

II-285 - ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LOS ELECTROLITOS PROVENIENTES DEL ÁREA DE GALVANOPLASTIA DE UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE EMPAQUES FLEXIBLES ROTOGRAFADOS

Adrián Dagoberto Sierra Fernández⁽¹⁾

Ingeniero Químico, UC diciembre de 2003. Maestría en Ingeniería Industrial culminación por tesis. Cursos: Matlab, Tratamiento de gas natural, Prevención de riesgos en el trabajo de laboratorio, Ingeniería de los alimentos. Experiencia Laboral: Instructor Universidad de Carabobo, Fisicoquímica, PDVSA-Intevep, Investigador en el área ambiental en aguas y suelos.

Jeanet Cristina Finol Valdivieso⁽²⁾

Ingeniero Químico, diciembre de 2005. Cursos: Diplomado en Mejora Continua de Procesos / Ingles avanzado. Experiencia Laboral: Profesor Universidad de Carabobo, adscrito a cátedra de Fisicoquímica. Pasantía: 3M Manufacturera de Venezuela; Molinos Nacionales C. A. (MONACA).

Dirección⁽¹⁾: Av. Montes de Oca, Resid. "La Arboleda". Torre B. Piso 9. Apto 9-1, Valencia, Edo. Carabobo.

Teléfonos: (+58) 0416-4468172. **Correo:** adrian.sierra@gmail.com

Dirección⁽²⁾: Urb. Trigal Norte Calle Mercurio Qta. Fanny #90-101 Valencia - Edo. Carabobo, Venezuela.

Teléfonos: (+58) 0416-1446706 / 0414-5912400. **Correo:** jeanet_finol@yahoo.com

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfocó en el diseño de una alternativa que permitiera el pre-tratamiento y adecuación de los electrolitos de baños o tinas procedentes del área de Galvanoplastia de una fábrica dedicada a la producción de empaques flexibles impresos por rotograbado, tomando en cuenta que el sistema actualmente operativo resulta insuficiente para asegurar que los parámetros de calidad del vertido final aguas abajo a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la empresa cumpla con la normativa legal vigente Venezolana para disposición al ambiente, tales como los decretos 883 y el 3.219, que regulan el caso específico del Lago de Valencia, importante cuerpo de agua vinculado al presente estudio. Sin embargo, debido a la magnitud de la concentración en metales pesados encontrada, siendo para el cobre de 46.288ppm y para el níquel 37.646ppm, así como la cantidad de sulfatos presentes, para el electrolito de cobre en 89.800ppm y en el electrolito de níquel de 46.840ppm, resultaría inviable económicamente el redimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas de acuerdo con su capacidad de procesamiento. De todas las alternativas estudiadas, siendo corroboradas con experimentos a escala de laboratorio y recopilación de trabajos recientes, resultaron mas favorables la electrodeposición y la coagulación-floculación-sedimentación (precipitación química), siendo los criterios mas influyentes la efectividad del tratamiento y el espacio requerido. En cuanto a las condiciones operativas para el sistema de coagulación-floculación-precipitación química, para la dosificación de sulfato de aluminio y cal disuelta en agua al 10%p/v, se obtuvo que la dosis de reactivos conseguida con la prueba de jarra difiere a la utilizada actualmente en la empresa, aumentando principalmente la cantidad de hidróxido de calcio y manteniéndose la concentración usada de sulfato de aluminio (aproximadamente de 1ppm), aplicados bajo una relación de sulfato de aluminio/cal disuelta de 0,76 y de 1,00 para el electrolito de cobre y níquel, respectivamente. Del proceso de precipitación química se generó una alta eficiencia, presentando un porcentaje de remoción de (75,86±0,01)% para el cobre y (80,76±0,01)% para el níquel. Asimismo, La eficiencia del proceso de electrodeposición obtenida fue la esperada, debido a que presentó porcentajes de remoción de metales que alcanzaron los (82,3±0,9) % para el electrolito de cobre y de (91±1) % para el electrolito de níquel, consiguiendo que para un mayor rendimiento experimental en la electrodeposición, se obtuvo al trabajar con una relación entre el área del cátodo y del ánodo de 1:1. Todos estos resultados permiten reducir los efectos negativos ocasionados al ambiente, y al ser implementados los cambios propuestos se estima que mejoren significativamente el nivel de almacenamiento de tambores y envases contentivos de residuos en espera por su disposición, que limita la capacidad de espacio operativo en planta y conllevan a un gasto elevado.

PALABRAS CLAVES: Tratamiento de aguas, Electrolitos, Galvanoplastia, Electrodeposición, Precipitación, Electrorecuperación, Calidad de efluentes.

INTRODUCCIÓN

La industria galvánica puede representar uno de los pilares en la economía de un país, sin embargo, por la diversidad de productos que maneja, constituye uno de los principales focos de contaminación ambiental, esto debido a que sus residuos poseen una alta concentración de agentes químicos contaminantes. Teniendo en cuenta los efectos que las aguas residuales provenientes de este tipo de empresas pueden causar al medio ambiente, el presente trabajo va orientado hacia la búsqueda de una alternativa atendiendo el caso específico de una empresa que requiere el tratamiento de los desechos líquidos generados en el área de galvanoplastia, los cuales actualmente no se incorporan tal como están a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) existente, debido a que su elevada concentración en metales pesados como cobre y níquel principalmente dificultan su adecuación, teniendo como parámetro crítico adicional la cantidad de sulfatos presentes. Estos parámetros en su conjunto impiden a la empresa, bajo el esquema de trabajo operativo al presente, una correcta disposición final de todos sus vertidos líquidos a los canales municipales que a su vez desembocan a los lagos, mares y ríos de la región central venezolana, razón por la cual el organismo público competente, como lo es el ministerio del ambiente venezolano, se encuentra en monitoreo permanente para hacer cumplir las normas ambientales vigentes, tales como los decretos 883 y el 3.219, que regulan el caso específico del Lago de Valencia, importante cuerpo de agua vinculado al presente estudio.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se requiere el diseño una alternativa viable para el pre-tratamiento de los residuos líquidos provenientes de las tinas o baños de electrolitos generados en el área de galvanoplastia que prepara los cilindros usados en el sistema de rotograbados que se realiza a empaques flexibles destinados a diferentes tipos de aplicaciones. Se pretende entonces, aprovechando los recursos disponibles, normalizar o al menos minimizar la concentración de los parámetros físicos y químicos en los mencionados residuos electrolíticos, para luego poder enviarlos a la PTAR con un contenido de metales pesados y sulfatos relativamente bajo, y así facilitar su adecuación para descargarlos al ambiente cumpliendo con los estándares de calidad establecidos en la ley de aguas residuales para vertidos líquidos descargados a canales municipales. Es relevante mencionar que los residuos líquidos de los baños electrolíticos son desechados una vez que estos han sido agotados para su uso según las especificaciones de calidad requeridas por la industria, pero debido a la magnitud de la concentración en metales pesados encontrada, siendo esta para el cobre de 46.288ppm y para el níquel 37.646ppm, así como la cantidad de sulfatos presentes, para el electrolito de cobre en 89.800ppm y en el electrolito de níquel de 46.840ppm, pareciera simplemente inviable económicamente el redimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas de acuerdo con su capacidad de procesamiento. Es por ello que se estudia la posibilidad de aplicación de diferentes alternativas de pretratamiento para la remoción de metales y sulfatos en tal magnitud, tales como: bioremediación, fitoremediación, electrocoagulación, electrodeposición, precipitación química, entre otras técnicas, a fin de determinar y seleccionar las más adecuadas. Aunado a esto, el propósito perseguido de esta propuesta a futuro sería lograr implantar el tratamiento mas conveniente y que proporcione una alternativa para evitar gastos que son necesarios en la actualidad, puesto a que la empresa contrata un ente externo que se encarga de darle disposición final a estos electrolitos, lo cual posee un costo asociado elevado, y que aún habiendo realizado auditorias a esta contratista, existe la posibilidad que se apliquen tratamientos inadecuados que no ayuden a reducir los efectos negativos ocasionados al ambiente, lo que originaría consecuencias incluso para la empresa, que van desde multas millonarias hasta el cierre temporal o definitivo, de acuerdo con la legislación venezolana en la materia por corresponsabilidad. Toda la investigación se justifica, en que estos residuos líquidos presentan múltiples problemas, teniéndose adicionalmente que el nivel de almacenamiento de tambores y envases contentivos de ellos en espera por su disposición, ha limitado incluso la capacidad de espacio operativo en planta.

OBJETIVO GENERAL

Proponer una alternativa de tratamiento para los electrolitos generados en el área de galvanoplastia de una empresa de empaques flexibles rotograbados, a fin de reducir la cantidad de desechos contaminantes en la planta y adicionalmente con esto aprovechar el espacio físico.

Para realizar esta investigación se plantearon los siguientes **objetivos específicos**:

1.- Caracterizar los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanoplastia de la empresa de rotograbados, mediante análisis fisicoquímicos con el fin de conocer cualitativa y cuantitativamente las propiedades de los parámetros que se requieren ajustar para su posterior tratamiento.

- 2.- Desarrollar alternativas para el tratamiento de los efluentes electrolíticos del proceso, en base a las tecnologías necesarias que minimicen los parámetros regulados según las normas venezolanas establecidas en decretos 3219 y 883 vigentes.
- 3.- Seleccionar la alternativa más adecuada de acuerdo a sus características técnicas para obtener el sistema más conveniente en el tratamiento de los electrolitos desechados en el área de galvanoplastia.
- 4.- Diseñar los equipos necesarios para la alternativa seleccionada, haciendo un análisis costo – beneficio que valore económicamente si es favorable para la empresa su implantación.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se inicia con la realización del **diagnóstico previo** de las operaciones y procesos involucrados en la generación de efluentes del proceso productivo, realizando consultas al personal que opera en el área, específicamente en el departamento de Pre-Prensa, en las áreas de Galvano, PTAR y Laboratorio de PTAR. Se recolecta la mayor cantidad de información relacionada al uso y mantenimiento de los equipos relacionados, recabando lo más relevante en cuanto a la operación y mantenimiento de los equipos de niquelado, cobrizado y los que conforman la P.T.A.R., así como también la dosificación y métodos de control de los reactivos empleados en el manejo de estas máquinas. Asimismo, se consulta bibliografía referente a la elaboración de empaques flexibles, galvanotecnia y tratamiento de aguas residuales en este contexto, revisando a profundidad los manuales de operación de los equipos e instrucciones y procedimientos internos de la empresa, por período de tres (3) meses. De esto resultan dos (2) diagramas Ishikawa o causa-efecto, para el electrolito de cobre y para el electrolito de níquel.

Entonces, se inicia íntegramente con la **caracterización de los efluentes electrolíticos generados en el área de galvanoplastia**, para lo cual se requirió la **definición de los parámetros físico-químicos a cuantificar del efluente** tomando en cuenta los reactivos utilizados en la preparación de cada electrolito, siendo así como se establecieron: las concentraciones de sulfato, fósforo, níquel, cobre y cloruros para cada baño de acuerdo con la composición de los aditivos usados, definiendo entre otros, debido a la existencia de la elevada concentración en estos metales pesados la cuantificación los sólidos totales y sedimentables. Por otra parte, se midió la demanda química de oxígeno (DQO) por la presencia de materia orgánica susceptible a ser oxidada. Luego se determina el **tipo de muestra**, tomando en cuenta que el efluente no presenta significativa variación de su composición a lo largo del tiempo de almacenamiento, no se mueve del lugar y debido al sistema de las cubas los electrolitos sufren constante agitación (homogenizando la muestra), se toman **muestras puntuales** considerándolas como representativas. Los baños electrolíticos poseen un tiempo de vida útil dentro del proceso productivo de aproximadamente tres meses para el caso del cobre y un año para el caso del níquel, tiempo en el cual se le realiza el cambio total de sus componentes y generando al mismo tiempo el desecho, por lo cual la posibilidad de tomar en más de una temporada de muestreo era poco probable, confiando para el análisis con alguna data histórica consistente.

Se utilizó el servicio prestado por el laboratorio Hidrolab Toro (ente externo), garantizado por estar avalado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, este muestreo además contó con la reproducibilidad de los parámetros medidos por los autores en los laboratorios de fisicoquímica y ambiental de la Universidad de Carabobo.

Tomando en cuenta el resultado de esta caracterización **se desarrollan alternativas para realizar el pre-tratamiento**, procediendo inicialmente a **estudiar diferentes tecnologías existentes**, de manera conocer sus características funcionales mas relevantes para poder posteriormente seleccionar la más adecuada, enfocando el estudio en minimizar el tiempo de almacenamiento de estos residuos líquidos dentro de la planta, evitando así que se pueda causar alguna contingencia que afecte el normal funcionamiento de las actividades productivas y que ponga en riesgo la salud de los trabajadores. Por su lado, las **alternativas tecnológicas de tratamiento propuestas** para su consideración son: 1) biorremediación, 2) electrocoagulación, 3) electrodeposición, 4) fitorremediación y 5) la precipitación química. Se recopila toda la bibliografía necesaria, y se revisan los **requerimientos y exigencias de los decretos 883 y 3.219** para los parámetros críticos calculados durante la caracterización.

Posteriormente, **se seleccionan y evalúan los factores a estudiar** para escoger la alternativa que mejor se adapte a los requerimientos y a la disponibilidad existente, se realizan corridas experimentales preliminares a nivel de laboratorio (entre ellas **pruebas de jarra, electrodeposición y remediación**) para establecer las condiciones y dosificaciones mas adecuadas para cada etapa propuesta. Se utilizó el **método de los factores determinantes**

elaborando una matriz de selección de la alternativa más conveniente, en función de la ponderación y valor que se le asigna a cada factor y tecnología estudiada, teniendo como **factores o criterios de selección** con sus ponderaciones: la disponibilidad (20%), el espacio requerido (25%), la efectividad (25%), la operatividad (10%) y el costo asociado (20%).

Como siguiente paso, se **diseña los equipos del sistema de tratamiento en base a la tecnología seleccionada** y seguidamente se **dimensionan las unidades y equipos involucrados** en el sistema de pre-tratamiento seleccionado, de lo cual resulta la unión de dos (02) alternativas de tratamiento propuestas para el material peligroso, estableciendo **los modelos matemáticos** que definen el diseño y la operación de las unidades de tratamiento tomando en cuenta no solo las características del efluente sino también el máximo aprovechamiento del espacio disponible. Luego, **se especificaron y seleccionaron los reactivos a dosificar** según: las características del efluente, la generación de lodos, la disponibilidad para la empresa de adquirir el mismo; otros criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño definitivo de los equipos del sistema de tratamiento, fueron: el material de construcción, la disponibilidad, dimensiones de las unidades y la evaluación de los tiempos de operación de los equipos, así como la retención del efluente a tratar en la planta, y su **acoplamiento con el funcionamiento de la planta de tratamiento actual (PTAR)**.

Finalmente, realizar una **estimación económica** para establecer las posibles ventajas de su aplicación, de acuerdo a la inversión realizada para implementar el pre-tratamiento, a partir de la **relación Costo-Beneficio**. En cuanto a la estimación de los **costos de implementación**, se incluyó la construcción del equipo, la materia prima, costos energéticos y de mano de obra; en el caso de los beneficios estuvieron incluidos todos los ahorros por concepto de espacio, prima de seguro, disposición de electrolitos y las ganancias por concepto de recuperación de los chips de níquel y varillas de cobre.

RESULTADOS OBTENIDOS

Antes de realizar el diagnóstico previo del proceso y efectuar la identificación de causas que inciden en el incremento en la generación de estos residuos líquidos, se debe hacer una comprensión del proceso de galvanoplastia de la empresa en estudio, el cual consiste en un proceso para *recubrimiento de cilindros* por medio de procedimientos galvánicos, en las diferentes condiciones en las que son adquiridos por la empresa para su posterior uso en la impresión de empaques flexibles, esquematizado como se muestra en la figura 1, para permitir una breve descripción del mismo.

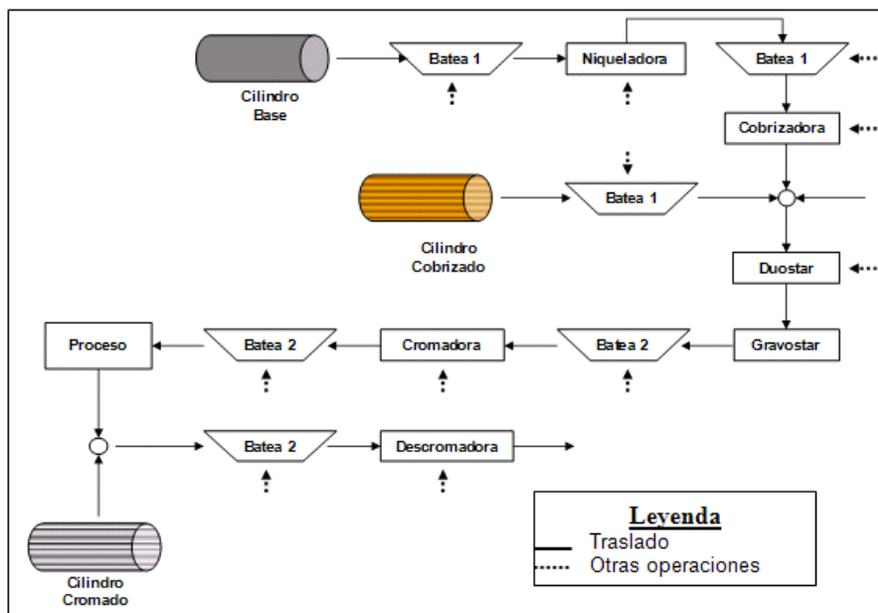


Figura 1. Etapas del proceso de galvanoplastia utilizado en la empresa en estudio.

El proceso comienza cuando la empresa adquiere o toma de su stock un cilindro base, hechos de una aleación de acero, y se pasa a la batea 1 para realizarle el proceso de lavado. El cilindro se traslada a la máquina niqueladora, que trabaja con una corriente de 4 a 6 A/dm² para electrodepositar en su superficie el níquel proveniente del baño, para nuevamente ir a la batea 1, para ser frotado con una lija de poliéster y enjuagado con agua cruda. Luego, va a la máquina cobrizadora donde se somete a una densidad de corriente de 25 A/dm² para electrodepositar en su superficie cobre proveniente del baño en el cual se sumerge. Cuando los cilindros son adquiridos previamente cobrizados, deben ser limpiados en la batea 1, siendo frotado con lija nº120 seca y luego mojada, para luego enjuagar con agua cruda y desengrasante. Los cilindros cobrizados, son preparados para su grabación y para ello se trabajan en la máquina Duostar, donde se le realiza el lavado con un sistema interno de enjuague neutro que contiene agua desmineralizada, aditivo Megafluid MDC TJ30 (tratamiento de superficies mecánicas) y Antischaum MDC TJ (antiespumante). En esta etapa el cilindro es pulido o borrado, según sea el caso, para ajustarlo al espesor de cobre necesario para poder grabarlo.

El siguiente paso lo realiza la máquina Gravostar, donde se graba el diseño deseado en la superficie de cobre, y se traslada a la batea 2, donde el cilindro es colocado en rotación y frotado con algodón y acetato de etilo; aplicándole pulimento para metales (comúnmente llamado brasso); luego es lavado con pasta desengrasante y agua cruda; y decapado con ácido sulfúrico 10% v/v, para finalmente ser lavado con agua caliente desmineralizada, para pasarlo al racle de goma y secarlo.

Otra etapa se lleva a cabo en la máquina cromadora, donde se somete a una densidad de corriente de 100 a 125 A/dm² para electrodepositar cromo en su superficie, a posterior se traslada a la batea 2, donde es lijado con lija de poliéster y luego se enjuaga con agua cruda; se le pasa el racle de goma y luego es secado con papel secante. Finalmente, se forra con Air Pack y se identifica. Una vez finalizado este proceso, se traslada hacia las máquinas impresoras, en el área de producción.

Una variante corresponde a los cilindros que son adquiridos por la empresa cromados previamente por proveedores, solo deben limpiarse en la batea 2, y luego a la máquina Descromadora, donde se somete a un proceso inverso a la electrodeposición, aplicándoles una corriente de 50 A/dm², y en último lugar a la máquina Duostar, para su posterior borrado y grabación con un nuevo diseño en la Gravostar.

De igual manera como se describe el proceso Galvánico de grabado de los cilindros, se mencionan las etapas existentes en el **proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales (P.T.A.R.)** de la empresa descritas en la figura 2, que cuenta básicamente con: un separador de aceites y grasas libres, un tanque de almacenamiento de efluente con cromo, un tanque reductor de cromo, un tanque de igualación (de descarga general), una unidad de coagulación-floculación y sedimentación, un tanque de almacenamiento de agua tratada, filtros de arena y carbón activado, y por último los lechos de secado.

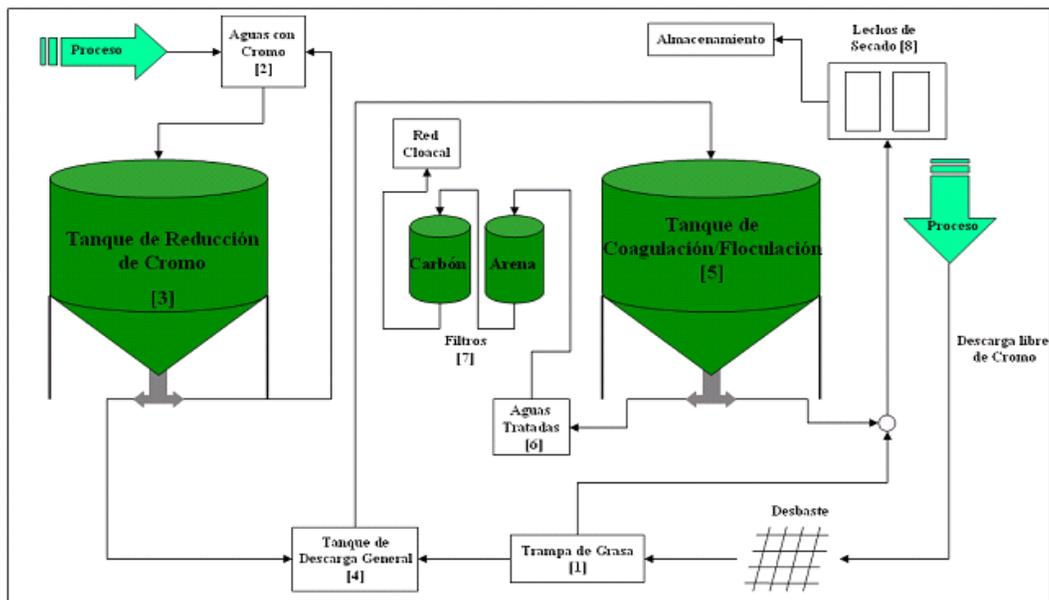


Figura 2. Diagrama de la planta de tratamiento de aguas residuales existente.

El diagnóstico previo se apoya en el establecimiento de diagramas de Ishikawa o causa-efecto, de manera de detectar las causas que pudiesen estar incidiendo en el aumento al presente, en la cantidad de desechos electrolíticos generados, realizando el análisis e identificación de dichas fallas. Los residuos líquidos estudiados consisten en dos tipos de baños electrolíticos, uno de níquel y el otro de cobre, por tanto se realizó un diagrama Ishikawa para cada uno de ellos, como se muestra en las figuras 3 y 4, respectivamente.

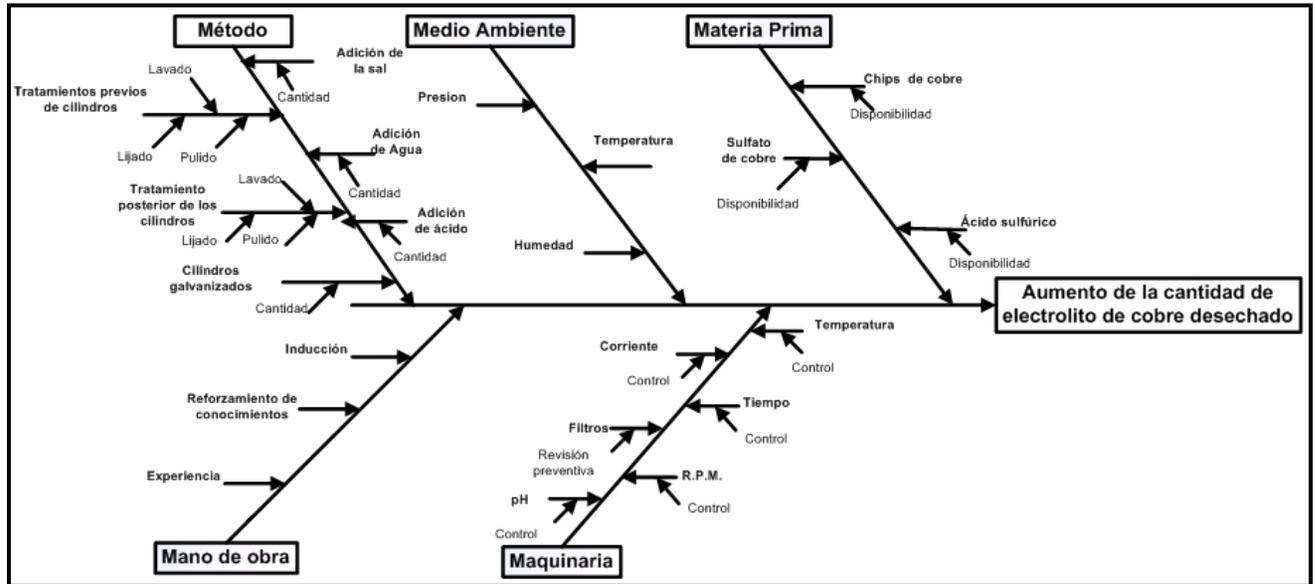


Figura 3. Diagrama causa-efecto para el electrolito de Cobre.

Con el análisis de esta herramienta se tiene en cuenta que las categorías que agrupan las causas más relevantes según el estudio son: la maquinaria, el método y la mano de obra. En la maquinaria, se encuentra que para poder alargar la vida útil de los baños electrolíticos se requiere de cierto grado de control operativo automatizado en los equipos, como el de la intensidad de corriente para evitar el empobrecimiento de la película líquida catódica, o el reproceso por aplicación de una intensidad de corriente que se exceda y genere depósitos quebradizos; o también para la temperatura óptima que garantice un buen acabado del cobrizado o niquelado, el tiempo de procesamiento del cilindro, o el control de pH que evite un depósito de mal aspecto ó pasivación de los ánodos. En el método se categoriza los tratamientos previos y posteriores al procesamiento de los cilindros, debido a la gran importancia que posee el lavado de los cilindros antes de ser cobrizados o niquelados, para eliminar impurezas como tintas, solventes, entre otros que podrían contaminar el baño y hacer necesario el cambio del mismo para lograr un recubrimiento eficiente. La mano de obra incide por encontrarse con una alta rotación de personal en el área, inadecuada inducción que refuerce o actualice los conocimientos, debido a la implementación de nuevas tecnologías para el galvanizado y el aumento de la producción han influido en las condiciones de trabajo, quedando poco claro al personal la importancia de la correcta realización de los tratamiento previos y posteriores, que puede causar la falla operativa y generación de desechos electrolíticos.

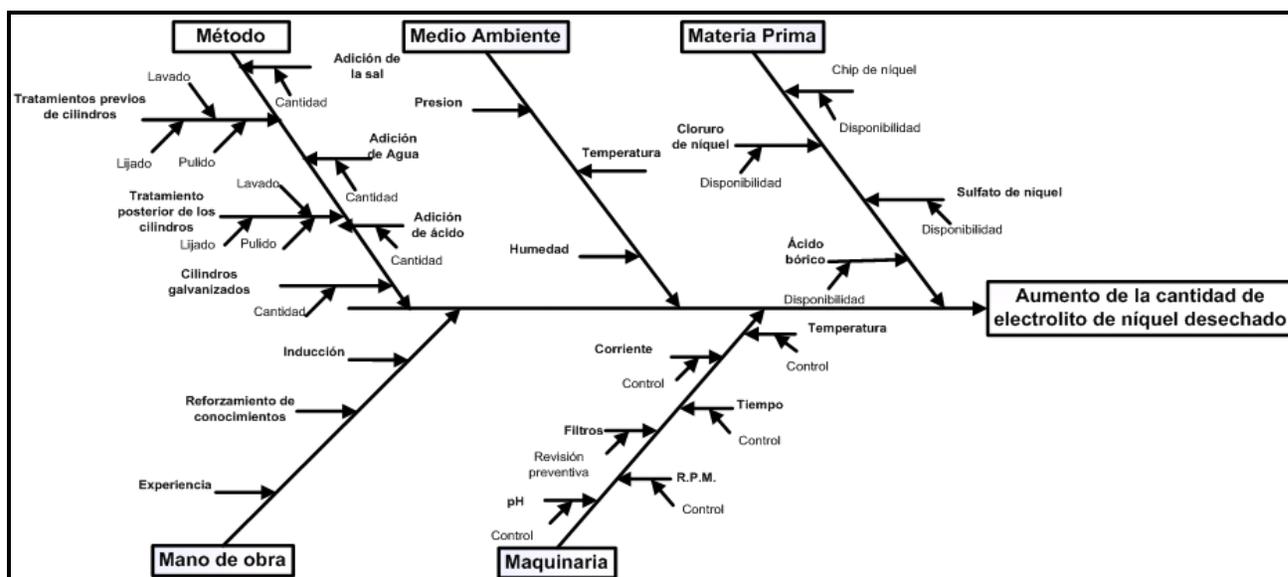


Figura 4. Diagrama causa-efecto para el electrolito de Níquel.

Posteriormente, se procede a la respectiva caracterización de los residuos líquidos, sabiendo que el proceso estudiado es por carga, con un volumen de 1600L de electrolito de cobre cada tres meses y de 600L del electrolito de níquel anuales. Para esto se realiza el muestreo y determinación de los parámetros de estos efluentes midiendo DQO (mg/L) por la presencia de material susceptible a ser oxidado químicamente, así como sólidos suspendidos (mg/L) y sedimentables (mL/L), concentraciones: de cobre como Cu^{+2} (mg/L), de níquel como Ni^{+2} (mg/L), de sulfatos (mg/L), de fósforo total (mg/L), de cloruros (mg/L), por las características químicas de las sustancias en los baños, por último la temperatura y pH entre los más resaltantes del estudio. Se puede observar un resumen de estos parámetros en la tabla 1, y aún cuando muchos de ellos se encontraban fuera de la norma venezolana aplicable, resalta entre estos los valores más críticos para su adecuación, como resulta la concentración de cobre, de níquel y de sulfatos, por tener valores muy altos y fuera de control con las técnicas simples comúnmente conocidas.

Tabla 1. Caracterización de los electrolitos provenientes de los baños galvanicos

Parámetro medido	Electrolito de Cobre	Electrolito de Níquel	Límites Art. 38 Decreto 3.219
Cobre (Cu^{+2}) (mg/L)	46.288,44	-	0,5
Níquel (Ni^{+2}) (mg/L)	-	37.646,99	1,0
DQO (mg/L)	1.724	1.192	700
Sólidos suspendidos (mg/L)	800	1036	400
pH (adim)	0,99	4,26	6 – 9
Temperatura (°C)	28	30	5
Sólidos sedimentables (mL/L)	<0,01	<0,1	100
Sulfatos (SO_4^{-2}) (mg/L)	89.800	46.840	400
Fósforo total (P) (mg/L)	0,8	0,84	10
Cloruros (Cl) (mg/L)	<0,01	9.480	300

Como se pudo apreciar en la tabla 1, las concentraciones de los contaminantes presentes en el efluente a tratar son tan elevadas que no se ajustan a la capacidad de remoción de las tecnologías consultadas a menos de que se apliquen repetidos reciclos, que para tales niveles de contaminantes resultarían poco eficientes y adicionalmente incrementarían los costos y el tiempo de operación en forma considerable. Es por ello que se plantea la necesidad de mezclar gradualmente estos electrolitos con el efluente proveniente de la empresa, para que paulatinamente sean llevados en los tanques de igualación hasta un punto en el cual se pueda tratar según los métodos disponibles; y en consecuencia, esta operación se hizo indispensable como aplicación en el tratamiento, por lo tanto no se incluyó en el método de selección de la tecnología (matriz de los factores determinantes). Para aclarar un poco, el

trabajo no implicó simplemente en recurrir al uso de la dilución, algo inadmisible hoy en día, sino utilizar otro efluente de la misma industria, proyectando en este trabajo un mezclado que utiliza agua contaminada proveniente de las otras áreas, la cual, solo exhibe características dilutivas debido a que la concentración y cantidad de nuestros contaminantes críticos, resulta despreciable comparado con el residuo electrolítico que deseamos tratar, como lo expresan Adhoum (2004) y Heidmann (2007).

En base a los parámetros críticos encontrados, se orientó el planteamiento de las principales tecnologías para las cuales se diseñaría el tratamiento de los electrolitos, pues estos permitieron la identificación de los tipos de tratamiento de acuerdo al tipo de desecho. Se muestra en la tabla 2, las ventajas y desventajas que en síntesis presenta cada tecnología, entre las cuales se tuvo en cuenta: la Biorremediación, la Fitorremediación, la Electrodeposición, la Electrocoagulación y la Precipitación Química. La bibliografía consultada reveló algunas características resaltantes tanto de diseño, como en niveles de eficiencia en la remoción alcanzada, que fue corroborada con experimentos a escala de laboratorio, y recopilación de trabajos de investigación antecedentes bastante recientes, tales como Rashidi (2008), Congeevaram, et al. (2006), Salim (2001) y Soto, et al. (2006).

Tabla 2. Ventajas ofrecidas y desventajas presentadas por cada una de las tecnologías planteadas

VENTAJAS				
Biorremediación	Fitorremediación	Electrodeposición	Electrocoagulación	Precipitación Química
1.- Económica. 2.- Presenta disponibilidad aceptable. 3.- Remueve metales pesados y sulfatos. 4.- Ocupa poco espacio.	1.- Económica. 2.- Presenta disponibilidad aceptable. 3.- Remueve metales pesados y sulfatos.	1.- Remueve metales pesados. 2.- Genera beneficio económico. 3.- Ocupa poco espacio. 4.- No necesita inducción al personal.	1.- Remueve metales pesados y partículas coloidales. 2.- Genera pocos lodos. 3.- Eficiencia de remoción alta.	1.- Remueve metales pesados, sulfatos y partículas coloidales. 2.- Económico. 3.- No necesita inducción al personal. 4.- No amerita construcción de equipo.
DESVENTAJAS				
Biorremediación	Fitorremediación	Electrodeposición	Electrocoagulación	Precipitación Química
1.- No se probado para concentraciones tan elevadas de ningún contaminante. 2.- Necesitan tiempo de retención muy altos. 3.- Es una tecnología muy nuevas que se encuentran aun en periodo de prueba.	1.- Requiere de grandes espacios de terreno. 2.- No se probado para concentraciones tan elevadas de ningún contaminante. 3.- Necesitan tiempo de retención muy altos. Es una tecnología muy nuevas que se encuentran aun en periodo de prueba.	1.- Solo remueve metales pesados. 2.- Amerita un costo energético.	1.- Alto costo de instalación 2.- Alto costo energético. 3.- No se probado para concentraciones tan elevadas de ningún contaminante.	1.- Genera alta cantidad de lodos.

Por consiguiente, se elabora una matriz ponderación de factores determinantes para la selección de la(s) tecnología(s) de remoción de contaminantes, partiendo inicialmente de las ventajas y desventajas descritas para cada una de ellas, y estudiando algunos aspectos técnicos de estas para establecer la puntuación correspondiente. La ponderación asignada a cada uno de los factores estuvo basada principalmente en las necesidades y sugerencias hechas por la gerencia, los supervisores y empleados, así como numerosas consultas a bibliografía y expertos en la materia. El resultado de la selección en base a los factores y ponderaciones descritas antes resultó favorable para las alternativas de electrodeposición y coagulación-floculación-sedimentación (precipitación química), siendo los

criterios mas influyentes la efectividad del tratamiento y el espacio requerido, con un puntaje total de 420 y 470, respectivamente.

Luego, se diseñan los equipos necesarios para el sistema de tratamiento en base a la tecnología seleccionada con la finalidad de adecuarlo a las características de los desechos que se generan. Como se explicó, en resumen las tecnologías a utilizar para el tratamiento de los electrolitos desechados en el área de galvanoplastia fueron **electrodeposición** para la recuperación de los metales presentes en el desecho, el mezclado progresivo con aguas residuales internas de la empresa y posteriormente, **la precipitación química** enfocada esencialmente en la disminución de los sulfatos, que representa el principal componente del residuo electrolítico antes mencionado. A continuación, se detallarán cada uno de los elementos de la propuesta en orden de aplicación, incluyendo los resultados de la fase experimental así como también los parámetros de su posible aplicación a escala industrial.

1) Aplicación de electrodeposición para la recuperación de cobre y níquel presentes en el residuo electrolítico, realizada bajo la teoría deposición catódica fundamentada en el enunciado de la primera y segunda ley de Faraday. Esta ley se aplica tanto para electrolitos fundidos como para soluciones de estos y es independiente de la temperatura, presión y la naturaleza del solvente si este es capaz de promover la ionización del soluto (Maron y Prutton, 1998). Se montan entonces los experimentos para ambos tipos de electrolitos (de cobre y de níquel), a fin de disminuir al máximo posible la concentración de estos metales pesados y recuperar chips que son adquiridos como materia prima para su procesamiento.

Tabla 3. Masa recuperada de metal de cobre a diferentes áreas del cátodo

Área del cátodo (Área ± 0,01) Dm ²	Tiempo de exposición (t ± 0,01)s	Densidad de corriente (ρ _i ± 0,4) A/dm ²	Masa recuperada (mrem ± 0,01)g	Rendimiento (R ± 0,05) %
0,45	30:39	8,0	0,91	43,70
0,89	30:15	4,0	2,07	95,15
1,78	30:55	2,0	1,31	63,15

Temperatura: (22,0±0,5) °C. Volumen de la muestra (1,00±0,01) L.
Área de los ánodos de plomo en sumergida (0,89 ± 0,01) dm².

Si se observa el compendio de los resultados de la deposición catódica, existe un mayor rendimiento cuando la relación entre el área sumergida del cátodo y del ánodo es 1:1 (igual valor), nótese lo descrito en las tablas 3 y 4. El porcentaje de rendimiento se calculó por la diferencia encontrada entre la cantidad de masa que debió ser depositada de acuerdo a la ley de Faraday, y la que se depositó de manera experimental, la densidad de corriente es baja corroborándose de esta manera lo expresado por los expertos en las consultas previas realizadas, quienes expresaron que a baja densidad de corriente se evitan interferencias de la impurezas obteniendo mayor cantidad de masa depositada y se evita la hidrólisis del agua que impide o limita el paso de la corriente y minimiza la deposición del metal en el cátodo. Para determinar los parámetros a utilizar se varió el área del cátodo de manera de obtener la densidad de corriente y la relación de área de los electrodos mas adecuadas, manteniendo constante la intensidad de corriente, el voltaje y el área de los ánodos, según Rashidi (2008).

Tabla 4. Masa recuperada de metal de níquel a diferentes áreas del cátodo.

Área del cátodo (Área±0,01) Dm ²	Tiempo de exposición (t ± 0,01)s	Densidad de corriente (ρ _i ±0,4) A/dm ²	Masa recuperada (mrem ± 0,02)g	Rendimiento (R ± 0,5)%
0,45	30:00	8,0	0,98	51,0
0,89	30:45	4,0	1,76	91,5
1,78	30:10	2,0	1,24	65,0

Temperatura: (22,0±0,5)°C. Volumen de la muestra (1,00±0,01)L
Área de los ánodos de plomo en sumergida (0,89 ± 0,01) dm².

Una vez obtenida el área de los cátodos y la densidad de corriente aplicada mas adecuadas, se calculó el porcentaje de remoción del metal de los electrolitos analizados, para lo cual se utilizó un montaje del equipo de electrodeposición, el cual se realizó en la Universidad de los Andes de Venezuela (ULA) y que consistió en dos ánodos inertes de plomo para ambos casos, y como cátodos (donde se realiza la deposición del metal) varillas de

cobre para el electrolito de cobre y chips de níquel para el electrolito de níquel, destacando que ambos materiales son residuos generados en otras etapas del proceso productivo de la empresa.

En los experimentos del laboratorio se conectó el sistema a un rectificador de corriente y se sumergieron en el electrolito tanta cantidad de cátodos como para que la suma de sus áreas en la solución fuese la suma el área de sumergida de los ánodos. Luego, se colocó en exposición de corriente por periodos de dos horas cada grupo, se tomó el peso de los cátodos antes y después del proceso, calculando de esta manera la cantidad de masa total depositada, finalizando el proceso una vez que la diferencia en la masa depositada entre una corrida y la siguiente no era significativa, obteniéndose un tiempo de exposición de diez horas aproximadamente, lo cual se condensa en la tabla 5 tanto para el electrolito de cobre como para el electrolito de níquel.

Tabla 5. Parámetros para los electrolitos de cobre y de níquel a escala laboratorio en el proceso de electrodeposición

Electrolito de Cobre		Electrolito de Níquel	
Corriente aplicada ($I \pm 0,05$)	3,5	Corriente aplicada ($I \pm 0,05$)	3,5
Tiempo de exposición (h)	10:08:03	Tiempo de exposición(h)	10:03:08
Masa recuperada ($mrem \pm 0,01$)	38,10	Masa recuperada ($mrem \pm 0,01$)	34,11
%Remoción ($R \pm 0,9$)	82,3	%Remoción ($R \pm 0,9$)	91

Temperatura: (23,0±0,5) °C. Volumen de la muestra (1,00±0,01) L.

Es imprescindible que los ánodos usados sean inertes para evitar ineficiencia del tratamiento, pues de no ser así traería como consecuencia que pasen a la solución partículas del metal que los constituyen, permitiendo de esta manera que puedan depositarse en el cátodo por acción de la corriente aplicada, disminuyendo así el grado de pureza del metal recuperado. Es por ello que para verificar la condición inerte de los ánodos utilizados, se pesaron al inicio y al final del proceso obteniendo excelentes resultados para tal condición.

Una vez que se cuenta con las condiciones de operación del proceso de electrodeposición, se procede a construir los cronogramas de trabajo, tanto para la operación de la planta de tratamientos bajo las nuevas condiciones de trabajo que involucra el trasegado programado de ciertas cantidades de electrolito hasta su tanque de descarga general para efectuar su posterior tratamiento, como también para el pretratamiento electroquímico de los electrolitos que se debe realizar semanalmente. Este esquema de trabajo se describe como guía al momento de implementar un control operativo del sistema propuesto, mostrado en las tablas 10 y 11, ubicadas en los anexos.

2) Definición de las condiciones de tratamiento fisicoquímico propuesto: como parte del desarrollo y diseño de la propuesta se tiene que los valores más críticos de los análisis realizados nos remiten sobretudo a la concentración del ión sulfato, puesto que en etapas anteriores se pudo corroborar la alta eficiencia de remoción del cobre y níquel mediante la electrodeposición, y es por ello que centramos nuestra atención en la cantidad de sulfatos presente. Entonces, se lleva a cabo el mezclado experimental a nivel industrial de los electrolitos con aguas residuales de la empresa con una relación 75:1 para el electrolito de cobre y 200:1 para el de níquel, a fin de avalar lo propuesto, muestreando la descarga general para un lote de 16 batches, del cual se puede identificar que la concentración más alta de sulfatos presentes en la descarga general pertenece al segundo batch de la semana 10, en una muestra con 1470 ppm de sulfatos, incluso mayor que la reportada por los últimos análisis trimestrales del histórico realizado en la empresa, garantizando así el peor escenario. Entonces, se realizan las pruebas de jarras para estas muestras, que permitan estimar las condiciones operativas para el sistema de coagulación-floculación-precipitación química, y la dosificación de sulfato de aluminio y cal disuelta en agua al 10% p/v.

Se trabaja con diez muestras ya mezcladas con efluente, para cada electrolito, a: cobre y b: níquel, y se dividieron en dos grupos: aquellas donde se dejó fija la cantidad de cal, y en el otro grupo de cinco, para la mejor dosis de sulfato de aluminio resultante de las primeras pruebas, se varió la cantidad de cal (CaO), de acuerdo con Salim (2001) y Soto, et al. (2006).

Tabla 6. Parámetros finales del segundo grupo de jarras de la prueba A

Muestra N°	Relación entre sulfato de aluminio e hidróxido de calcio ($R_{sc} \pm 0,02$) adim	pH final ($pH_f \pm 0,01$) adim	Concentración final de sulfatos ($C_{sf} \pm 0,4$)ppm	Peso de los lodos ($Pl \pm 0,01$) g	Tiempo de sedimentación ($T_s \pm 0,1$) s
6. a	1,20	7,48	1184,8	1,75	300
7. a	1,00	7,70	905,4	2,14	334
8. a	0,86	7,70	778,4	1,98	288
9. a	0,76	7,67	588,4	2,64	281
10. a	0,66	7,24	618,0	2,75	262

Temperatura de la muestra: $(22,0 \pm 0,5)$ °C. Volumen de la muestra: $(400,00 \pm 0,15)$ mL.

pH inicial: $(3,07 \pm 0,01)$ Adim. Concentración inicial de sulfatos: $(2437,4 \pm 0,4)$ ppm

Se puede apreciar que la mejor dosificación de sulfato de aluminio y cal se encontró en la muestra número 9.a de la tabla 6, presentando un porcentaje de remoción de $(75,86 \pm 0,01)$ % con cierta cantidad de lodos floculados, esto puede deberse a que el aumento de la carga de sulfatos en el agua residual presente, reaccionó con parte del exceso de hidróxido de calcio añadido a la solución, precipitando como sulfato de calcio, generando además, mayor carga másica de lodos. Otra fuente de aumento de lodos proviene muy probablemente de la insolubilización del cobre que no se coaguló con el hidróxido de calcio, formando un precipitado correspondiente al hidróxido de cobre.

Tabla 7. Parámetros finales del segundo grupo de jarras de la prueba B.

Muestra N°	Relación entre sulfato de aluminio e hidróxido de calcio ($R_{sc} \pm 0,02$) adim	pH final ($pH_f \pm 0,01$) adim	Concentración final de sulfatos ($C_{sf} \pm 0,4$)ppm	Peso de los lodos ($Pl \pm 0,01$) g	Tiempo de sedimentación ($T_s \pm 0,1$) s
6. b	1,20	7,59	495,8	1,43	352
7. b	1,00	7,78	325,0	1,19	344
8. b	0,86	7,77	459,8	1,43	333
9. b	0,76	7,93	340,8	0,96	281
10. b	0,66	8,02	954,0	1,63	435

Temperatura de la muestra: $(23,0 \pm 0,5)$ °C. Volumen de la muestra: $(400,00 \pm 0,15)$ mL.

pH inicial: $(6,01 \pm 0,01)$ adim. Concentración inicial de sulfatos: $(1689,4 \pm 0,4)$ ppm.

En cuanto al electrolito de níquel, en la tabla 7 se puede apreciar que la jarra con menor concentración de sulfatos al final de la prueba fue la 7.b, con una eficiencia de remoción de sulfatos de $(80,76 \pm 0,01)$ %. Es de notar que la gran diferencia entre la muestra 10.b y las demás radica posiblemente en que la cantidad de base añadida fue tal, que el proceso de coagulación no se activó del todo, generando mayor turbidez, la cual persistió luego del tiempo de sedimentación. Para este caso, al igual que para el cobre, la turbidez disminuyó considerablemente en la dosis seleccionada.

La apariencia obtenida al tratar fisicoquímicamente ambos electrolitos fue de tonalidades claras azulada y verdosa, respectivamente, encontrándose que para las mejores dosificaciones de reactivos en ambos casos esta tonalidad disminuyó en forma considerable. Por otra parte, es posible para cada jarra de los ensayos realizados, proyectar la cantidad de lodos que se generaría por batch, utilizando la información obtenida del peso de los lodos producidos, extrapolando esta información al volumen total de efluente a tratar. En la tabla 8, se presenta una estimación de los volúmenes requeridos para la operación en un batch de 10.000L de efluente. Los parámetros proyectados de un batch que contenga electrolito de níquel y de cobre están allí especificados para cada electrolito, bajo las mejores dosificaciones logradas.

Tabla 8. Parámetros de operación del tratamiento físico-químico para el electrolito de cobre y níquel mezclado

Tipo de Electrolito	Volumen de $Ca(OH)_2$ proyectado (V_{cp})L	Volumen de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ proyectado (V_{ap})L	Volumen de $Na(OH)$ proyectado (V_{np})L	pH de operación (pHo)adim
Electrolito de cobre	80	60	13,75	7,67
Electrolito de níquel	60	60	---	7,78

En líneas generales se puede decir que el sistema de precipitación de sulfatos es más eficiente para remoción obtenida del electrolito níquel que para el de cobre, esto es ciertamente debido a que la concentración y cantidad de sulfatos del primero es mucho menor en comparación con el del electrolito de cobre. En cuanto al color aún apreciable en todas las imágenes, se cuenta con un tratamiento posterior de filtración que atenuará la ligera coloración, según se comprobó en el laboratorio, debido a las propiedades de la arena y el carbón activado. Por otra parte, se puede apreciar que para ambos electrolitos, el pH al finalizar el proceso de coagulación es un poco menor a 8 unidades, haciéndolo apto según los parámetros establecidos en el decreto 3.219 y comprobando que bajo las condiciones establecidas en el diseño, el agua de la planta puede soportar perfectamente las adiciones de electrolito. Metcalf y Eddy (1996).

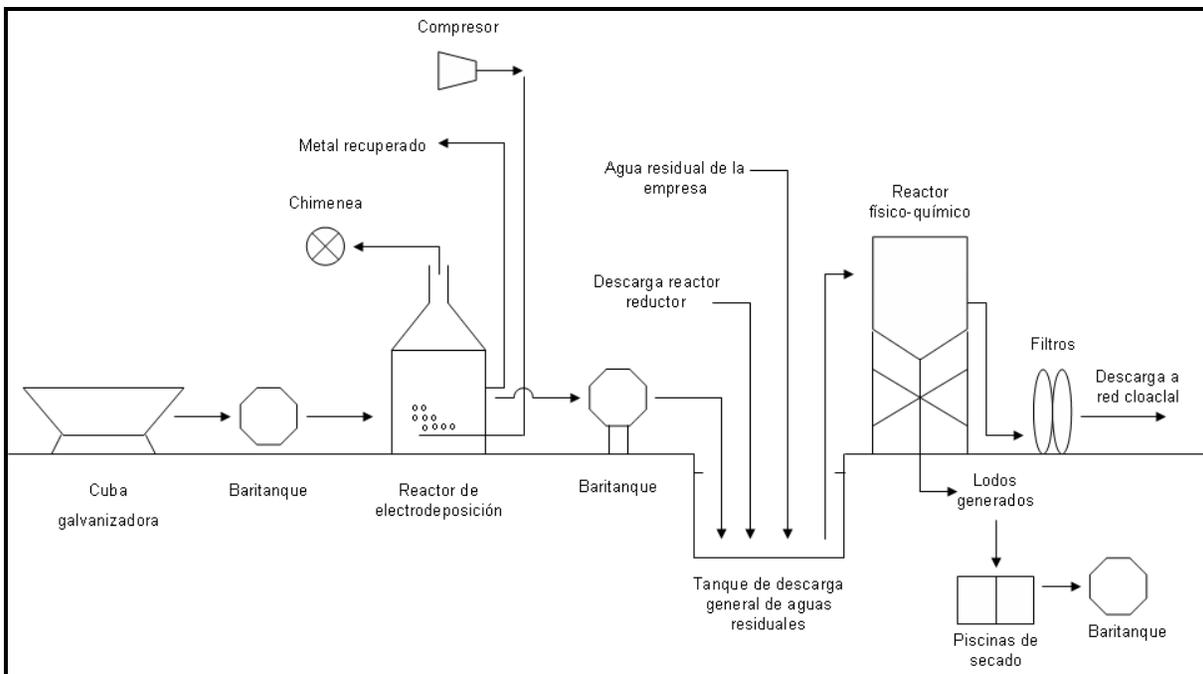


Figura 5. Diagrama del proceso de la tecnología de tratamiento propuesta.

A manera de descripción, se operará el sistema de la figura 5, teniendo en cuenta que: cuando se desecha el electrolito de cobre el mismo es trasegado de la máquina cobrizadora a los baritanques de polietileno de alta densidad por un sistema de bombeo, trasladando el líquido al lugar donde se encuentra el tanque de electrodeposición, el cual cuenta con ánodos de plomo y cátodos de cobre, se coloca en funcionamiento el sistema a una corriente con las especificaciones descritas antes en tablas 3, 4 y 5, durante un aproximado de 8 horas diarias por un periodo de 2 semanas, reemplazando los cátodos semanalmente. Al finalizar el proceso de electrodeposición, el líquido es vertido a los baritanques, para este caso se utilizarían dos, debido a que los mismos poseen una capacidad de 1 m^3 cada uno, todo este sistema conectado a un medidor de gasto que controla el volumen agregado del electrolito al tanque de descarga general donde se realiza el mezclado, cuyos tanques se encuentran ubicados a una altura de 1 metro del nivel del tanque de descarga, trasvasando un día antes de la realización de cada batch como se indica en el cronograma de la tabla 10 (véase anexos), para el caso del

electrolito de cobre se agregan 133,33 L de solución para el mezclado. Posterior a cada mezclado se realiza el batch en el tanque coagulador-floculador al cual se le agrega las dosis descritas de sulfato de aluminio y cal. Finalizado este proceso, los lodos sedimentados son enviados a la piscina de secado y el sobrenadante al tanque de aguas tratadas.

Para el caso electrolito de níquel se realiza el mismo procedimiento, las especificaciones para la aplicación del proceso de electrodeposición se encuentran de igual manera en la tabla 5, y para el tratamiento físico-químico en la tabla 8. El punto crítico del proceso se presenta en el momento en que es desechado el baño de níquel, debido a que se realizan ambos tratamientos de manera simultánea como se muestra en el cronograma de trabajo en la tabla 10, en anexos.

Por otra parte la acumulación de volumen en el tanque de descarga general trae como consecuencia que se realice un batch adicional anualmente como se muestra en la tabla 11 (véase anexos). Bajo las estimaciones realizadas de acuerdo con la capacidad operativa actual del sistema acoplado a la planta de tratamiento de aguas residuales, avalado por las pruebas descritas, llevadas a cabo en el laboratorio, todos los valores, indican la eficiencia necesaria del sistema de pre-tratamiento con la secuencia de las etapas utilizadas, obteniéndose resultados muy favorables a nivel fisicoquímico por debajo de los requerimientos legales, tomando como punto de comparación la calidad del efluente alimentado a la PTAR, lo que garantiza una mayor facilidad en el procesamiento de efluentes para su adecuación a las normas ambientales.

Para determinar *la factibilidad económica* del sistema de pre-tratamiento se calculan los *costos totales* de equipos y accesorios teniendo en cuenta que algunos de ellos están disponibles en las instalaciones de la empresa, así como los costos de instalación, imprevistos y de mantenimiento. En base a ello se estiman los activos fijos tangibles e intangibles. El costo asociado a la construcción del sistema, entonces se obtiene considerando solo como necesario: tuberías, tanques de polietileno, capote de acero inoxidable, cesta de titanio y ánodos de cobre y níquel, sería de 11.180\$. De igual manera, se estima el costo de los reactivos (materia prima) para los lotes definidos de electrolitos tratados en el sistema propuesto, el costo de la mano de obra calculado en base a que la planta de tratamiento necesita un operador con un sueldo mínimo, esto sin tomar en cuenta las prestaciones sociales y el seguro. Otro costo contabilizado se tiene en el caso del consumo energético, calculado su valor en base al costo de cada KWH para una industria tomando en cuenta el amperaje al cual trabajará el equipo y el tiempo de uso. El total de los costos descritos de construcción del sistema, mas la materia prima, operación (mano de obra y energía), da un valor de 18.600\$ al primer año.

Para obtener el *beneficio económico*, es necesario recordar que la empresa actualmente no dispone de un mecanismo adecuado para realizar el tratamiento final a dicho residuo trayendo como consecuencia la necesidad de contratar servicios externos, que acarrea consigo un costo asociado, mientras que con la implantación de la tecnología propuesta eliminaría por completo este gasto, garantizando darle un tratamiento adecuado a dichos electrolitos, evitando la posibilidad de incurrir en alguna falta ambiental por su mala disposición. Algunos parámetros incluidos en la estimación se describen en la tabla 9.

Tabla 9. Beneficios anuales estimados que se obtienen de la aplicación del sistema

Descripción	Costo anual (\$)
Venta o uso del cobre y níquel recuperado, aproximada	2.790
Alquiler de los 21 m ² de terreno ocupado por los electrolitos	3.950
Ahorro en prima de seguro, aproximada	2.325
Ahorro de disposición de electrolitos	9.410
Total	18.475

Todos estos beneficios tienen un costo que representa un reembolso monetario y por medio del cual se recupera la inversión inicial en el tiempo de pago correspondiente. Adicionalmente, se determina que la relación costo – beneficio para el sistema de tratamiento es 1,01 años, lo que indica que la inversión inicial se pagará en aproximadamente 1 año, ya que en ese lapso se tendrá la retribución de poco más de lo invertido para su implementación, concluyendo que la alternativa propuesta es económicamente factible. Se puede resaltar que a pesar que la relación costo-beneficio dio un valor muy cercano al límite de viabilidad económica (la unidad) que establecen muchos de los criterios conocidos, como en Giugni, et al. (2001), se puede considerar que su implementación resultaría muy factible debido a la gran cantidad de ahorros que no se están considerando en los beneficios, como los relacionados a la ley sobre desechos y materiales peligrosos en su artículo 78 de la normativa

de esa ley -Decreto N° 2.635-, que expresa que la empresa no quedaría exenta de dichas multas por no ser ellos quienes directamente disponen de los desechos, debido a que la misma será responsable de sus residuos dentro del ciclo de vida de los mismos. Esta multa como se expresó anteriormente estaría por el orden de las 6.000 unidades tributarias (aproximadamente 106.800\$), aunado a una posible parada de planta, la cual representaría igualmente una pérdida millonaria.

CONCLUSIONES

- 1.- Los parámetros considerados más críticos en el estudio físico-químico de los electrolitos presentes en los baños, están representados por la cantidad de sulfatos, con una concentración inicial de 89.800 ppm para el electrolito de cobre y de 46.840 ppm para el electrolito de níquel, además de los mencionados metales pesados correspondientes a cada electrolito.
- 2.- El método empleado para la selección de la tecnología fue una matriz de selección, siendo las tecnologías seleccionadas como más adecuadas para el tratamiento de los residuos líquidos electrolíticos: la electrodeposición y precipitación química por coagulación-floculación.
- 3.- La eficiencia del proceso de electrodeposición obtenida es alta, debido a que el mismo presentó porcentajes de remoción de metales que alcanzaron los $(82,3\pm 0,9)$ % para el electrolito de cobre y de (91 ± 1) % para el electrolito de níquel.
- 4.- El mayor rendimiento experimental para la electrodeposición, se obtuvo al trabajar con una relación entre el área del cátodo y del ánodo de 1:1, como se esperaba de acuerdo con la opinión de expertos y las consultas de la bibliografía.
- 5.- Se encontraron apenas pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos de manera experimental y los expresados por la Ley de Faraday, logrando experimentalmente un rendimiento para la electrodeposición del cobre de $(95,15\pm 0,05)$ % y para el níquel de $(91,5\pm 0,5)$ %, respecto de la mencionada ley.
- 6.- La dosis de reactivos conseguida con la prueba de jarra difiere a la utilizada actualmente en la empresa, aumentando principalmente la cantidad de hidróxido de calcio y manteniéndose la concentración usada de sulfato de aluminio, aplicados bajo una relación de sulfato de aluminio/cal disuelta de 0,76 y de 1,00 para el electrolito de cobre y níquel, respectivamente.
- 7.- El proceso de precipitación química generó una alta eficiencia, presentando un porcentaje de remoción de $(75,86\pm 0,01)$ % para el cobre y $(80,76\pm 0,01)$ % para el níquel, presentando a la salida del tratamiento fisicoquímico la concentración de sulfatos es de 588,4 ppm y 325,0ppm, respectivamente.
- 5.- La relación costo – beneficio resultante es 1.01, por lo que se considera viable incluso económicamente de aplicar la propuesta explicada.

RECOMENDACIONES

- a) Realizar mantenimientos preventivos a los baños galvánicos para alargar su tiempo de vida útil.
- b) Realizar estudios posteriores a los lodos para conseguirle alguna utilidad evitando así el almacenamiento de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Adhoum, N. Monser, L. Bellakhal, N y Belgaied, J. (2004). Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr (VI) by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, B 112, 207-213.
- 2.- ASTM D2035-80 Standard practice for coagulation – flocculation jar test of water.
- 3.- Cadorin, L. Tabosa, E, Paiva, M y Rubio, J. (2006). *Tratamiento de riles mineros ácidos por precipitación química y flotación por aire disuelto*. Presentado ante el Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales. Habana, Cuba.
- 4.- Congeevaram, S. Dhanarani, S. Park, J. Dexilin, M y Thamaraiselvi, K. (2006). Biosorption of chromium and níquel by heavy metal resistant fungal and bacterial isolates. *Journal of Hazardous Materials*, 146, 270 – 277.
- 5.- COVENIN. Norma Venezolana: aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de sulfato. Norma 2189:1994. Primera revisión.

- 6.- Delmoral, N., Bordones, L., (2001). Evaluación y diseño de un proceso para disminuir la cantidad de cromo hexavalente contenido en el efluente proveniente del proceso de pasivado de una empresa productora de acero galvanizado. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
- 7.- Giugni, Ettetgui, González y Guerra (2001). Evaluación de proyectos de inversión. Segunda edición. Universidad de Carabobo. Valencia – Venezuela.
- 8.- Heidmann, I y Calmano, W. (2007). Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 934-41
- 9.- Kurniawan, T. Chan, G. Lo, W y Babel, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118, 83 – 98.
- 10.- Maron S., y Prutton C. (1998), Fundamentos de Fisicoquímica, Editorial Limusa-Wiley, México.
- 11.- Metcalf y Eddy (1996). Ingeniería de aguas residuales. Editorial Mc Graw Hill. México.
- 12.- Rashidi, A y Amadeh, A. (2008). The effect of current density on the grain size of electrodeposited nanocrystalline nikel coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2002, 3772 – 3776.
- 13.- Salim, M., Abdellah, K. (2001). Reducción de la Concentración de Iones Cobre en Aguas Residuales Generadas de la Galvanoplastia. Resumen publicado. University of Blida. Blida, Armenia.
- 14.- Soto, E., Miranda, R., Sosa, C., Loreda, J. (2006). Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química. Resumen publicado, Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Químicas. México.

ANEXOS

Tabla 10. Cronograma de trabajo en PTAR al implementar la etapa de mezclado de los electrolitos.

Domingo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
<p>1.- Reducción de cromo. 2.- Trasiego al tanque de descarga general. 3.- Trasiego de los efluentes que se encuentran en el tanque de descarga general al tanque de coagulación-floculación.</p>	<p>1.- Descarga de los lodos a las piscinas de secado. 2.- Trasiego del sobrenadante que se encuentra en el tanque de coagulación-floculación al tanque de descarga general.</p>	<p>1.- Paso del efluente que se encuentra en el tanque de aguas tratadas a los filtros de arena y carbón para luego ser desechados a la red cloacal. 2.- Verter la cantidad correspondiente de electrolito por batch a tratar al tanque de descarga general.</p>	<p>1.- Reducción de cromo. 2.- Trasiego al tanque de descarga general. 3.- Trasiego de los efluentes que se encuentran en el tanque de descarga general al tanque de coagulación-floculación.</p>	<p>1.- Descarga de los lodos a las piscinas de secado. 2.- Trasiego del sobrenadante que se encuentra en el tanque de coagulación-floculación al tanque de descarga general.</p>	<p>1.- Paso del efluente que se encuentra en el tanque de aguas tratadas a los filtros de arena y carbón para luego ser desechados a la red cloacal.</p>	<p>1.- Verter la cantidad correspondiente de electrolito por batch a tratar al tanque de descarga general.</p>

Tabla 11. Cronograma de trabajo para el tratamiento de los electrolitos.

Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
<p>1.- Salida del desecho de cobre. 2.-Trasiego al tanque de electrodeposición para la remoción de cobre. 3.-Tratamiento de electrodeposición para la remoción de cobre.</p>	<p>1.-Tratamiento de electrodeposición para la remoción de cobre.</p>	<p>1.-Trasiego al tanque de almacenamiento donde se realiza la dosificación para realizar el proceso de mezclado en la planta de tratamiento del electrolito de cobre. 2.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 3.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8
<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10. 3.-Salida del desecho de níquel. 4.-Trasiego al tanque de electrodeposición para la remoción de níquel.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento. 2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10. 3.-Tratamiento de electrodeposición para la remoción de níquel.</p>

Tabla 11. Cronograma de trabajo para el tratamiento de los electrolitos (Continuación).

Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
<p>1.-Trasiego al tanque de almacenamiento donde se realiza la dosificación para realizar el proceso de dilución del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>3.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>
Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16
<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p> <p>3.-Salida del desecho de cobre.</p> <p>4.-Trasiego al tanque de electrodeposición para la remoción de cobre.</p> <p>5.-Tratamiento de electrodeposición para la remoción de cobre.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p> <p>3.-Tratamiento de electrodeposición para la remoción de cobre.</p>	<p>1.-Trasiego al tanque de almacenamiento donde se realiza la dosificación para realizar el proceso de mezclado en la planta de tratamiento del electrolito de cobre.</p> <p>2.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de níquel en la planta de tratamiento.</p> <p>3.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>	<p>1.-Realizar proceso de mezcla del electrolito de cobre en la planta de tratamiento.</p> <p>2.-Aplicar tratamiento fisicoquímico como lo indica el cronograma. Ver tabla 10.</p>