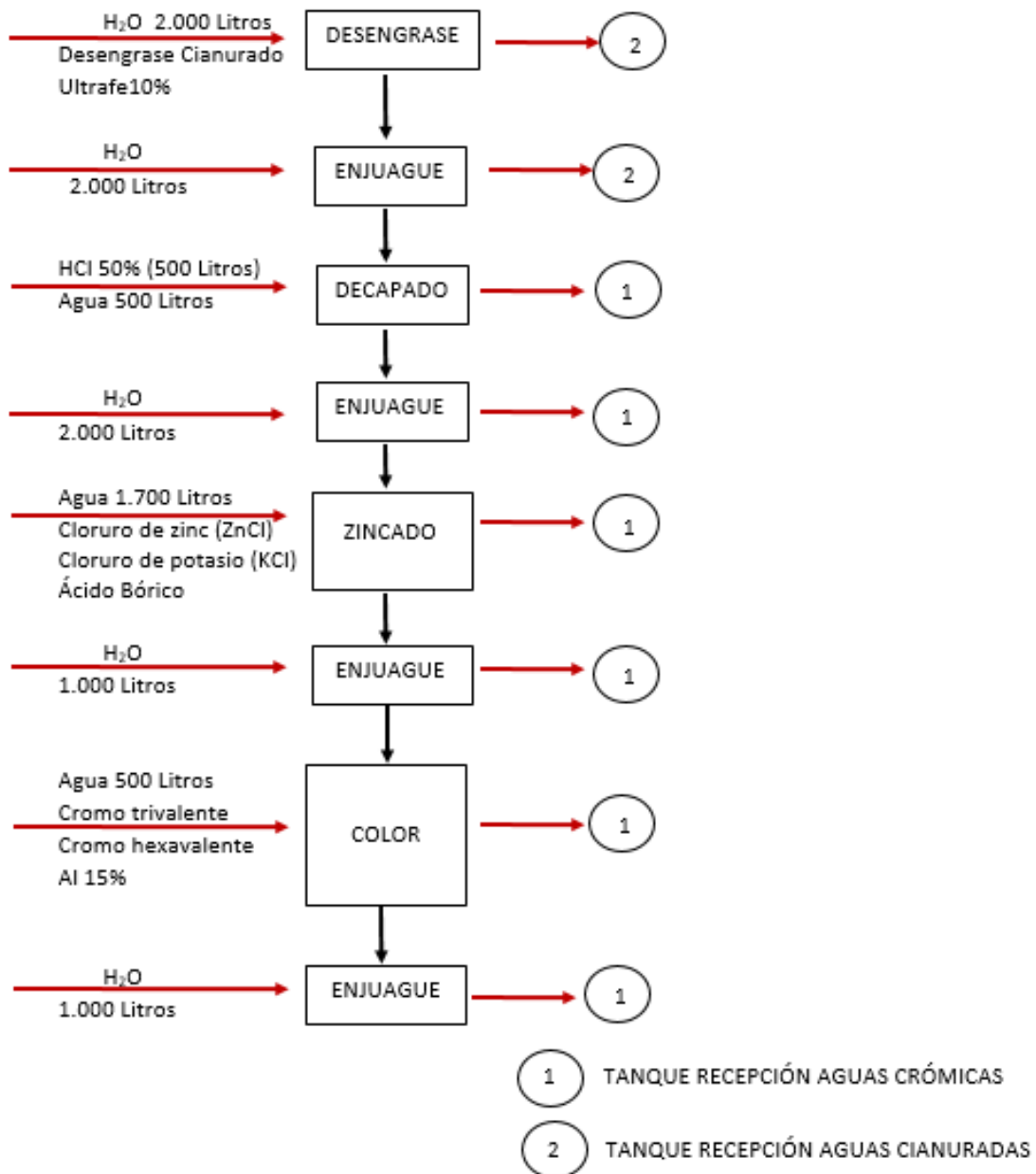


Figura 6 Diagrama de insumos del proceso de cincado

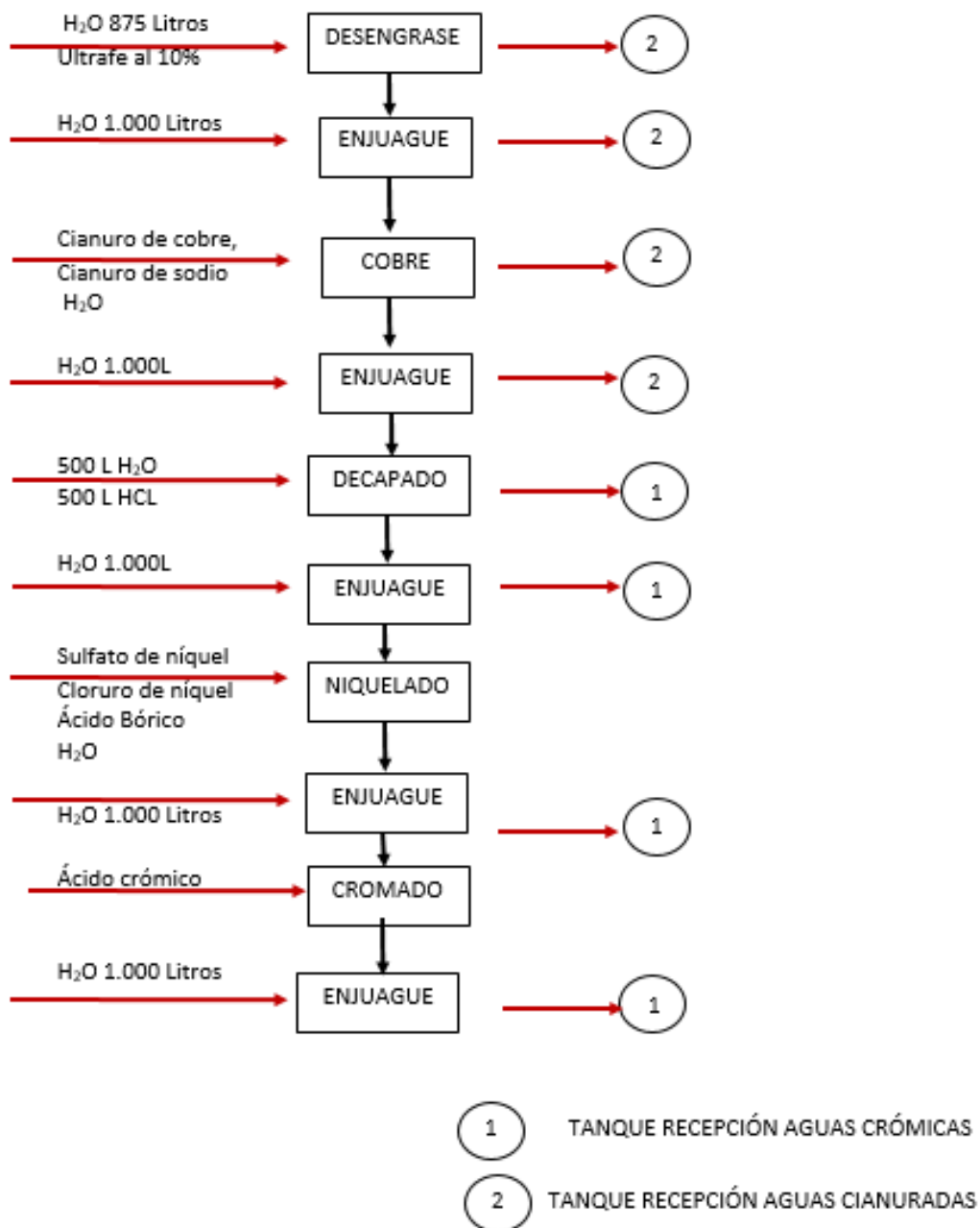


Figura 7 Diagrama de insumos del proceso de niquelado

Antes de iniciar el proceso de galvanizado, se debe llevar a cabo un tratamiento mecánico, el cual consiste en eliminar las asperezas o defectos de las superficies y otras imperfecciones físicas que puedan influir en el recubrimiento de la pieza, a través del pulido de las mismas. Una vez se encuentren listas las piezas se procede a realizar cada uno de los siguientes procesos:

- **Desengrase:** Se eliminan las grasas y los aceites presentes en las superficies de las piezas, provenientes del tratamiento mecánico. Para ello se utilizan tres tipos de desengrase considerando el tipo de grasa adherida en el material:

- ✓ *Limpieza con álcalis por inmersión o rociado:* Consiste en la eliminación de grasas de la superficie del material mediante el uso de soluciones acuosas de álcalis fuertes.
- ✓ *Desengrase electrolítico con álcalis:* Procedimiento de desengrase. Mediante este método las piezas son desengrasadas en un electrolito alcalino con la ayuda de la corriente eléctrica, ejerciendo la mayor parte de las veces, la función de cátodo y rara vez la de ánodo. El polo contrario lo forman los recipientes de hierro del baño o placas de hierro o cobre que se introducen en él. Sin embargo, para la revisión y limpieza de los electrodos es conveniente que éstos puedan extraerse del baño y no estén constituidos por el mismo recipiente.

Para el desarrollo de esta etapa se utiliza energía eléctrica, desengrasantes alcalinos a base de cianuros. Como resultado se generan envases vacíos de los productos químicos utilizados, residuos de desengrasantes utilizados y compuestos orgánicos volátiles.

Por lo general, en el desengrase se llevan a cabo dos operaciones básicas:

- ✓ *Macrodesengrase:* para remover grasa pesada. Utiliza principalmente solventes orgánicos o gasolina.
- ✓ *Microlimpieza:* para remover grasas que aún se encuentran en el metal. Se puede realizar por vía electrolítica con una acción mecánica de remoción física y por vía química, saponificando la grasa para convertirla en jabón.

- **Enjuague:** Consiste en el lavado de las piezas con agua con el fin de eliminar los residuos de la etapa anterior, ya que estos pueden producir manchas y recubrimientos irregulares.

Para esta etapa, se requiere agua y como resultado se generan aguas residuales contaminadas con los químicos utilizados en el desengrase.

- **Decapado ácido:** El objetivo del decapado es eliminar las capas de óxido formadas en la superficie de las piezas metálicas debido al contacto entre éstas y la atmósfera.

Es un proceso que se realiza si el tipo de recubrimiento es de efecto protector. El decapado se realiza sumergiendo las piezas en una solución ácida.

Las soluciones utilizadas pueden ser: ácido sulfúrico, clorhídrico, fluorhídrico, y su uso dependerá del tipo de metal que se esté limpiando. Las concentraciones de estas soluciones generalmente se encuentran al 50% de ácido debidamente inhibido para evitar un ataque excesivo a la pieza.

Al ir aumentando la concentración de impurezas en el baño, la eficacia del decapado decrece. Para mantener la concentración del baño dentro de los límites adecuados para su uso, éste tiene que ser realimentado mediante reposición de ácido nuevo en cantidades variables en función del nivel de contaminación.

Como resultado de esta etapa, se originan aguas residuales y lodos debido a la remoción de los óxidos.

- **Enjuague:** Consiste en el enjuague de las piezas metálicas o plásticas en un tanque con agua para evitar el arrastre del ácido a las siguientes etapas del procesos. (Ministerio del Ambiente del Ecuador)

Para esta etapa se utiliza agua y se generan aguas residuales contaminadas con las soluciones aplicadas en el decapado.

- **Fluxado:** Tiene como objetivos principales que la interacción entre el zinc y la pieza a galvanizar sea mejor, impedir la formación de óxidos durante la espera antes del galvanizado y remover óxidos remanentes del decapado.

En esta etapa se sumerge la pieza de acero en una solución acuosa, compuesta por cloruro de zinc y cloruro de amonio, ($ZnCl_2$ y NH_4Cl), con un reporte molar 1:2 o comúnmente llamada sal doble y menos usadas las sales triples o cuádruples. Las condiciones de trabajo son temperaturas entre 18 y 70 °C.

Una vez aplicado el fundente se seca la pieza, quedando una película de cristales en toda su superficie.

El baño debe mantenerse sin hierro o con un porcentaje muy bajo (máximo 3.000 ppm), ya que esto favorece la formación de dross en la etapa de galvanizado.

El tiempo de espera que debe brindar el fluxado, sin que la pieza se oxide, es de aproximadamente 4 horas.

El principal propósito de calentar el fluxado es que el depósito de sal seque más rápido y explote menos, sin embargo, es más eficiente y recomendable el secado y precalentamiento de las piezas.

Es altamente recomendable filtrar continuamente la solución.

- **Secado y precalentamiento:** Se debe llevar a cabo el secado de las piezas antes de galvanizarlas con el fin de quitarles la humedad. También se favorece el rendimiento térmico del recipiente de galvanizado al elevar la temperatura de las piezas, la cual no debe superar los 100°C.

En el caso de que las piezas no entren totalmente secas al recipiente, se producirán estallidos que despiden partículas de zinc producto del contacto entre la humedad superficial con el baño de galvanizado. Esto ocasionará un peligro para los operadores, mayor consumo de zinc y discontinuidad en la cobertura de la pieza.

En la práctica se ha podido observar que las piezas que son galvanizadas totalmente secas, muestran una mejor superficie galvanizada que las que entran húmedas.

En baños de recuperación lenta de temperatura, el secado, al elevar la temperatura de las piezas a galvanizar, hace que la temperatura durante el proceso, se recupere con mayor rapidez, lo que implica un menor tiempo de recuperación y un menor consumo de energía por tonelada procesada.

El tiempo de secado debe ser el máximo posible con un máximo de una hora.

La capa de sal flux se degrada sobre los 120°C, por lo que no se debe sobrepasar ese límite de temperatura para mantener las propiedades y beneficios del fluxado.

- **Galvanizado:** Las piezas se sumergen en un baño de zinc y normalmente también se les puede agregar plomo, estaño, aluminio o bismuto. Lo característico de la protección galvánica, resulta del hecho que el zinc es más activo electroquímicamente que el acero. La duración del galvanizado estará en función del ambiente a que esté expuesta la pieza y de su cobertura, entre otras variables. La temperatura del baño de zinc tiene gran incidencia en el espesor de cobertura. Se ha observado que para piezas galvanizadas a diferentes temperaturas, los espesores de cobertura son menores para temperaturas bajas. También se observó que una vez se supera los 451°C, el espesor de cobertura empieza a crecer más lentamente. Es importante que se pueda trabajar continuamente a las temperaturas más bajas, ya que esto favorece la uniformidad del galvanizado, la mayor duración del recipiente y la menor cobertura a lograr.

Otro aspecto importante en el galvanizado, específicamente en el espesor de cobertura, son las velocidades de descenso y de izaje de las piezas. Cuanto más baja sea la velocidad de izaje, se tendrá un mayor escurrimiento del zinc sobre la pieza galvanizada. Entre más alta sea la velocidad de descenso, el tiempo de inmersión de la pieza será menor. En general se recomiendan velocidades de izaje entre 0,6 y 0,8 m/min.

El tipo de acero de las piezas a galvanizar también incide en el espesor de la cobertura. En cuanto mayor sea el tamaño del grano del acero base, mayor será la velocidad de difusión y por ende se obtendrán mayores espesores de cobertura. Otra característica de importancia es la rugosidad. A menor rugosidad, menor serán los espesores de cobertura.

Por otro lado el espesor del acero de las piezas es de gran importancia, ya que incide en el consumo de zinc. Para una misma temperatura de galvanizado (448°C), las piezas de mayor espesor de acero tienen una mayor absorción de zinc.

Finalmente, el tiempo de inmersión juega un papel importantísimo en el espesor de cobertura. A mayor tiempo de inmersión, se tendrá una mayor cobertura en las piezas galvanizadas. (Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales, 2001)

3.3 Diagrama de flujo de aguas residuales de la industria

En las Figuras 8 y Figura 9 se presentan los diagramas de flujo correspondiente al proceso de zincado y niquelado de la industria.

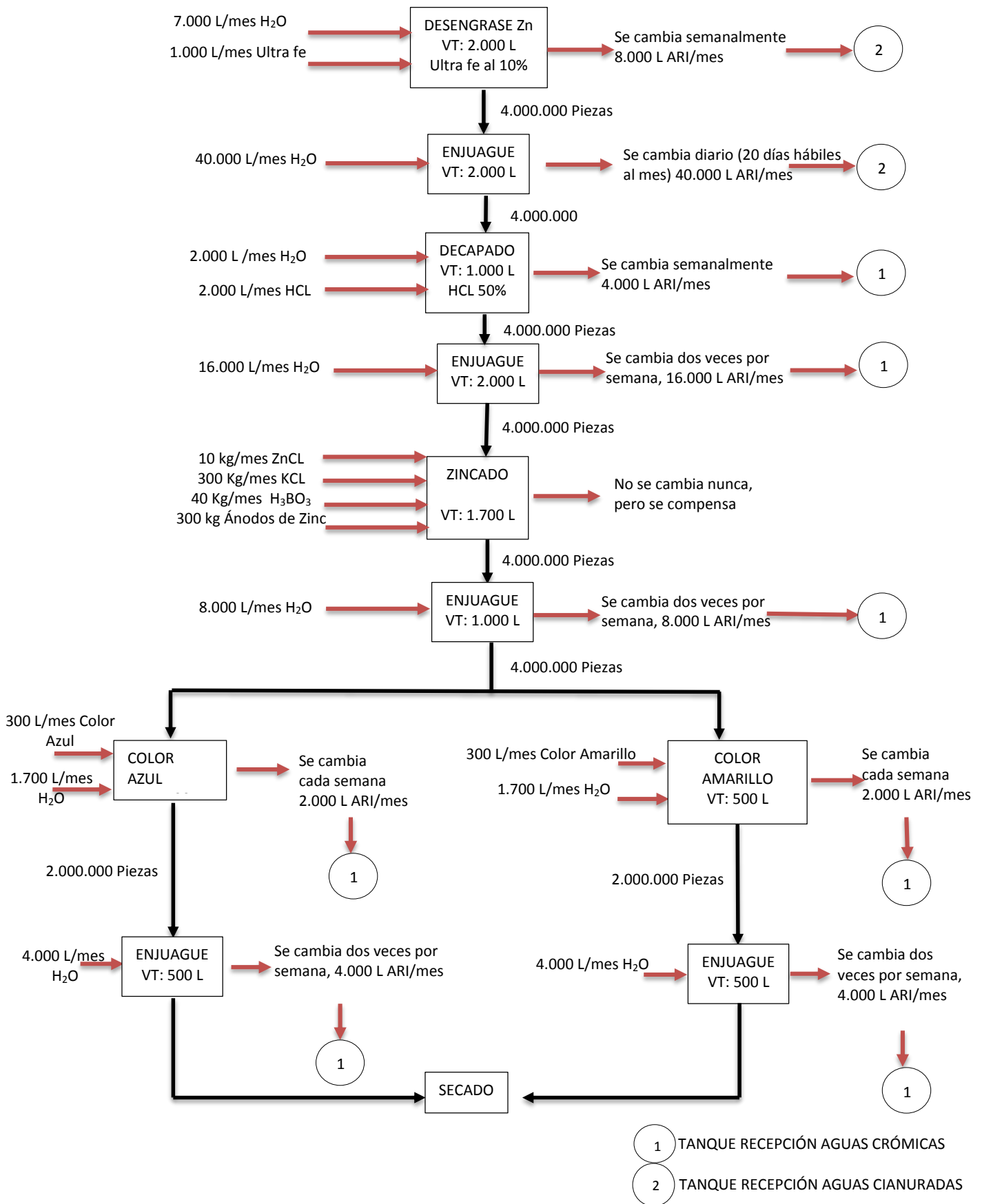


Figura 8 Diagrama de flujo del proceso de zincado

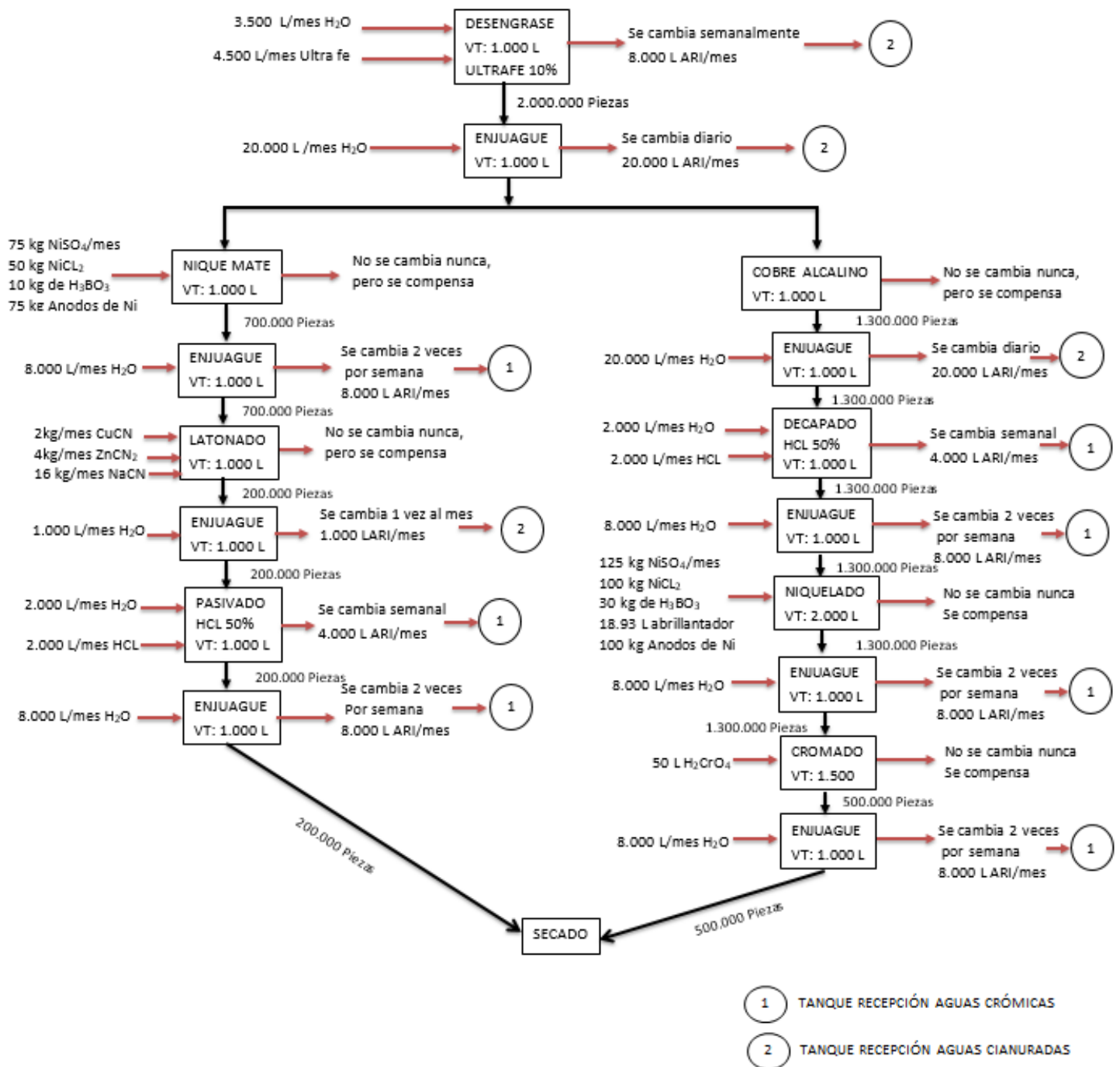


Figura 9 Diagrama de flujo del proceso de niquelado

4 Caracterización del Agua Residual Industrial

En las tablas 1 a 4 se presentan caracterizaciones de aguas residuales provenientes de industrias de galvanoplastia.

Tabla 1 Caracterización agua residual galvánica.
(Morales Posada & Acosta Niño, 2010)

| PARAMETRO | UNIDAD | VALOR |
|-----------|--------|-------|
| Cobre | mg/L | 1,54 |
| Cromo | mg/L | 1,82 |
| Cromo+6 | mg/L | 0,02 |
| Níquel | mg/L | 3,87 |
| Plomo | mg/L | 1 |
| Cinc | mg/L | 3.800 |

Tabla 2 Caracterización agua residual industrial.
(Castañeda Galvis & Montealegre, 2003)

| PÁRAMETRO | UNIDAD | VALOR |
|------------------------------|--------|--------|
| Demanda Biológica de Oxígeno | mg/L | 59 |
| Sólidos Totales | mg/L | 9.287 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | 292 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 6,7 |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | 393 |
| Hierro | mg/L | 43.500 |
| Zinc | mg/L | 7,5 |
| Detergentes | mg/L | 0,9 |
| pH | mg/L | 2,1 |
| Sulfatos | mg/L | 8.222 |

Tabla 3 Características de las aguas residuales típicas para una industria de galvanoplastia.
(Alvarez Cruz & Proaño Jiménez, 2006)

| PÁRAMETRO | UNIDAD | VALOR |
|-------------|--------|-------|
| Temperatura | °C | 25 |
| Turbiedad | NTU | 85 |
| pH | un pH | 4,2 |
| Zinc | ppm | 100 |
| Cromo | ppm | 30 |
| Hierro | ppm | 15 |

Tabla 4 Característica de los análisis de metales pesados en 3 empresas galvanotecnicas de Bogotá
(FUNDES La red de Soluciones Empresariales)

| PÁRAMETRO | UNIDAD | INDUSTRIAS | | |
|-----------|--------|---------------------|--------------------------|---------------|
| | | GALVANOTECNIA RELEC | Industria Electroquímica | Galvanotecnia |
| pH | mg/L | 11,2 | 6,3 | 5,5 |
| CN | mg/L | 41,5 | 3,1 | 73 |
| Cu | mg/L | 2,32 | 10,8 | 1,4 |
| Ni | mg/L | 0,72 | 99 | 16,9 |
| ZN | mg/L | 73,6 | 10,9 | 56,5 |
| T,Cr | mg/L | 15,8 | 162 | 68,1 |

4.1 Caracterización del Agua Residual de la Industria en estudio.

En la Tabla 5 se presenta la caracterización del agua residual industrial suministrada por la industria en estudio. Las caracterizaciones son tomadas en el tanque de recepción de aguas crómicas y aguas cianuradas; las caracterizaciones se realizan por separado en cada tanque.

Tabla 5 Característica de los análisis de metales pesados en la Empresa Seleccionada

| PARAMETRO ANALIZADO | UNIDAD | AGUA RESIDUAL CRUDA |
|---------------------|-----------|---------------------|
| Cobre | mg/L-Cu | 8,3 |
| Níquel | mg/L-Ni | 13,3 |
| Plomo | mg/L-Pb | <0,0003 |
| Cromo | mg/L-Cr | 800 |
| Tensoactivos (SAAM) | mg/L-SAAM | 51,67 |
| Cianuro | mg/L-CN | 1.200 |

Teniendo en cuenta la información disponible, el análisis de tratamiento se realiza para los contaminantes conocidos: Cobre, níquel, plomo, tensoactivos (SAAM) y cianuro.

Se supone que con el pretratamiento de dichos contaminantes el agua residual será aceptable para vertimiento en el alcantarillado.

5 Norma de Vertimiento Aplicable a la Industria

Actualmente en Colombia rige la Resolución 631 de 2015 *“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”*.

El Artículo 13 establece: *“Parámetros Físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas-ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes”*; asignadas para la industria de galvanoplastia los límites incluidos a continuación (Tabla 6)

Tabla 6 Valores máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales
Fuente. Resolución 631 de 2015

| PARÁMETRO | UNIDADES | TRATAMIENTO Y REVESTIMIENTO DE METALES |
|---|---------------------|--|
| pH | Unidades de pH | 6,00 a 9,00 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 250 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 100 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 50 |
| Sólidos Sedimentables (SSED) | mg/L | 2 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 10 |
| Fenoles | mg/L | 0,2 |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Hidrocarburos Totales (HTP) | mg/L | 10 |
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos(HAP) | mg/L | Análisis y Reporte |
| BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Fosforo Total (P) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Cianuro Total (CN ⁻) | mg/L | 0,1 |
| Aluminio (Al) | mg/L | 3 |
| Arsénico (As) | mg/L | 0,1 |
| Bario (Ba) | mg/L | 1 |
| Cadmio (Cd) | mg/L | 0,05 |
| Cinc (Zn) | mg/L | 3 |
| Cobre (Cu) | mg/L | 1 |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,5 |
| Estaño (Sn) | mg/L | 2 |
| Hierro (Fe) | mg/L | 3 |
| Mercurio (Hg) | mg/L | 0,01 |
| Níquel (Ni) | mg/L | 0,5 |
| Plata (Ag) | mg/L | 0,2 |
| Plomo (Pb) | mg/L | 0,2 |

5.1 Necesidades de tratamiento

Para verter las aguas residuales industriales de la empresa al sistema de alcantarillado se debe implementar un sistema de tratamiento el cual cumpla las siguientes eficiencias para remover níquel y cobre (Tabla 7).

Tabla 7 Porcentajes de remoción requeridos

| PARAMETRO ANALIZADO | UNIDAD | AGUA RESIDUAL CRUDA | RES. 631 DE 2015 | EFICENCIA REQUERIDA |
|---------------------|---------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Cobre | mg/L-Cu | 8,3 | 1 | 88% |
| Níquel | mg/L-Ni | 13,3 | 0,5 | 96% |
| Cianuro | mg/L-CN | 1.200 | 0,1 | 100% |
| Cromo | mg/L-Cr | 800 | 0,5 | 100% |
| Plomo | mg/L-Pb | 0,0003 | 0,2 | N/A |
| Tensoactivos (SAAM) | mg/L- | 51,67 | Análisis y reporte | N/A |

6 PTAR Existente

En la Figura 10 se presenta el diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales existente.

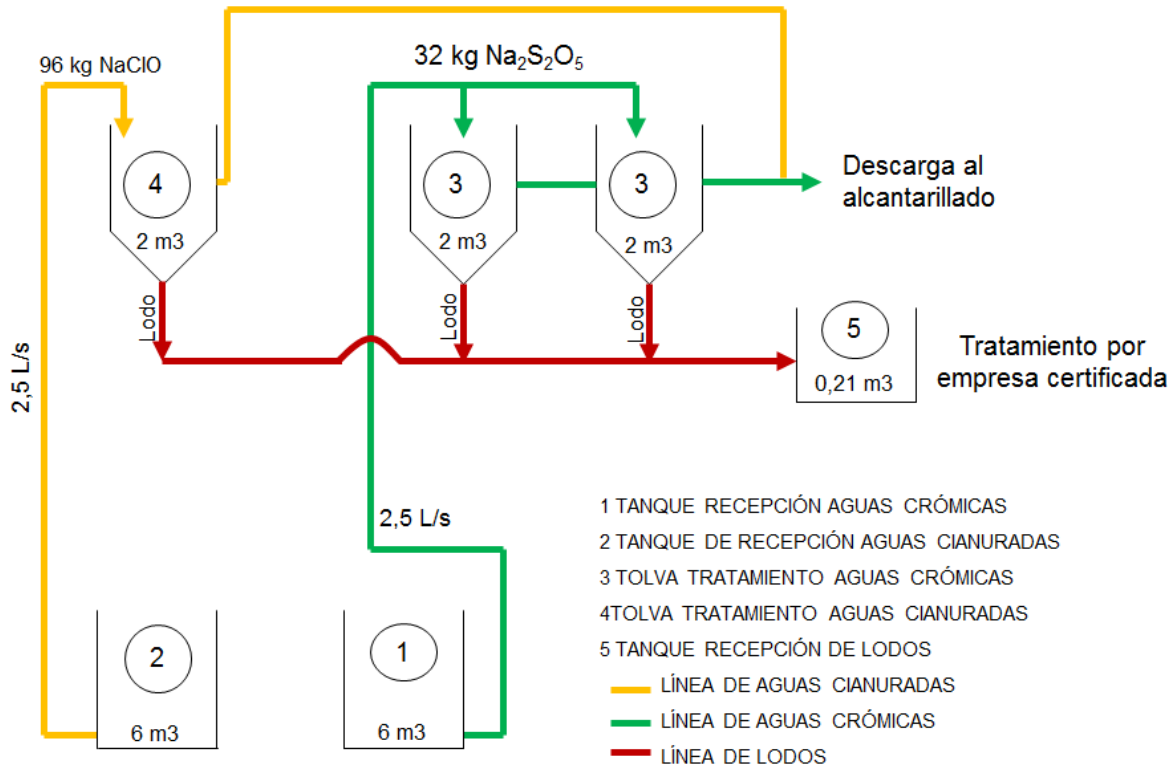


Figura 10 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales

La Planta de tratamiento de aguas residuales industriales consta de las siguientes unidades de tratamiento:

- Tanque recepción aguas crómicas (1)
- Tanque de recepción aguas cianuradas (2)
- Dos Tolvas de tratamiento aguas crómicas (3)
- Una Tolva de tratamiento de aguas cianuradas (4)
- Un tanque de recepción de lodos (5)

El tratamiento de las aguas residuales industriales se realiza por cochadas.

No posee sistema de mezcla para la tolva de tratamiento de aguas crómicas, ni para la tolva de tratamiento de aguas cianuradas.

El caudal que recibe la tolva de tratamiento de aguas crómicas y de aguas cianuradas es de 2,5 L/s cada una.

El agente reductor para el tanque de aguas crómicas es metabisulfito de sodio, el cual es un polvillo blanco que promueve la reducción del cromo. Se consumen 32 Kg de metabisulfito al 20% por cochada.

La tolva de tratamiento de agua crómica es de 2.000 L. La dosis de metabisulfito de sodio es:

$$32kg * 0,2 = 6,4 kg \text{ de metabisulfito}$$

$$\frac{6.400.000 \text{ mg de metabisulfito}}{2.000 \text{ L}} = 3.200 \text{ mg/L}$$

Para tratar las aguas cianuradas se hace oxidación del cianuro mediante 96 kg de hipoclorito de sodio (NaOCl) al 20%.

El consumo de NaOCl es:

$$96kg * 0,2 = 19,2 kg \text{ NaClO/cochada}$$

La tolva de tratamiento de agua crómica es de 2.000 L. La dosis de hipoclorito de sodio es:

$$\frac{19.200.000 \text{ mg}}{2.000 \text{ L}} = 9.600 \text{ mg/L de hipoclorito de sodio}$$

➤ **Tiempo de mezcla**

Cada tanque tiene un tiempo de mezcla de 13,3 minutos

$$tm = \frac{2.000L}{2,5 \text{ L/s}} = 800 \frac{s}{60s} = 13,3 \text{ min}$$

El efluente generado por la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial se relaciona en la Tabla 8.

Tabla 8 Concentraciones efluente de la PTAR

| PARAMETRO ANALIZADO | UNIDAD | AGUA RESIDUAL CRUDA | AGUA RESIDUAL TRATADA | RES. 631 DE 2017 | CONDICIÓN |
|---------------------|-----------|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------|
| Cobre | mg/L-Cu | 8,3 | 1,6 | 1 | NO CUMPLE |
| Níquel | mg/L-Ni | 13,3 | 10,4 | 0,5 | NO CUMPLE |
| Cianuro | mg/L | 1.200 | 80 | 0,1 | NO CUMPLE |
| Cromo | mg/L | 800 | 100 | 0,5 | NO CUMPLE |
| Plomo | mg/L-Pb | 0,0003 | 0,0003 | 0,2 | CUMPLE |
| Tensoactivos (SAAM) | mg/L-SAAM | 51,67 | 16,97 | Análisis y reporte | N/A |

7 Optimización de la PTAR

En la Figura 11 se muestran las modificaciones propuestas para optimizar el proceso de tratamiento.

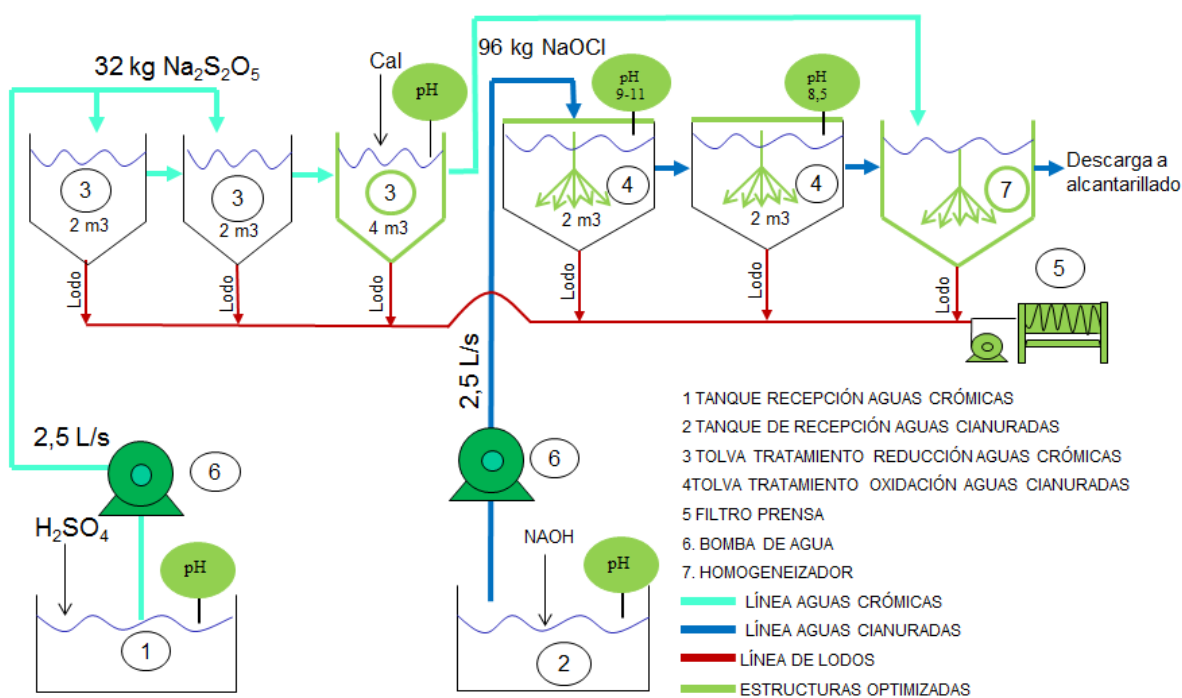


Figura 11 Optimización PTAR

- Se deben separar las aguas cianuradas del resto de aguas, ya que en los tanques de aguas crómicas y aguas cianuradas, donde se realizó el muestreo, se evidencia la presencia de otros metales.
- Para el tratamiento de aguas crómicas y las aguas de enjuagado que contengan cromatos debe reducirse el cromo hexavalente al estado de cromo trivalente, mediante dióxido de azufre gaseoso (SO_2), o con solución de bisulfito de sodio (NaHSO_3) antes de precipitar el cromo en estado trivalente. Es necesario ejercer

un control cuidadoso del pH para mantenerlo entre 2 y 3 en el tanque de reducción mediante la adición de ácido Sulfúrico.

- Para el tratamiento de cianuros el método más común es agregar cloro gaseoso (Cl_2) o hipoclorito de sodio (NaOCl) en solución, para oxidar el cianuro altamente tóxico en cianato menos tóxico, y luego en bicarbonato y nitrógeno inocuo en dos tanques en serie. En el primer tanque de reacción se debe mantener un pH entre 9 y 11 mediante la adición de cal o soda cáustica, y en el segundo tanque se debe mantener un pH de 8,5. La cloración se realiza en condiciones alcalinas, formándose en la primera etapa el cianato y, en la segunda, la oxidación del cianato en bicarbonato y en nitrógeno gaseoso.

Las modificaciones propuestas incluyen:

1. Separar las aguas cianuradas de las aguas crómicas.
2. Controlar pH en las tolvas de aguas cianuradas a un pH de 9 a 11 en la primera y de 8,5 para la segunda.
3. Mantener pH en el tanque de recepción de aguas crómicas entre 2 y 3.
4. Agregar una tolva de aguas crómicas para aumentar el pH a 9,0 a 11 en la primera y a 8,5 en la segunda.
5. Incluir mezclador en cada tolva de oxidación de aguas cianuradas con el fin de obtener un contacto de reacción óptimo entre el oxidante y el agua, de 15 minutos.
6. Agregar un tanque homogeneizador para regular el vertimiento de las aguas al sistema de alcantarillado.
7. Proveer un filtro prensa para secado de los lodos
8. Finalmente, el lodo seco generado será tratado por una empresa especializada contratada por la industria.

La propuesta de optimización realizada ha tenido reportes de remoción de cromo hexavalente y cianuro del 99,5% y 100% respectivamente, según Patterson 1997, en el tratamiento de aguas residuales de una empresa de galvanoplastia que contenía 140 mg/l de cromo hexavalente, se llevó a cabo la reducción en un pH 2.5-2.8, empleando bisulfito de sodio como agente reductor. Se informó que el proceso redujo el cromo hexavalente a concentraciones de 0.7-1.0 mg / L. La oxidación completa de cianuro a bicarbonatos en

presencia de ácidos, logró en el tratamiento mediante cloración alcalina, la reducción de cianuro del agua de enjuague de 700 mg/l a cero mg/l de cianato.

Adicionalmente se pueden tener en cuentas las siguientes medidas de control con el fin de minimizar o eliminar los residuos (Romero Rojas, Aguas Residuales Industriales, 2018):

- Disponer de un tanque de emergencia, alimentado por gravedad, para almacenar metales tóxicos y sus sales.
- Eliminar recipientes frágiles usados para el envase de materiales concentrados.
- Disminuir los derrames, fugas, goteos al piso y otras pérdidas disponiendo de recipientes especiales y canaletas que puedan transportar estas pérdidas a un tanque de almacenamiento.
- Disminuir el uso de agua de lavado mediante el enjuague de alta presión.
- Recuperar metales valiosos que se encuentren en los residuos de las soluciones electrolíticas de la celda de disposición.
- Evaporación de los residuos reusables hasta una concentración conveniente y recirculación al baño electrolítico a una tasa igual a la pérdida del baño electrolítico.

8 Bibliografía

- Acosta Niño, G. E., Coy Barrera, C. A., Bourdon Gracia, A., & Cuervo Lumbaque, E. (2013). La Electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Facultad de Ciencias Básicas Volumen 9 Número 2*, 306-317.
- Alvarez Cruz, F., & Proaño Jiménez, D. (2006). *Implementación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para una Empresa Metal-Mecánica*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- American Galvanizers Association. (2015). *Galvanizado en Caliente para Protección contra la Corrosión*. Colorado: American Galvanizers Association.
- Arundel, J. (2000). *Tratamientos de Aguas Negras y Efluentes Industriales*. Zaragoza, España: Acribia S.A.
- Castañeda Galvis, L. C., & Montealegre, M. L. (2003). *Diseño de un Sistema de Neutralización de Aguas Residuales Industriales en el Proceso de Galvanizado*. Bogotá D.C: Universidad de La Sabana.
- Centro de Economía de Buenos Aires. (s.f.). *Investigación sobre el Sector Productivo Galvanoplastias*. Buenos Aires: Centro de Economía de Buenos Aires.
- Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales. (2001). *Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia*. Colombia.
- Chávez Porras, Á., Cristancho Montenegro, D. L., & Ospina Granados, É. (2009). Una Alternativa Limpia para el Tratamiento de las Aguas Residuales Galvánicas: Revisión Bibliográfica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 40-50.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente - Gobierno de Chile. (2000). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial*. Santiago de Chile: Asociación Chilena de Seguridad.
- Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya. (2003). *Prevención de la contaminación en el sector de superficies*. Catalunya.
- Eckenfelder Jr, W. W., L. Ford, D., & Englande Jr, A. J. (2009). *Industrial Water Quality*. United States of America: The MacGraw-Hill.

- Equipo profesional de Propel Fundes Colombia. (2001). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica*. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente y FUNDES Colombia.
- Flórez, M. E., & Ruiz, J. L. (2008). *La Galvanización en Caliente*. España: Departamento técnico, Asociación Técnica Española de Galvanización.
- FUNDES La red de Soluciones Empresariales. (s.f.). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (s.f.). *Estudio para Conocer los Potenciales Impactos Ambientales y Vulnerabilidad relacionada con las Sustancias Químicas y Tratamiento de Desechos Peligrosos en el Sector Productivo de Ecuador*. Ecuador: Gobierno Nacional del Ecuador.
- Morales Posada, N. B., & Acosta Niño, G. E. (2010). Sistema de Electrocoagulación como Tratamiento de Aguas Residuales Galvánicas. *ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 33-44.
- Morales Posada, N. B., & Acosta Niño, G. E. (2010). Sistema de Electrocoagulación como tratamiento de Aguas Residuales Galvanicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 33-44.
- Ortiz, J. P. (2015). *Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales a través del proceso de electrocoagulación*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Patterson, J. W. (1997). *Wastewater Treatment Technology*. Chicago, Illinois: MANN ARBOR SCIENCE PUBLISHERS INC.
- Pérez, R. (15 de Marzo de 2018). *Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánica*. Obtenido de Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánica: <http://www.asimet.cl/galvanizado.htm>
- Resolución 631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los alcantarillados públicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).
- Ríos, C. A. (2015). *Remoción de Cd y Pb y reducción de Cr(VI) en agua sintética y residual proveniente de una industria de galvanoplastia utilizando biomasa bacteriana*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Romero Rojas, J. A. (2004). Aguas Residuales de Industrias de Galvanoplastia. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería No 53*, 22-30.

- Romero Rojas, J. A. (2018). *Aguas Residuales Industriales*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Tunay, O., Kabdasli, I., Arslan-Alaton, I., & Olmez-Hanci, T. (2010). *Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters*. London: IWA Publishing.
- Vaz, L. G. (2009). *Performance Do Processo de coagulacao/floculacao no tratamento o efluente liquido gerado na galvanoplastia*. Toledo,PR-Brasil: Universidade Estadual DO OESTE DO PARANÁ.