

**DISEÑO DE ALTERNATIVAS PARA LA OXIDACION DE CIANUROS Y REMOCION
DE METALES PRESENTES EN LOS EFLUENTES DE LA EMPRESA DE
ELECTRORRECUBRIMIENTOS FANTAXIAS LTDA.**



**EDUIN BALLESTEROS CARRILLO
RUBEN DARIO MARTINEZ MONSALVE**

FANTAXIAS Ltda



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2007

**DISEÑO DE ALTERNATIVAS PARA LA OXIDACION DE CIANUROS Y REMOCION
DE METALES PRESENTES EN LOS EFLUENTES DE LA EMPRESA DE
ELECTRORRECUBRIMIENTOS FANTAXIAS LTDA.**

EDUIN BALLESTEROS CARRILLO

RUBEN DARIO MARTINEZ MONSALVE

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico. Ph. D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

AGRADECIMIENTOS

Llegar al final de una formación profesional exitosa como esta, es sin duda fruto de consagración personal, pero sería imposible sin la ayuda y el apoyo de un sinnúmero de personas. Llegó el momento más oportuno para agradecer a quienes nos han ayudado y transmitido lo más puro de sus conocimientos.

Mencionarlos a todos sería una lista infinita, pero le expresamos con toda sinceridad y respeto a los profesores de la Universidad Industrial de Santander, al colectivo de personas del Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), que nos sería imposible llegar aquí hoy sin la ayuda y la colaboración de cada uno de sus miembros.

Nuestros agradecimientos y reconocimientos:

Al Ph. D. Ing. Humberto Escalante Hernández, nuestro tutor que ha sido para el trabajo de grado un verdadero preceptor en todos los sentidos, ejemplo de disciplina, sin su ayuda y colaboración sería casi imposible la realización de este proyecto.

A la Empresa de Herrajes FANTAXIAS LTDA y a COLCIENCIAS, por permitirnos desarrollar este proyecto brindándonos todo su apoyo técnico y económico.

Al Grupo de Biohidrometalurgia de la UIS – GIMBA, que nos facilitaron instalaciones y equipos para el desarrollo del proyecto.

Al Químico y Magíster Olger Mendoza que en todo momento nos brindó su apoyo incondicional y desinteresado con sus valiosos conocimientos e información.

Al MSc. Ing. Julio Elías Pedraza Rosas que en muchas ocasiones nos transmitió sus conocimientos de su extensa y rica experiencia.

A todos, nuestra eterna gratitud.

A Dios por darme sabiduría, fortaleza y ser guía en mi vida,

A mis padres Humberto y María Cecilia por su apoyo incondicional y sabios consejos,

A mis hermanos Sandra, Cristian y Elkin porque me han brindado su afecto,

A mi hija Vanessa por ser el motivo de mi vida y perseverancia,

A mis amigas, amigos y personas que han aparecido en diferentes etapas de mi vida por estar siempre conmigo

Para todos ustedes...

Eduin

A Dios Todopoderoso, dador de las ciencias y de la sabiduría y además mi amigo y mi dueño.

*A mis Padres **Álvaro Martínez** y **Lilia Monsalve** por su amor y apoyo que no tiene límites.*

*A mis hermanos **Jhonatan** y **Angely** porque me han
brindado su afecto y he sentido siempre su presencia.*

*A mis **amigas, amigos** y personas que han aparecido en diferentes etapas de mi vida y que creen en mí.*

Con mucho cariño para todos ustedes...

Rubinho

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. FUNDAMENTO TEORICO	3
2.1 Procesos de recubrimiento de superficies	3
2.2 Tipos de recubrimiento	4
2.2.1 Cobrizado	4
2.2.3 Cromado	4
2.2.4 Latonado	4
2.2.5 Cincado	5
2.2.6 Dorado	5
2.3 Problemática ambiental de los recubrimientos metálicos	5
2.4 Tratamiento de las aguas residuales industriales	6
2.4.1 Oxidación de compuestos cianurados	8
2.4.2 Técnicas de remoción de metales pesados y eliminación de sales	11
3. METODOLOGÍA	16
3.1 Análisis bibliográfico y recopilación de datos	16
3.2 Recomendaciones técnicas de producción más limpia (PML)	17
3.2.1 Estudio y apropiación de los procesos industriales llevados a cabo en la empresa Fantaxias Ltda.	17
3.2.2 Diagrama del proceso de recubrimiento de la sección de galvanía	17
3.2.3 Muestreo de los efluentes y caracterización fisicoquímica	17
3.2.4 Evaluación del índice de carga contaminante (ICC)	18
3.3 Estudio experimental de oxidación de cianuros y precipitación de metales para los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.	18
3.3.1 Elección y determinación de las condiciones de operación de la técnica de precipitación química	18
3.3.2 Elección y determinación de las condiciones de operación de la técnica de clorinación alcalina con hipoclorito de sodio para la oxidación de cianuros	19
3.3.3 Determinación de consumos de reactivos en las técnicas de precipitación química de metales y oxidación de cianuros	20

3.3.4 Prueba de evaporación para la eliminación de cloruros	20
3.4 Selección y diseño básico de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales industriales de Fantaxias Ltda.	20
3.4.1 Alternativas para el tratamiento de los efluentes	20
3.4.2 Selección de alternativas	21
3.4.3 Aplicación de la técnica de precipitación química y clorinación alcalina a las alternativas seleccionadas con efluentes reales de la empresa Fantaxias Ltda.	22
3.4.4 Diseño básico de las alternativas seleccionadas	22
4. RESULTADOS Y DISCUSION	23
4.1 Caracterización fisicoquímica de los efluentes de la sección de galvánica.	23
4.2 Aplicación de la técnica de precipitación química	24
4.3 Aplicación de la técnica de oxidación de cianuros por clorinación alcalina	25
4.4 Selección de alternativas según parámetros de diseño	29
4.5 Análisis de consumos de reactivos y volumen de lodos generados	30
4.6 Diseño básico de los procesos para las alternativas seleccionadas para el tratamiento de los efluentes	32
4.6.1 Capacidad y localización de la planta	32
4.6.2 Tipo de proceso	32
4.6.3 Descripción diagramas de bloques.	33
4.6.4 Unidades de operación y accesorios	34
4.6.5 Unidad recolección de aguas residuales	34
4.6.6 Unidad de oxidación	34
4.6.7 Unidad de evaporación	35
4.6.8 Unidad de precipitación	35
4.6.9 Unidad de intercambio iónico	35
4.6.10 Unidad trampa de desengrase	35
4.7 Dimensiones de equipos	35
4.7.1 Sistema de oxidación de cianuros, precipitación de metales y tanques de almacenamiento	35
4.7.2 Sistema de agitación y características de las bombas	38
4.7.3 Sistema de evaporación	38
4.7.4 Sistema de intercambio iónico	39
4.8 Análisis financiero	40

4.8.1 Costo de nómina necesaria para el funcionamiento de la planta y construcción	41
4.8.2 Costo de insumos	42
4.8.3 Costo de servicios industriales	42
5. CONCLUSIONES	43
6. BIBLIOGRAFÍA	44

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla N° 1. Normas para vertimientos según decreto 1594/84 en Colombia	6
Tabla N° 2. Tecnologías para la remoción de metales pesados	7
Tabla N° 3. Rango de pH a la cual se presenta la solubilidad mínima de metal	11
Tabla N° 4. Coagulantes mas usados para el tratamiento de aguas	12
Tabla N° 5. pH óptimo para el uso de coagulantes en el tratamiento de aguas residuales	13
Tabla N° 6. Diseño de experimentos	19
Tabla N° 7. Matriz de experimentos	19
Tabla N° 8. Caracterización de variables físicas con su respectivo punto de vertimiento	23
Tabla N° 9. Caracterización de variables químicas con su respectivo punto de vertimiento	23
Tabla N° 10. Concentraciones de Ni y Zn después de la precipitación en el diseño de experimentos	24
Tabla N° 11. Prueba de floculación para muestras sintéticas	25
Tabla N° 12. Condiciones de operación para la precipitación química en aguas sintéticas	25
Tabla N° 13. Condiciones experimentales de la primera etapa de la oxidación de cianuros	26
Tabla N° 14. Condiciones experimentales de la segunda etapa de oxidación de cianuros	26
Tabla N° 15. Oxidación de cianuros a diferentes concentraciones y volúmenes de muestra	27
Tabla N° 16. Precipitación de metales a diferentes concentraciones y volúmenes de muestra	27
Tabla N° 17. Condiciones de operación para la oxidación de cianuros por clorinación alcalina en aguas sintéticas	28
Tabla N° 18. Resultados de precipitación de metales en efluentes reales	29
Tabla N° 19. Resultados de oxidación y precipitación del punto global cianurado	29

Tabla N° 20. Descriptores de calidad para la selección de alternativas	30
Tabla N° 21. Calificación de alternativas de acuerdo a los criterios de evaluación	30
Tabla N° 22. Resultados de precipitación de metales en 5, 10 y 20 litros de efluente real	30
Tabla N° 23. Resultados de oxidación y precipitación en 5, 10 y 20 litros de efluente real	31
Tabla N° 24. Consumo de reactivos de la alternativa 1	31
Tabla N° 25. Consumo de reactivos de la alternativa 3	31
Tabla N° 26. Condiciones iniciales del clarificado de la oxidación	32
Tabla N° 27. Resultados de la evaporación	32
Tabla N° 28. Cantidad de equipos y accesorios requeridos para la alternativa 1 y 3	34
Tabla N° 29. Características de las unidades de oxidación y precipitación	36
Tabla N° 30. Especificaciones tanques alternativa 1	37
Tabla N° 31. Especificaciones tanques alternativa 3	37
Tabla N° 32. Especificaciones del sistema de agitación para las alternativas 1 y 3	38
Tabla N° 33 Especificación de bombas para las alternativas 1 y 3	38
Tabla N° 34. Características del evaporador	39
Tabla N° 35. Características del condensador	39
Tabla N° 36. Condiciones de operación para la columna de intercambio iónico	40
Tabla N° 37. Costos de los equipos y accesorios	41
Tabla N° 38. Costo de nómina y mano de obra	41
Tabla N° 39. Costos de insumos	42
Tabla N° 40. Costos de servicios industriales	42

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura N° 1. Electrodeposición de metales	3
Figura N° 2. Diagrama de solubilidad de diferentes metales en función del pH	12
Figura N° 3. Representación simbólica de una resina de intercambio iónico	14
Figura N° 4. Evaporador al vacío con recirculación forzada	15

LISTA DE DIAGRAMAS

pág.

Diagrama N° 1. Unidades de operación más importantes en un proceso físico-químico de tratamiento de aguas residuales de una empresa de Galvanotecnia	7
Diagrama N° 2. Metodología General del trabajo de grado	16
Diagrama N° 3. Esquema de bloques alternativa 1	33
Diagrama N° 4. Esquema de bloques alternativa 3	33

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Tecnologías alternas para la remoción de cianuros	47
ANEXO B. Diagrama del proceso para la obtención de los recubrimientos electrolíticos	48
ANEXO C. Plano actual de la sección de galvanica con sus respectivos puntos de muestreo	51
ANEXO D. Toma de muestras y parámetros para la determinación de variables fisicoquímicas	56
ANEXO E. Evaluación del índice de carga contaminante de las vertientes liquidas de la empresa Fantaxias Ltda.	58
ANEXO F. Recomendaciones de técnicas de producción más limpia (PML)	62
ANEXO G. Fotos de las pruebas realizadas	66
ANEXO H. Plano de separación de las corrientes	69
ANEXO I. Planos de unidades de operación	71
ANEXO J. Ecuaciones de consumos de reactivos y volumen de lodos generados para 500, 1000 y 1500 ml de efluente	75
ANEXO K. Diagramas en HYSYS de las alternativas de tratamiento seleccionadas	77
ANEXO L. Ecuaciones de consumo de reactivos y volumen de lodos generados en 5, 10 y 20 litros de efluente	78
ANEXO M. Caudales de los efluentes de la sección de galvanica de Fantaxias Ltda.	81
ANEXO N. Planos en AUTOCAD de la empresa Fantaxias Ltda.	82
ANEXO O. Diagrama de flujo de las alternativas 1 y 3	85
ANEXO P. Diagramas de los diferentes equipos y tanques	87
ANEXO Q. Diseño columna de intercambio iónico	89
ANEXO R. Fichas técnicas y de seguridad de reactivos	92

TÍTULO:

DISEÑO DE ALTERNATIVAS PARA LA OXIDACION DE CIANUROS Y REMOCION DE METALES PRESENTES EN LOS EFLUENTES DE LA EMPRESA DE ELECTRORECUBRIMIENTOS FANTAXIAS LTDA*.

BALLESTEROS CARRILLO EDUIN**

e-mail: eduinballesteros@hotmail.com

MARTINEZ MONSALVE RUBEN DARIO**

e-mail: rudamarti@yahoo.es

Palabras Claves: *Oxidación de cianuros, precipitación y remoción de metales, intercambio iónico, recubrimiento metálico, efluentes industriales, evaporación, diseño de procesos.*

Descripción: En este trabajo se desarrolló un diseño básico de procesos para el tratamiento de los efluentes de la empresa de herrajes Fantaxias Ltda, que involucra etapas de oxidación de cianuros, remoción de metales por precipitación e intercambio iónico y eliminación de sales por evaporación. Se elaboraron cuatro alternativas para el tratamiento de las aguas residuales industriales y mediante criterios de selección se eligieron dos para realizar el diseño básico de sus unidades de operación.

La experimentación se llevo a cabo con muestras sintéticas preparadas con reactivos comerciales suministrados por la empresa para la evaluación de la técnica de precipitación química y remoción de metales de Cu, Ni y Zn presentes en los vertimientos de la sección de recubrimientos metálicos de Fantaxias Ltda. Se determinaron las condiciones de operación óptimas en las que se obtuvo precipitaciones del metal hasta niveles cercanos al 100 %; también se realizaron ensayos con muestras sintéticas para determinar las cantidades de hipoclorito de sodio necesario para la destrucción de cianuros utilizando diferentes volúmenes de exceso de reactivo oxidante. Los resultados mostraron que con un exceso entre el 10 y el 20 % de hipoclorito de sodio es posible lograr concentraciones de cianuros por debajo de 1 ppm. El tratamiento final incluyó la adición de un agente floculante comercial lográndose la completa precipitación de los metales hasta concentraciones permitidas por la normatividad ambiental y la suficiente compactación de lodos generados para posterior separación. Los cloruros generados en la etapa de la oxidación fueron removidos por evaporación en un 99 %.

Las condiciones de operación encontradas para cada uno de las etapas de tratamiento fueron aplicadas a los efluentes industriales de la empresa a diferentes volúmenes para comprobar la relación existente y la efectividad de la experimentación. Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios y permitieron evaluar los diseños de procesos mediante medición de consumos de reactivos, volumen de lodos generados y factibilidad de implementación por medio de criterios ingenieriles de evaluación.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández

TITLE:

DESIGN OF ALTERNATIVES FOR THE CYANIDE OXIDATION AND PRESENT METAL REMOVAL IN THE EFLUENTES OF THE COMPANY OF ELECTRORECUBRIMIENTOS FANTAXIAS LTDA*.

BALLESTEROS CARRILLO EDUIN ** email: eduinballesteros@hotmail.com

MARTINEZ MONSALVE RUBEN DARIO ** email: rudamarti@yahoo.es

Key words: Cyanide oxidation, metal precipitation and removal, ionic interchange, metallic covering, industrial efluentes, evaporation, design of processes.

Description: In this work a basic design of processes for the treatment of the efluentes of the ironwork company was developed Fantaxias Ltda., that involves stages of cyanide oxidation, metal removal by precipitation and ionic interchange and elimination of salts by evaporation. Four alternatives for the treatment of industrial residual waters were elaborated and by means of selection criteria two were chosen to make the basic design of their units of operation.

The experimentation I am carried out with prepared synthetic samples with commercial reagents provided by the company for the evaluation of the technique of chemical precipitation and metal removal of Cu, Nor and Zn present in the pourings of the section of metallic coverings of Fantaxias Ltda. The optimal conditions of operation were determined in which it obtained precipitations of the metal until levels near 100%; also tests with synthetic samples were made to determine the amounts of hipoclorito of necessary sodium for the cyanide destruction using different volumes from excess of oxidating reagent. The results showed that with an excess between the 10 and the 20% of hipoclorito of sodium ppm is possible to obtain cyanide concentrations below 1. The final treatment included the addition of commercial a floculante agent being obtained the complete precipitation of metals until concentrations allowed by the environmental normatividad and the sufficient mud compaction generated for later separation. The chlorides generated in the stage of the oxidation were removed by evaporation in a 99%.

The found conditions of operation for each one of the treatment stages were applied to the industrial efluentes of the company to different volumes to verify the existing relation and the effectiveness of the experimentation. The results that were obtained were satisfactory and allowed to evaluate the designs of processes by means of measurement of consumptions of reagents, volume of generated muds and feasibility of implementation by means of ingenieriles criteria of evaluation.

*Grade Work

**Faculty of Fisicoquímicas Engineerings, School of Chemical Engineering. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas que realizan procesos de electrorecubrimientos generan efluentes con elevadas concentraciones de metales tóxicos y cianuros disueltos. Tradicionalmente estos sectores industriales vierten sus efluentes a la red urbana de alcantarillado, sin ningún tipo de tratamiento.

Fantaxias Ltda es una mediana empresa ubicada en la ciudad de Bucaramanga, que desempeña su actividad principal dentro del sector de transformados metálicos en los que se realiza procesos de cobrizado, niquelado, latonado y dorado, para el tratamiento superficial de piezas de Zamac (aleación de cobre, magnesio, aluminio y zinc) y lámina. Los tratamientos de electrorecubrimiento de la empresa incluyen etapas de desengrase, decapado, activado, enjuague y secado. Estos procesos generan vertimientos líquidos provenientes de los enjuagues de electrorecubrimientos, que poseen concentración de cobre, níquel, zinc y cianuro; que superan la normatividad ambiental ¹.

Fantaxias Ltda está interesada en la implementación de tecnologías para la reducción de la contaminación de sus efluentes; por consiguiente se está desarrollando un proyecto de investigación conjunto con el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) de la UIS, y Colciencias.

Por lo anterior se ha planteado como objetivo principal de este trabajo de grado, evaluar la posible aplicación de tecnologías útiles para la descontaminación de los efluentes de la empresa de herrajes Fantaxias Ltda.

Para cumplir con este objetivo, se llevó acabo la siguiente metodología: a) Mediante visitas a la empresa, se estudió y apropió los procesos industriales, b) Se elaboró el diagrama de operación de los procesos de electrorecubrimiento, c) Se realizó muestreo y análisis físico químico de los efluentes, para mejorar un trabajo similar preeliminar¹, d) Con base a los resultados obtenidos en la actividad anterior, se planteó a la empresa una propuesta de recomendaciones operacionales para la aplicación de técnicas de producción más limpia, e) Se desarrolló una serie de alternativas para el tratamiento de los efluentes de la empresa, f) Se realizó un estudio experimental de oxidación de cianuros con hipoclorito de sodio y precipitación de metales con hidróxido de sodio en aguas sintéticas y reales, g) Se seleccionaron las mejores alternativas y se realizó el diseño básico de unidades de operación.

En el análisis físico químico se tuvieron en cuenta las variables de mayor incidencia ambiental para la evaluación cualitativa que representa el nivel de la calidad de determinado efluente, respecto a la normatividad, toxicidad y amenaza ambiental que éste implica. El nivel de calidad de los efluentes de Fantaxias Ltda, en general obtuvo una valoración calificativa de malo.

Debido a este diagnóstico ambiental se plantearon una serie de alternativas para el tratamiento de estas aguas, teniendo en cuenta para la clasificación de los efluentes, la concentración de los metales pesados, acidez, alcalinidad y si contienen o no complejos cianurados; con el objeto de reunir aguas con propiedades similares y llevarlas a una sola corriente antes de su tratamiento. De esta manera, se elaboraron cuatro diagramas en donde se plasma el proceso de tratamiento de los vertimientos con diferentes unidades de operación como lo son las trampas de desengrase, pilas de oxidación de cianuros y precipitación de metales, torres de intercambio iónico y evaporadores de agua.

Para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda, se implementó una técnica de precipitación química aplicada a aquellas corrientes clasificadas según las alternativas, que poseen metales como cobre, níquel y zinc, logrando remociones de sus concentraciones hasta de un 95%. Para la oxidación de cianuros se implementó el método de clorinación alcalina con hipoclorito de sodio obteniéndose una reducción del 99% de cianuros.

Para llevar a cabo el cumplimiento de la selección de las alternativas, se utilizó una matriz de valoración ponderal para procesar la información sobre las alternativas de tratamiento de los efluentes y permitir seleccionar las dos mejores teniendo en cuenta los resultados obtenidos experimentalmente, principales factores técnicos, productos residuales, número de equipos, localización en planta, costos y factor tiempo. De ésta manera, se procedió al diseño básico de las unidades de operación de las dos alternativas seleccionadas para el tratamiento de las vertientes liquidas de la empresa.

El diseño indica que la alternativa más adecuada para su implementación es la número uno debido a que cumple con todos los requerimientos ambientales y posee menor inversión inicial y costos de tratamiento.

2. FUNDAMENTO TEORICO

En este capítulo se describen los principales procesos que se utilizan en las distintas actividades del sector de recubrimientos metálicos junto con un análisis de sus posibles impactos en el medio ambiente en función de los residuos que generan.

2.1 Procesos de recubrimiento de superficies

Este tratamiento consiste en depositar un metal sobre una superficie sumergiendo las piezas en una solución con iones metálicos, electrolitos. Puede realizarse sobre acero o aluminio y también en materiales plásticos. Mediante este tipo de tratamiento la capa de revestimiento depositada hace que el material adquiera propiedades particulares para resistir a la corrosión, mejora sus propiedades eléctricas o mecánicas, características estéticas o se modifican sus propiedades físicas como la dureza o la conductividad.

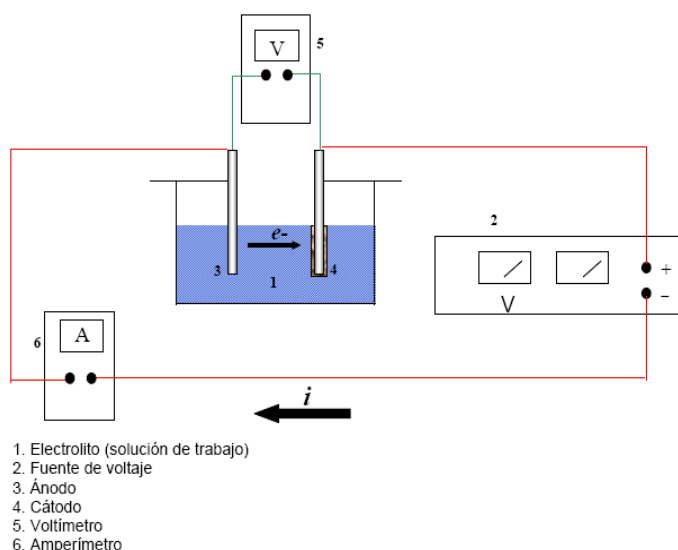


Figura N° 1. Electrodeposición de metales

En los recubrimientos electrolíticos, el electrodo que actúa como cátodo está conectado a un terminal negativo de una fuente de electricidad externa. Otro conductor, compuesto a menudo por el metal recubridor, se conecta al terminal positivo de la fuente de electricidad. Cuando se pasa la corriente a través de la solución, los átomos del metal recubridor se depositan en el cátodo o electrodo negativo. El cátodo es el terminal en el que tiene lugar la reducción y el ánodo es el terminal en que tiene lugar la oxidación, como se observa en la figura 1¹⁷.

El espesor de la capa de recubrimiento depende del tiempo de permanencia en el baño electrolítico, siendo más frecuentes las capas más delgadas, aunque puede variar según el proceso desde 1 μm hasta 2 mm. Para eliminar irregularidades en las depresiones de la placa y asegurar que la textura de su superficie es de buena calidad y propicia para el refinado, hay que controlar cuidadosamente la densidad de la intensidad de corriente (amperios por metro cuadrado de superficie de cátodo) y la temperatura. Con frecuencia se añaden al baño ciertos coloides o compuestos especiales para mejorar la uniformidad de la superficie ².

2.2 Tipos de recubrimiento ¹⁰

2.2.1 Cobrizado: Los electrolitos de cobre más empleados son aquellos en base cianuro y en base sulfato. El electrolito cianurado (bien con cianuro potásico o sódico) apenas contiene aditivos orgánicos, al contrario del cobreado ácido que necesita una variedad de aditivos importantes y un control exhaustivo para conseguir las propiedades de dureza, nivelación y brillo. El cobreado cianurado es el primer recubrimiento de los sistemas multicapas de gran protección anticorrosiva, que se realizan habitualmente sobre Zamac (aleación de zinc, aluminio, magnesio y cobre) y/o acero como materiales base. El cobreado ácido constituye el primer revestimiento en el metalizado de plástico por su gran ductilidad.

2.2.2 Niquelado: Los recubrimientos de níquel son una base muy apropiada para la mayoría de recubrimientos decorativos como el cromo, el latón, la plata, el oro y otros más específicos. A partir de ciertos espesores presenta buenas propiedades anticorrosivas; por ello se utiliza tanto en aplicaciones decorativas como la cerrajería y grifería como en aplicaciones anticorrosivas y funcionales como son los componentes del automóvil y las herramientas.

2.2.3 Cromado: Los electrolitos de cromo contienen ácido crómico, pequeñas cantidades de ácido sulfúrico y según su composición catalizadores que pueden ser fluorados. El brillo, su dureza y su poder anticorrosivo son las cualidades más apreciadas. Cuando se aplica en bajos espesores en acabados decorativos y funcionales sobre depósitos de níquel se denomina cromo decorativo. Cuando se aplica sobre acero en grandes espesores como es el caso de los amortiguadores y similares se habla de cromo duro.

2.2.4 Latonado: Entre los más frecuentes, aparte de los ya mencionados, está el latonado, formulado en base a una solución que contiene cianuro, amonio, cobre y zinc. La relación de la concentración entre ambos metales da una u otra tonalidad al

recubrimiento. Los electrolitos de plata y oro están formulados en base cianurada y contienen aditivos que permiten incrementar el brillo y, si se requiere, la dureza.

2.2.5 Cincado: Existen numerosos tipos de electrolitos de zinc. Tradicionalmente los más utilizados son los cincados cianurados de alta y media concentración de cianuro que poseen una buena tolerancia a la contaminación orgánica y permiten trabajar con pretratamientos no optimizados. Se está imponiendo por otro lado, los cincados ácidos, de depósitos de elevado brillo y alto rendimiento que sobre todo si son en base potasio reducen de modo importante el coste de tratamiento de las aguas.

2.2.6 Dorado: Se usa por lo general para piezas con fines decorativos o en algunos casos para piezas que requieran una gran resistencia a la corrosión y oxidación, debido a la homogeneidad de la capa protectora, así sea esta de un espesor muy fino.

2.3 Problemática ambiental de los recubrimientos metálicos

Desde el punto de vista medioambiental, el factor que mayoritariamente contribuye al riesgo de contaminación por parte de las Empresas que utilizan técnicas de galvanotecnia y anodizado es el de los efluentes líquidos contaminados por metales y productos químicos tóxicos. Son dos los tipos de efluentes líquidos que requerirán tratamientos específicos: el procedente de las aguas de lavado entre etapas que son los que contienen concentraciones bajas de contaminantes pero suponen elevados volúmenes a tratar y el resultante de la preparación y utilización de disoluciones con reactivos químicos, que suelen consistir en volúmenes relativamente pequeños con una elevada carga de contaminación, tanto en forma de productos químicos como de metales.

El problema que supone cada uno de estos efluentes es diferente. En el primero de ellos se trata fundamentalmente del elevado costo de tratamiento debido al gran volumen que ocupa; en el segundo, el principal problema es la fuerte toxicidad de ese residuo y la necesidad de aplicar técnicas específicas de tratamiento según el tipo de metales y de sustancias químicas que contenga.

El segundo factor en importancia medioambiental resultante de los procedimientos de galvanotecnia y anodizado es la generación de residuos sólidos (lodos) que contienen restos de metales, mezclados con la diversidad de reactivos químicos empleados a lo largo del proceso.

En tercer lugar hay que resaltar otro factor ambiental de importancia como es el elevado consumo de agua a lo largo del proceso. En este caso no se trata de un factor

contaminante, sino del agotamiento de recursos naturales, pero requiere también atención por parte de las empresas medioambientalmente comprometidas ²⁴.

Dado que el factor que mayoritariamente contribuye a la posibilidad de contaminación por parte del sector de recubrimientos metálicos es el de los efluentes líquidos, la mayor parte de las medidas de carácter medioambiental en estas empresas irán dirigidas a evitar que dichos efluentes se viertan a la red pública sin tratamiento adecuado. En conclusión, se obtienen efluentes con altos niveles de concentración de especies como, níquel, zinc, cobre y compuestos cianógenos; clasificados como sustancias peligrosas; su descarga al alcantarillado público esta controlada por las autoridades ambientales según el decreto 1594 de 1984 para vertimientos líquidos en Colombia de la siguiente forma:

Tabla N° 1. Normas para vertimientos según decreto 1594/84 en Colombia ⁴

Parámetro	Expresada como	Norma
Cianuro	CN (mg/L)	1
Zinc	Zn (mg/L)	5
Cobre	Cu (mg/L)	3
Grasas y aceites	G.A.(mg/L)	20
Níquel	Ni (mg/L)	2
pH	pH (Unidades de pH)	6 – 9
Sólidos Totales	ST (mg/L)	1000
Temperatura	T (°C)	< 30
Turbidez	TB (NTU)	5
Conductividad	CD (mS/cm)	12

2.4 Tratamiento de las aguas residuales industriales

La industria de recubrimientos metálicos enfrenta uno de los más serios problemas en lo que se refiere a la contaminación de sus aguas residuales. El manejo de metales tóxicos como níquel, zinc, cobre, cromo etc. y de compuestos venenosos como el cianuro, genera la necesidad de proteger a las personas y al medio ambiente del envenenamiento por los mismos ⁵.

Entre los procesos para remoción de metales encontrados en la literatura es importante citar la precipitación química, el intercambio iónico, la adsorción sobre diferentes materiales y procesos electroquímicos de recuperación, los cuales remueven los metales de los vertimientos contaminados y en algunos casos permiten su recuperación. Estos procesos de remoción de metales actúan solos o en conjunto, integrados con operaciones y procesos típicos de plantas de tratamiento para completar la remoción de estos y otros contaminantes o permitir las condiciones más adecuadas para que ésta se realice: homogenización, neutralización, coagulación, floculación, sedimentación y filtración. De igual manera, con el propósito de permitir la

remoción de otros contaminantes tóxicos, se incluyen en el tratamiento diferentes procesos, como la eliminación de cianuros.

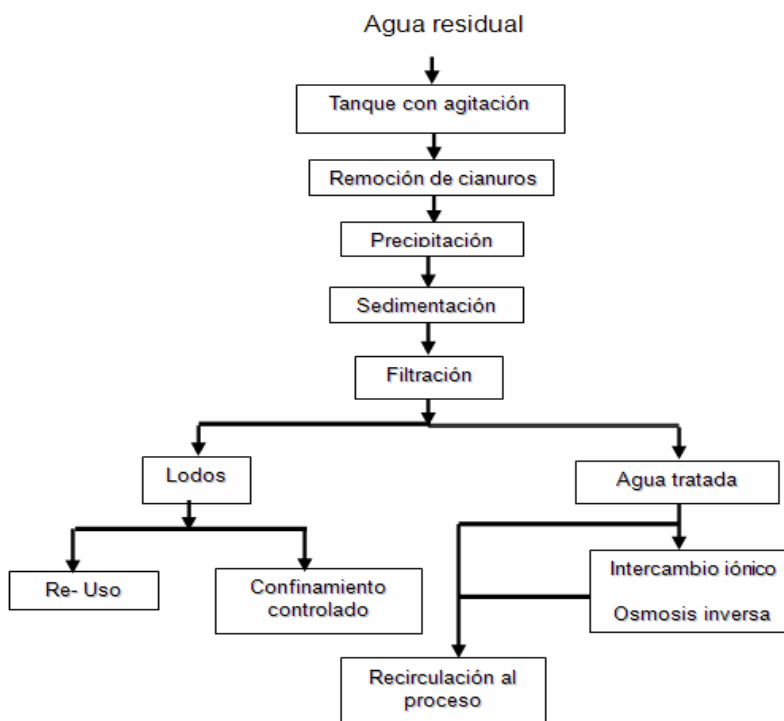
En la tabla N° 2 se consignan las principales tecnologías disponibles para la remoción de metales en los efluentes industriales.

Tabla N° 2. Tecnologías para la remoción de metales pesados ⁴

Precipitación convencional	Hidróxido
	Sulfuro
	Carbonato
	Coprecipitación
Precipitación mejorada	Dimetiltiocarbamato
	Dietiltiocarbamato
	Trimercapto-s-triazina
Otros métodos	Intercambio iónico
	Adsorción
Oportunidades de recuperación	Intercambio iónico
	Membranas
	Técnicas electrolíticas

En el diagrama N° 1 se muestra una secuencia de las operaciones más importantes que se deben contemplar en el tratamiento físico-químico de las aguas residuales industriales.

Diagrama N° 1. Unidades de operación más importantes en un proceso físico-químico de tratamiento de aguas residuales de una empresa de galvanotecnia ⁵.



2.4.1 Oxidación de compuestos cianurados

El término cianuro sirve para designar a una familia de compuestos químicos que se caracterizan por la presencia de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple. La palabra cianuro tiene connotaciones negativas debido a que muchos de sus compuestos presentan propiedades sumamente tóxicas o letales, como lo demuestra su aplicación en venenos ⁶.

El cianuro es un anión altamente tóxico, puesto que al igual que el ácido cianhídrico (HCN), bloquea la respiración celular en los organismos, inhibiendo la actividad de la enzima citocromooxidasa. La dosis letal del HCN para humanos es de 1-2 mg/L, si se administra por vía oral. La toxicidad aguda para peces del ácido cianhídrico se sitúa entre los 0,03 y 3 mg/L, mientras que la dosis letal del cianuro sódico se sitúa en 50 mg/L para las truchas ⁷.

Los vertimientos de las plantas galvánicas contienen cianuros simples de sodio y potasio, cianuros complejos de cobre, zinc, cadmio, hierro y otros, provenientes de los lavados de las piezas y de la reposición de los baños electrolíticos de los procesos galvánicos de recubrimiento de cobre, zinc y cadmio ⁸.

2.4.1.1 Alternativas de tratamiento

La oxidación de cianuros, es considerada como un pretratamiento para remover sustancias que puedan interferir con la precipitación de los metales ¹⁶, ya que forman complejos con algunos metales, limitando la remoción que puede ser conseguida por precipitación. Existen varias alternativas para lograr la remoción de cianuros, cuyas principales características se presentan en el **Anexo A (Tecnologías alternas para la remoción de cianuros)**.

2.4.1.2 Tratamiento de oxidación por el método de clorinación alcalina con hipoclorito de sodio

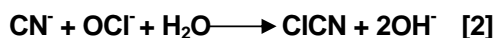
Existen procesos de oxidación de cianuros que pueden lograr su remoción del agua cruda; entre ellos puede citarse la oxidación con agentes clorógenos, que produce la oxidación parcial, formando cianatos. La reacción con agentes clorógenos es óptima a valores de pH comprendidos en el rango de 8.5 – 9, evitándose la liberación de un producto intermedio particularmente tóxico, el cloruro de cianógeno CNCl. Esta técnica es frecuentemente aplicada para el tratamiento de líquidos residuales de origen industrial, siendo las condiciones de proceso variables en función de la presencia de cianuros simples o complejos. En la mayoría de los casos puede ser lograda la

oxidación completa hasta dióxido de carbono y nitrógeno con el agregado de cantidades suficientes de agente clorógeno y ajuste apropiado del pH ⁹.

Los métodos de tratamiento más factibles desde el punto de vista técnico - económico, continúan siendo los métodos de remoción de cianuros con reactivos químicos, especialmente el método de cloración (con hipoclorito de sodio). La clorinación alcalina es un proceso químico que implica la oxidación y destrucción del cianuro en estado libre y en compuestos débiles bajo condiciones alcalinas con pH mayor que 11 ¹⁰. La reacción con el hipoclorito de sodio ocurre en dos etapas, que se pueden representar mediante la reacción global la siguiente reacción:



En una primera etapa, el hipoclorito oxida el cianuro a cianato (reacciones 2 y 3). Esta reacción es más completa y rápida a un pH alcalino (11 - 12) ^{11,12}. Se admite un periodo de oxidación de 20 minutos y debe procurarse una buena agitación entre 250 rpm y 300 rpm para evitar la formación de partículas de cianuros insolubles ^{7,8}.



Esta reacción debe efectuarse en medio alcalino para evitar el desprendimiento del cloruro de cianógeno (gaseoso). El cloruro de cianógeno es muy soluble en agua (aproximadamente 25 L de CICN por cada litro de agua a 20 °C). Cuando se aumenta la temperatura de la disolución, el gas aumenta de forma importante su presión de vapor que es de 100 KPA a 26 °C y por encima de 50 °C puede ser sumamente peligroso por producirse su desprendimiento. A concentraciones del orden de 0.025 mg/L tiene efectos lacrimógenos y a concentraciones de 0.4 mg/L es mortal en pocos minutos ⁶.

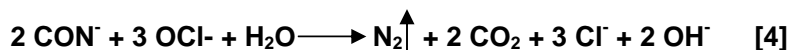
A través de la reacción de hidrólisis (3), el cianuro queda completamente destruido pasando a forma cianato. La velocidad de la hidrólisis es función del pH del medio, el exceso de hipoclorito presente y la temperatura. El potencial de óxido reducción cambia abruptamente (unos 50 mV) cuando todo (o casi todo) el cianuro pasa a la forma cianato, de modo que es aconsejable operar a un potencial oxidante de unos 250 mV, agregando hipoclorito de sodio hasta obtener el potencial adecuado ¹³.



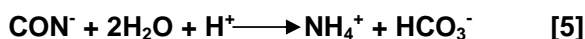
En la práctica se trabaja a un pH superior a 10.5, siendo recomendable mantenerlo alrededor de 11. La temperatura deberá mantenerse no inferior a 18 °C, con un exceso de

hipoclorito del 10% como mínimo. En estas condiciones, con un tiempo de reacción de 20 minutos, puede garantizarse la destrucción de los cianuros.

En la segunda etapa se logra la oxidación completa a dióxido de carbono y nitrógeno (4), puede realizarse en una unidad separada con su control de pH y reactivos independiente.

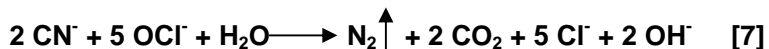


Esta reacción es muy lenta en medio muy alcalino (20 horas a pH entre 10 y 12) y se requiere un elevado exceso de hipoclorito para completar la oxidación. A valores de pH de 8.5 la reacción es relativamente rápida con un tiempo de retención de 1 hora ⁷. Paralelamente a esta oxidación tienen lugar las siguientes reacciones de hidrólisis:

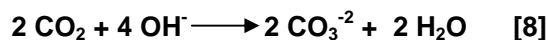


Es recomendable efectuar la oxidación de los cianatos a un pH no inferior a 8.5 para evitar su rápida hidrólisis. Esta reacción de hidrólisis con formación de amoníaco o sales amónicas, según el pH, debe tenerse muy en cuenta especialmente cuando los cianuros están asociados a metales bivalentes que pueden formar complejos aminados que no se eliminan por precipitación con hidróxidos.

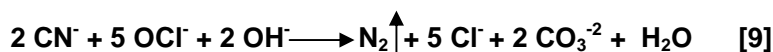
De esta manera, la reacción total de destrucción es:



Como el medio es alcalino:



Por tanto:



El consumo de hipoclorito sódico es usualmente un 10% mayor que el dado por los cálculos estequiométricos. Este exceso es consumido por la oxidación de materia orgánica y aumento de las valencias de los metales en disolución. El potencial de óxido-reducción deberá ser de unos 300 mV, la cinética de esta reacción es ligeramente superior a la primera ^{13, 14}.

2.4.2 Técnicas de remoción de metales pesados y eliminación de sales

2.4.2.1 Precipitación química de hidróxidos metálicos insolubles

Esta es una de las tecnologías más usadas para remover iones solubles de los metales. El proceso consiste en la insolubilización de un ion metálico previamente disuelto, seguido de su caída hacia el fondo de un recipiente. La ruta más usual para desolubilizar metales es la formación de hidróxidos metálicos mediante la alcalinización de la solución por adición de un agente precipitante ¹⁵.

Se basa en la utilización de reacciones químicas (por lo general controlando pH con hidróxido de sodio o cal) para la obtención de productos de muy baja solubilidad. La especie contaminante a eliminar pasa a formar parte de esa sustancia insoluble, que precipita y puede ser separada por sedimentación y filtración. El cianuro que se encuentra en forma de complejo va a interferir con la habilidad del sistema para remover los metales disueltos. Estos tipos de aguas residuales deben ser tratados antes de que entren al sistema de precipitación.

La precipitación con pH alto es un proceso que incluye la adición de químicos que aumentan drásticamente el pH hasta alrededor de 12, causando un cambio en el equilibrio de disociación del complejo y dando como resultado la producción de iones libres del metal. Los iones del metal pueden entonces ser precipitados por los iones de hidróxidos disponibles y removidos por sedimentación o filtración ¹¹.

A continuación se presenta una lista como se muestra en la tabla 3, con el rango de pH al cual se presenta una solubilidad mínima en agua para metales comunes en esta industria ¹⁶, en la figura 2 se muestra la solubilidad de diferentes metales en función del pH.

Tabla Nº 3. Rango de pH a la cual se presenta la solubilidad mínima de metal ¹⁶

Elemento	Ph
Aluminio	6 – 8
Cadmio	10.5
Cromo	7 – 8
Cobre	7.5
Níquel	10.5
Zinc	9 – 11

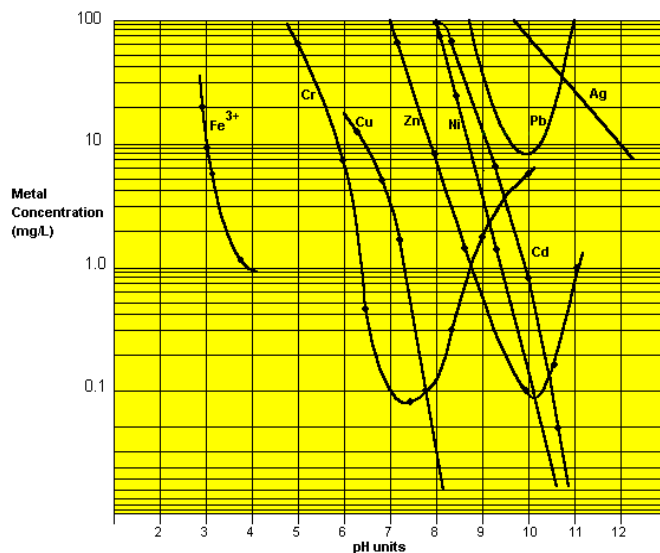


Figura N° 2. Diagrama de solubilidad de diferentes metales en función del pH ¹⁶

El paso final en la eliminación de metales por precipitación involucra el uso del floculante cuyo fin es lograr aglomerados de partículas coloidales que unidas entre sí alcanzan un peso que las hace sedimentables por gravedad. La floculación es estimulada por un mezclado lento que agrupa poco a poco los flóculos; si el mezclado es muy intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptima. Además de incrementar el tamaño de las partículas del flóculo, este proceso también afecta la naturaleza física en los lodos y las lechadas floculadas, desecándose con mayor rapidez en virtud de la estructura gelatinosa del flóculo ¹⁷.

Los coagulantes son sales de hierro y aluminio que actúan como floculantes al ser añadidos al agua. Los más usados se muestran en la tabla N° 4

Tabla N° 4. Coagulantes mas usados para el tratamiento de aguas ¹⁸

AGENTE QUIMICO	FORMULA	PESO MOLECULAR (g/mol)
Sulfato de aluminio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	594
Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278
Cloruro férrico	$FeCl_3$	162.5
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	400
Cal	$Ca(OH)_2$	74

Las sales de hierro tienen sus ventajas sobre las sales de aluminio porque forman un floculo mas pesado y de mayor velocidad de asentamiento y porque pueden trabajar en un rango de pH mas amplio; por esta razón, se hizo un ensayo de jarras consistentes en simular el proceso de coagulación – floculación en vasos de precipitado en donde se pudo determinar los siguientes parámetros:

- Determinación de dosis óptima mediante evaluaciones cualitativas como el tamaño del floculo y el tiempo inicial de formación del floculo; determinaciones físicas como turbiedad y color; y las determinaciones químicas como pH y metales pesados en solución.
- Determinaciones de la velocidad de sedimentación en las jarras.
- Determinación de la influencia del pH en la coagulación.

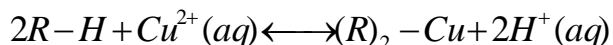
El pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso de coagulación. En la tabla N° 5 se presentan los rangos de pH óptimos utilizados para algunos coagulantes.

Tabla N° 5. pH óptimo para el uso de coagulantes en el tratamiento de aguas residuales¹⁹

COAGULANTE	pH
Sulfato de aluminio	4 - 7
Sulfato ferroso	> 8.5
Cloruro férrico	3.5 - 6.5 y > 8.5
Sulfato férrico	3.5 – 7.0 y > 9.0

2.4.2.2 Intercambio iónico

El intercambio iónico es básicamente una reacción química de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución. El proceso se puede ilustrar tomando como ejemplo el intercambio entre el ión Hidrógeno, H⁺, que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ión cobre, Cu²⁺, presente en la disolución que contacta dicha matriz, y se representa así:



Resinas de intercambio iónico: Las resinas de intercambio son materiales orgánicos sintéticos que consisten en una matriz polimérica reticulada, por la acción de un agente entrecruzante y derivatizada con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales. Constan de una red molecular (**matriz polimérica**) mineral u orgánica portadora de cargas eléctricas (**grupo funcional**) que retienen a su alrededor, por simple atracción electrostática las cargas de signo contrario. Estas cargas constituyen los iones móviles o **intercambiables** susceptibles de cambio y capaces de pasar a la disolución, mientras que la red es un gran ión insoluble. En la figura N° 3 se esquematiza la estructura de una resina.

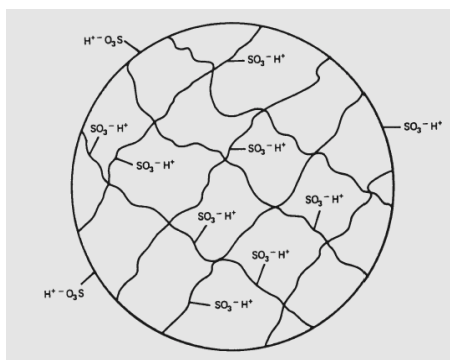


Figura Nº 3. Representación simbólica de una resina de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico han tenido diversas aplicaciones en las industrias químicas y también algunas, con una cobertura de aplicación mucho más reducida, en el campo de la extracción de metales. En efecto, aparte de algunas aplicaciones ligadas a las plantas extractivas industriales, de carácter no metalúrgico, como son la limpieza y depuración de efluentes, y la desionización y purificación del agua de alimentación para procesos especiales. En el campo de la hidrometalurgia la aplicación resinas ha sido de gran utilidad, particularmente en procesos de recuperación de uranio, oro y cobre desde soluciones de lixiviación, cianuración y aguas de mina, respectivamente, separación de níquel de soluciones de refinación de cobalto y la eliminación de impurezas como hierro desde electrolitos de descarte en refinerías ²².

2.4.2.3 Evaporación al vacío ²⁷

La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior de la caldera por debajo de la presión atmosférica. Esto permite reducir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar lo que reduce la cantidad de calor a aportar/eliminar en el proceso de ebullición y de condensación, además de otras ventajas técnicas como la de poder destilar líquidos con alto punto de ebullición, evitar la descomposición de sustancias sensibles a la temperatura, etc.

La evaporación al vacío es una de las tecnologías más novedosas y eficaces para la minimización y tratamiento de residuos industriales líquidos en base acuosa. Es una tecnología limpia, segura, muy versátil y con un coste de gestión muy bajo. En muchísimos casos, además, nos puede llevar a la obtención de un sistema de tratamiento con **vertido cero**.

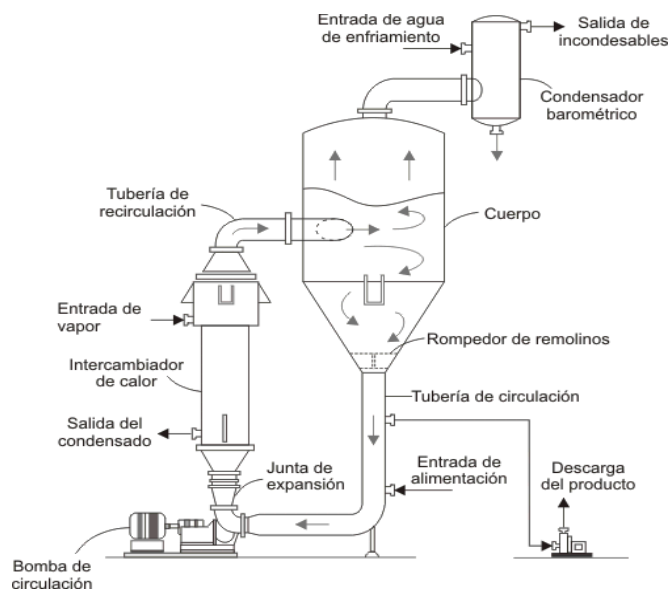


Figura N° 4. Evaporador al vacío con recirculación forzada

El rango de aplicación de estos equipos es prácticamente ilimitado. Algunos de las aplicaciones más comunes son:

- Emulsiones aceitosas, taladrinas, desmoldeantes, etc.
- Purgas de compresores, aguas lavado de suelos.
- Baños de trabajo y aguas de lavado en procesos galvánicos y tratamientos de superficies.
- Líquidos penetrantes.

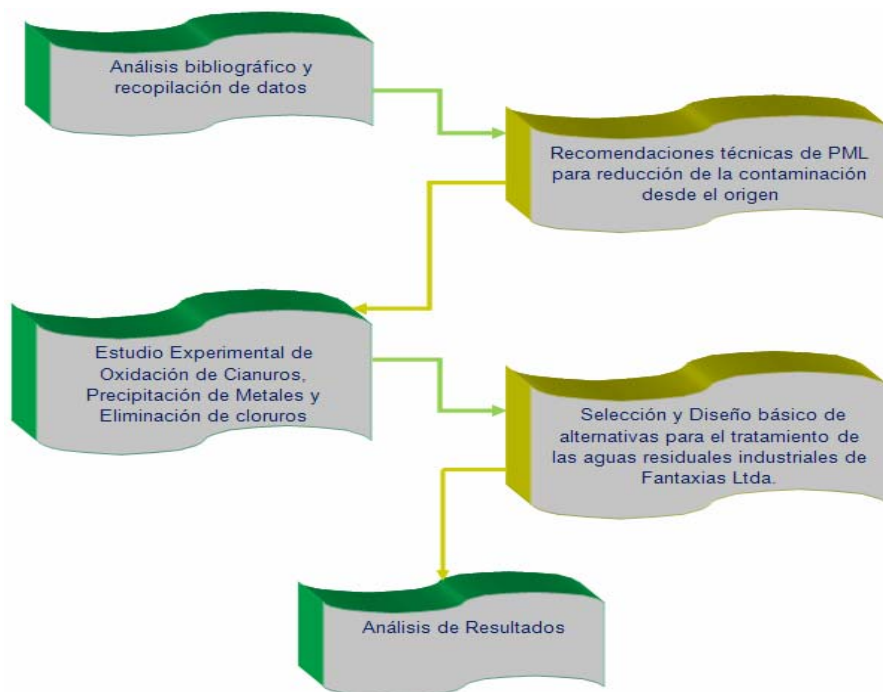
Las aplicaciones de evaporación al vacío en los diferentes sectores industriales realizados han permitido la incorporación de los efluentes tratados al sistema de depuración, reduciendo así en gran medida los costes de eliminación por gestión externa de residuos. Las ventajas de esta tecnología son las siguientes:

- Permite la reutilización y vertido de las aguas tratadas (sin la problemática del incremento de conductividad o sales disueltas).
- No requieren la adición de reactivos.
- Son muy compactas, por lo que ocupan un espacio reducido.
- Requieren poca supervisión y mantenimiento.
- El periodo de retorno de la inversión es muy atractivo.

3. METODOLOGÍA

En ésta sección se presenta la metodología utilizada para el desarrollo experimental del presente estudio, en la que se realizó la nueva caracterización fisicoquímica de los efluentes del proceso de recubrimiento metálico llevado a cabo en la empresa Fantaxias Ltda, debido a los diferentes cambios que fueron implementados y con el objeto de obtener información que permita evaluar el grado de contaminación actual de sus vertimientos para poder efectuar su tratamiento. A continuación se presenta un esquema de las etapas del desarrollo experimental de este trabajo:

Diagrama N° 2. Metodología general del trabajo de grado.



Se estableció una serie de actividades para el desarrollo de esta investigación como se describe a continuación:

3.1 Análisis bibliográfico y recopilación de datos: Para la realización de este trabajo se contó con la revisión bibliográfica de los temas necesarios para recopilar los fundamentos teóricos tales como procesos de recubrimientos metálicos, análisis acerca de conservación y toma de muestras, caracterización física y química de efluentes industriales, técnicas de oxidación de cianuros, precipitación de metales, intercambio iónico y eliminación de sales por evaporación; información de legislación ambiental en Colombia para vertimientos industriales y métodos de selección alternativas.

3.2 Recomendaciones técnicas de producción más limpia (PML)

3.2.1 Estudio y apropiación de los procesos industriales llevados a cabo en la empresa Fantaxias Ltda.

Durante el trabajo de grado se realizaron visitas de reconocimiento a la empresa para identificar los sitios puntuales en donde se hacen los diferentes procesos de recubrimiento metálico haciendo un estudio de la composición de los diferentes baños, condiciones de operación y la forma de cómo la empresa dispone de los residuos generados constantemente; además se identificaron los diferentes puntos de muestreo seleccionados y asignados por estudios anteriores, en donde se arrojan los efluentes contaminantes de metales y compuestos cianurados ¹. Ver **Anexo B (Diagrama proceso de la empresa)**

3.2.2 Diagrama del proceso de recubrimiento de la sección de galvanica:

Después de realizado un trabajo de grado sobre el índice de carga contaminante ¹, el proceso sufrió una serie de cambios en los que se implementaron nuevos tanques de baños electrolíticos, enjuagues y recuperadores, siendo necesario un nuevo diagrama para describir la función de cada uno de los tanques junto con sus condiciones de operación haciendo énfasis en los procesos de acabado de las piezas y sitios de toma de muestreo. Ver **Anexo C (Proceso de electrorecubrimiento en Word y Flaahs Macromedia Player)**.

3.2.3 Muestreo de los efluentes y caracterización fisicoquímica

Se procedió a tomar muestras instantáneas que es el que más se adapta al tipo de vertimiento de la sección de galvanica, determinando un tiempo de muestreo de aproximadamente seis meses debido a que la empresa realiza un ciclo completo de operación cerca de un mes; en éste periodo se lleva a cabo todos los tipos de recubrimiento así como del desague que se realiza cuando se hace el cambio de los baños electrolíticos, desengrase, neutralizadores, etc. El periodo de operación se dividió para efectuar 5 tomas de muestras instantáneas las cuales son suficientes para la representatividad del muestreo ¹⁹.

Las pruebas experimentales correspondientes a cada uno de los parámetros físicos y químicos de importancia (temperatura, turbidez, conductividad térmica, sólidos totales, cianuros, pH, grasas y aceites, cobre, níquel y zinc) se determinaron y se analizaron los puntos de vertimiento que representan un mayor problema para la empresa en cuanto a lo ambiental se refiere. Ver **Anexo D (Manual de toma de muestras y especificaciones para la determinación de las variables de caracterización seleccionadas)**.

3.2.4 Evaluación del índice de carga contaminante (ICC)

Durante esta actividad se hizo una nueva valoración del **índice de carga contaminante** para evaluar la contaminación actual generada por los efluentes de la sección de recubrimientos metálicos de la empresa Fantaxias Ltda. El índice de carga contaminante se determinó teniendo en cuenta las variables fisicoquímicas del efluente resultante y así poder analizar su calidad respecto a la normatividad, toxicidad y amenaza ambiental.¹ Ver **Anexo E (Evaluación ICC)**

A partir de las etapas anteriores se recomendó a la empresa la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada, en los procesos productivos, los productos y los servicios, para reducir los riesgos relevantes a los humanos y al medio ambiente.

El análisis de cada uno de los casos que se consignan en este trabajo, se enfoca principalmente en aspectos de minimización de consumos de reactivos, uso eficiente del agua y disposición adecuada de los residuos generados, con el fin evitar un aumento de los costos en el tratamiento de los efluentes y junto con una estandarización del proceso alcanzar beneficios muy importantes para la empresa. Ver **Anexo F (Recomendaciones técnicas de PML para Fantaxias Ltda.)**

3.3 Estudio experimental de oxidación de cianuros y precipitación de metales para los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

3.3.1 Elección y determinación de las condiciones de operación de la técnica de precipitación química.

En esta etapa se llevo a cabo la elección de la técnica de precipitación química de cobre, níquel y zinc, con hidróxido de sodio (NaOH 2M) y floculación, apropiadas para los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda, en base a los estudios realizados anteriormente ²³. Se prepararon soluciones sintéticas de níquel y zinc con concentraciones de 400 ppm y 500 ppm respectivamente, en un volumen de 500 ml a partir de los reactivos comerciales (NiSO₄, NiCl₂ y ZnCl₂) que utiliza la empresa para preparar los baños de electrorecubrimiento. Las muestras se ajustaron teniendo en cuenta las condiciones de operación en cuanto a tiempo de precipitación, agitación y pH del trabajo preliminar ²³; se caracterizaron mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica (espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 2380, equipado con la respectiva lámpara de cátodo hueco y un flujo de aire-acetileno). Los resultados de la caracterización no arrojaron los valores de concentración de metales permitidos por la normatividad ambiental debido a que los reactivos que se utilizaron

en el trabajo preliminar eran diferentes a los de la empresa; de ésta forma, se determinó que era necesario realizar una serie de experimentos definiendo un máximo y un mínimo de las condiciones de operación del trabajo preliminar, estableciendo un tiempo de precipitación, pH, agitación y cantidad de floculante adecuados para precipitar los metales.

Tabla N° 6. Diseño de experimentos

Variable	Valores	
Tiempo (min)	60	20
pH (unidades de pH)	11.5	10.5
Agitación (rpm)	250	100

Tabla N° 7. Matriz de experimentos

Experimento	Tiempo de Precipitación (min)	pH (unidades de pH)	Agitación (rpm)
1	60	11.5	250
2	60	11.5	100
3	60	10.5	100
4	60	10.5	250
5	20	11.5	250
6	20	11.5	100
7	20	10.5	100
8	20	10.5	250

3.3.2 Elección y determinación de las condiciones de operación de la técnica de clorinación alcalina con hipoclorito de sodio para la oxidación de cianuros.

El método de la clorinación alcalina para la oxidación de cianuros fue escogido del trabajo preliminar realizado ²³ y aplicado a soluciones sintéticas de concentraciones similares a los vertimientos de la empresa que se prepararon utilizando reactivos comerciales (NaCN, CuCN y ZnCN₂) suministrados por la empresa. Las condiciones de operación establecidas por estudios anteriores reportaron resultados insuficientes en la oxidación. Debido a esto, se determinaron nuevas condiciones de operación de tiempo de oxidación ⁷, agitación ⁸, pH ^{11,12} y potencial ¹³ en base a la literatura y comprobando con pruebas experimentales realizadas.

El volumen del reactivo oxidante (hipoclorito de sodio comercial) se obtuvo de los cálculos estequiométricos de la reacción global de cianuros; con el fin de asegurar la oxidación del cianuro se realizó el seguimiento del potencial oxido-reducción a la reacción por medio de un electrodo de platino y uno de referencia Ag/AgCl 3.5M y conectados a un multímetro HC 3500 T. La muestra sintética se destiló en medio ácido

para determinar la concentración de cianuros, titulando con nitrato de plata (Equipo marca titrino metrohm 751GPD). Las aguas sintéticas después de la oxidación total de cianuros contienen concentraciones bajas de metales que permanecen por encima de la normatividad ambiental; por lo tanto, se aplica la técnica de precipitación química con las condiciones de operación establecidas en la etapa **3.3.1**

3.3.3 Determinación de consumos de reactivos en las técnicas de precipitación química de metales y oxidación de cianuros.

En esta etapa se realizaron pruebas de laboratorio para la oxidación de cianuros teniendo en cuenta las caracterizaciones fisicoquímicas que presentan resultados de diferentes concentraciones de cianuros (500ppm, 1000ppm, 2000ppm, 3000ppm y 5000ppm) tomando volúmenes de referencia de 500ml, 1000ml y 1500ml para determinar la tendencia de consumos de reactivos por medio de ecuaciones.

Las soluciones de níquel y zinc fueron preparadas en base a las concentraciones de los efluentes de la empresa tomando como referencia las concentraciones más altas y bajas encontradas en las caracterizaciones fisicoquímicas; también fueron preparadas a diferentes volúmenes (500 ml, 1000 ml y 1500 ml) para determinar el consumo de los reactivos requeridos por medio de ecuaciones.

3.3.4 Prueba de evaporación para la eliminación de cloruros

La prueba de evaporación de las aguas provenientes de la oxidación es necesaria debido a la cantidad significativa de sales que se generan cuando reacciona el hipoclorito de sodio con la solución cianurada en el proceso de cloración alcalina. En esta prueba se utilizó un equipo de destilación con agua de enfriamiento, tomando un volumen de aguas provenientes de la oxidación de 300 ml, con el objeto de disminuir la concentración de cloruros presentes en el clarificado.

Ver Anexo G (Fotos de las pruebas realizadas en el estudio experimental)

3.4 Selección y diseño básico de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales industriales de Fantaxias Ltda.

3.4.1 Alternativas para el tratamiento de los efluentes

- a) Análisis detallados de los parámetros físicos y químicos de los puntos de muestreo seleccionados.
- b) Clasificación de los puntos de muestreo de acuerdo a su pH (acidez y alcalinidad), concentración de metales de cobre, níquel y zinc, y complejos cianurados.

- c) Elaboración de los planos de la sección de galvanía separando las corrientes de efluentes de acuerdo a la clasificación definida en el inciso anterior. Ver **Anexo H (Planos de separación de las corrientes)**
- d) Elaboración de diagramas de bloques de los procesos de tratamiento de efluentes con sus respectivas unidades de operación según incisos b y c. Ver **Anexo I (Planos de unidades de operación)**

3.4.2 Selección de alternativas

Para llevar a cabo la selección de alternativas se utilizó una matriz de valoración ponderal ²⁶ para procesar la información sobre las alternativas de tratamiento de los efluentes permitiendo seleccionar las dos mejores. Para esto se tuvo en cuenta los siguientes criterios de valoración:

- a) **Concentraciones finales:** Este factor está relacionado con las concentraciones finales de Cu, Ni, Zn y CN en las aguas después del proceso de depuración en cada alternativa.
- b) **Consumo de reactivos:** El consumo de reactivos se determinó mediante pruebas experimentales teniendo en cuenta las concentraciones de metales, cianuros y el volumen de aguas a tratar.
- c) **Productos residuales:** Este criterio se refiere al volumen de lodos húmedos generados durante el proceso de oxidación de los cianuros y la precipitación de los metales, también los lodos de la evaporación y de adsorbente agotado del intercambio iónico, que se determinaron en pruebas experimentales preliminares para la selección de alternativas.
- d) **Servicios industriales:** Se consideró la cantidad de agua y energía necesaria durante el tiempo de operación de la planta en cada una de las estrategias. Para esto, se tuvo en cuenta el agua de lavado para los tanques, y la cantidad de energía consumida por el evaporador y en donde se requiera.
- e) **Maquinaria y equipos:** Se analizó cualitativamente la cantidad de maquinaria y equipos necesarios en cada una de las estrategias incluyendo además el costo y la instalación de los mismos.
- f) **Seguridad industrial:** Se consideró la distribución de la planta dentro del área ya definida por la empresa y los mecanismos de seguridad dentro de la misma.
- g) **Tiempo de operación:** Se determinó la sumatoria de tiempo de cada uno de los equipos y tiempo muerto durante el proceso.
- h) **Personal operativo:** Cantidad de personal requerida en el área de producción y mantenimiento de la planta.

3.4.3 Aplicación de la técnica de precipitación química y clorinación alcalina a las alternativas seleccionadas con efluentes reales de la empresa Fantaxias Ltda.

En la precipitación se tomaron muestras de los puntos más significativos en cuanto a concentraciones de níquel y zinc se refiere cuyos puntos lo conforman el M2, M5 y M11; se tomaron volúmenes de 2000 ml de cada punto y se determinó concentraciones de metales, pH, temperatura y conductividad, aplicando las condiciones de operación definidas en la etapa **3.3.1**. Finalmente se agregó el agente floculante ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) que logró mayor remoción de metales.

Para la aplicación de la técnica de clorinación alcalina se realizó un muestreo del punto de mayor concentración de cianuros (M10) y donde se reúnen todas las aguas cianuradas (M12), tomando volúmenes de 2000 ml de cada punto determinando concentraciones de metales y cianuros, pH, temperatura y conductividad, aplicando las condiciones de operación definidas en la etapa **3.3.2**. En este proceso se genera un lodo que fue objeto de estudio para su inertización por otros trabajos de investigación. Posteriormente fue aplicada la técnica de precipitación química y floculación al clarificado obtenido de la oxidación total de cianuros.

A continuación se realizaron pruebas con efluentes reales tratando volúmenes que van desde 5 hasta 20 litros para analizar el comportamiento de las aguas cuando se aplicaban las condiciones de operación establecidas obteniéndose resultados positivos y estudiar al mismo tiempo, el consumo de reactivos y volumen de lodos generados para su escalamiento en el diseño de unidades de operación.

3.4.4 Diseño básico de las alternativas seleccionadas

Con base a las etapas anteriores se procedió a la elaboración del diseño básico de las unidades de operación de las alternativas seleccionadas teniendo en cuenta los equipos y accesorios que existen en el mercado para este tipo de tratamientos con su respectivo análisis financiero.

3.5 Análisis de resultados

En esta actividad de analizaron los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y se estudió el desarrollo de las unidades de operación para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presenta los resultados y el análisis de los mismos para cada una de las actividades propuestas en el capítulo anterior

4.1 Caracterización fisicoquímica de los efluentes de la sección de galvánica.

Tabla Nº 8. Caracterización de variables físicas con su respectivo punto de vertimiento

Muestra	Temperatura (C)	Turbidez (NTU)	Conductividad (m S/Cm)	Sólidos Totales (ppm)
M1	17,00	26.2	0.747	524
M2	22,00	1.46	0.794	120
M3	21,00	2.56	5.001	3968
M4	22,00	0.50	3.94	800
M5	24,00	1.26	0.57	536
M6	23,00	0.26	0.23	24
M7	20,00	66.2	8.16	2800
M8	21,00	1.15	2.17	624
M9	19,00	3.24	9.94	9240
M10	19,00	1.60	19.76	21676
M11	22,00	26.5	2.53	3044
M12	18,00	2.30	3.83	3312

Las muestras fueron tomadas en diferentes puntos de la planta como se muestra en el **Anexo C**.

Tabla Nº 9. Caracterización de variables químicas con su respectivo punto de vertimiento

Muestra	Cianuros (ppm)	pH (Unidades de pH)	Grasas y Aceites (ppm)	Cobre (ppm)	Níquel (ppm)	Zinc (ppm)
M1	0	10	0	1.356	2.36	0.743
M2	0	3.19	0	1.177	1.87	79.2
M3	894.50	9.87	0	692	7.368	1.91
M4	0	2.34	0	3.512	4.35	11.55
M5	0	7.53	9,16	1.321	190.50	0.266
M6	36.17	9.11	0	0.22	2.98	0.197
M7	0	12.18	21,62	4.55	3.52	2.79
M8	0	2.61	0	4.99	3.27	43
M9	2554.64	9.75	0	2012	12.06	24.50
M10	5574.28	10.03	0	5656	22.2	1404
M11	0	6.85	9,69	1.056	408	507
M12	1903.8	9.85	17.6	1167.93	22.77	78.53

En general, todos los puntos de muestreo reportaron valores de concentración de metales muy por encima de los límites permisibles, los cuales aumentaban en gran

medida cuando los baños correspondientes estaban en operación. De la misma manera, las concentraciones de cianuro fueron muy elevadas en las líneas de cobrizado y latonado, haciendo evidente la necesidad de remover este anión previo a la precipitación debido a su efecto acomplejante e interferente en el proceso de eliminación del metal ⁸.

4.2 Aplicación de la técnica de precipitación química

Con base en la caracterización de los efluentes de la sección de galvanica, llevada a cabo en la actividad previa, y también en la literatura revisada, se procedió a la aplicación de la técnica de precipitación química a efluentes sintéticos preparados con reactivos comerciales suministrados por la empresa con el fin de remover los metales en solución y obtener las condiciones de operación adecuadas al proceso.

Tabla N° 10. Concentraciones de Ni y Zn después de la precipitación en el diseño de experimentos

Experimento	Concentración final de Níquel (ppm)	Concentración final de Zinc (ppm)
1	50.14	46.42
2	14.52	11.03
3	213.6	184.5
4	301.5	270.1
5	67.62	58.96
6	24.12	20.95
7	241.4	221.6
8	239.8	190.1

La tabla N° 10 muestra los resultados del comportamiento de la precipitación de níquel y zinc en soluciones sintéticas bajo diferentes condiciones de pH, agitación y tiempo de precipitación. A valores de pH 10.5 se obtuvo concentraciones de metales significativas a los 20 y 60 minutos de precipitación. Se lograron a un pH de 11.5, tiempo de precipitación de 60 min y agitación continua de 100 rpm niveles cercanos a lo permisibles por la normatividad ambiental pero no lo suficiente para su vertimiento. Debido a esta situación fue necesario experimentar con la dosificación del floculante ya que el sulfato férrico recomendado es muy ácido y afecta la solución disminuyendo considerablemente el pH hasta lograr diluir nuevamente los metales que ya habían precipitado. A continuación se muestra los resultados de las pruebas de floculación para 500 ml de efluente empleando agitación de 100 rpm, pH de 11.5 y tiempo de precipitación de 60 min.

Tabla N° 11. Prueba de floculación para muestras sintéticas

Variable	Volumen de Sulfato Férrico (Dilución 1:2)							
	0.25ml		0.5ml		1ml		2ml	
Tiempo de sedimentación (min)	20		20		20		20	
Características del clarificado	turbidez		traslucido		traslucido		Mayor turbidez	
Volumen de lodo	71ml Poco compacto		50 ml Compacto		63 ml Compacto		53 ml Muy Compacto	
Concentración final (ppm)	Ni	Zn	Ni	Zn	Ni	Zn	Ni	Zn
	1.2	0.9	0.6	0.3	9.4	7.6	14.52	11.03

Con base en los resultados anteriores, se concluyó que las condiciones de operación más convenientes para llevar a cabo la etapa de precipitación y floculación de níquel y zinc son: pH **11.5**, agitación de **100 rpm** y tiempo de precipitación de **60 min**, con una dosificación de **0.1 %** de Sulfato férrico (**1:2**)¹⁷ a la solución a tratar dado los altos niveles de remoción de metales y compactación de los sólidos generados.

Tabla N° 12. Condiciones de operación para la precipitación química en aguas sintéticas

Variable	Condición de Operación	Característica
Agitación	100 rpm	Determinada por pruebas experimentales, buscando la mejor formación de lodos para su facilidad de separación
Tiempo de precipitación	60 min	El necesario para alcanzar la precipitación de metales alcanzando la normatividad ambiental.
pH	11.5	Determinado por pruebas experimentales, siguiendo el diagrama de solubilidad de metales a diferentes pH.
Volumen de floculante	0.1% de la solución a tratar	Su dosificación se encontró por pruebas experimentales en ensayo de jarras, relación 1:2 de Sulfato Férrico.
Tiempo de agitación en la floculación	3 min	El recomendado en la literatura y comprobado experimentalmente para este tipo de aguas
Tiempo de sedimentación	20 min	El recomendado en la literatura y comprobado experimentalmente para este tipo de aguas

4.3 Aplicación de la técnica de oxidación de cianuros por clorinación alcalina

Antes de aplicar la técnica de oxidación de cianuros por clorinación alcalina fue necesario realizar pruebas experimentales de jarras para determinar la cantidad en exceso de hipoclorito de sodio indicado y poder garantizar la oxidación total del ión CN⁻.

Tabla Nº 13. Condiciones experimentales de la primera etapa de la oxidación de cianuros (pH inicial = 11-12, Volumen de muestra=500 ml y CN=3000ppm)

Descripción	Característica				
	Jarra 1 (0.5L)	Jarra 2 (0.5L)	Jarra 3 (0.5L)	Jarra 4 (0.5 L)	Jarra 5 (0.5 L)
Reactivo para cambio de pH	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio	Hidróxido de sodio
Exceso de hipoclorito de sodio	50%	20%	15%	10%	Sin Exceso
Características del clarificado	Color agua marina	Color agua marina	Color agua marina	Color agua marina	Color agua Marina

Tabla Nº 14. Condiciones experimentales de la segunda etapa de oxidación de cianuros (pH inicial = 8.5-9)

Descripción	Característica				
	Jarra 1 (0.5L)	Jarra 2 (0.5L)	Jarra 3 (0.5L)	Jarra 4 (0.5L)	Jarra 5 (0.5L)
Exceso de hipoclorito de sodio	50%	20%	15%	10%	Sin Exceso
Volumen de hipoclorito de sodio (solución de concentración adecuada)	42.9mL	31.7mL	27 mL	25 mL	21 mL
Características del clarificado	Alta turbiedad	Mayor turbiedad	Color Agua Marina más oscuro	Color Agua Marina claro	Turbiedad Media
Características del Floculo formado	Lodo muy oscuro	Lodo más oscuro y buena sedimenta.	Gran cantidad de flóculos con muy buena velocidad de sedimenta.	Gran cantidad de flóculos con muy buena velocidad de sedimenta.	Gran cantidad de flóculos con muy buena velocidad de sedimenta.
pH final	8.87	8.85	8.62	8.72	8.65
Oxidación de CN	Buena	Buena	Buena	Buena	Regular

Las tablas Nº 13 y 14 presentan los resultados y los detalles experimentales de las dos etapas de la oxidación de cianuros. Para asegurar que la reacción de oxidación se efectuó en cada etapa, se hizo un seguimiento del potencial con un electrodo de Ag/AgCl 3.5M y un multímetro HC 3500 T. Un exceso entre el 10 y el 20 % de hipoclorito de sodio, calculado estequiométricamente, permite que el cianuro pase a cianato alcanzando un potencial mayor a 300 mV, y el cianato pase a CO₂ y N₂ cuando el potencial supera los 400 mV^{13,14}. Además, con este exceso, la oxidación se ve favorecida en lo que refiere a la característica del clarificado y la del floculo formado.

Se procedió a la experimentación utilizando aguas sintéticas cianuradas con diferentes concentraciones y volúmenes con el objeto de establecer las condiciones de operación de este proceso.

Tabla N° 15. Oxidación de cianuros a diferentes concentraciones y volúmenes de muestra

(ppm) Muestra	Volumen (ml)	(ppm) Cu	(ppm) Zn	(ppm) CN
CN 5000	500	57.2	24.3	<1
Cu 2700	1000	66.4	74.6	<1
Zn 750	1500	172.8	38.4	<1
CN 3000	500	56.5	70.5	<1
Cu 1600	1000	70.6	43.7	<1
Zn 450	1500	64.1	57.2	<1
CN 2000	500	2.4	6.1	<1
Cu 1000	1000	14.4	39.1	<1
Zn 300	1500	37.7	49.6	<1
CN 1000	500	2.53	4.73	<1
Cu 550	1000	2.77	8.92	<1
Zn 150	1500	2.74	9.68	<1
CN 500	500	3.44	77.6	<1
Cu 270	1000	1.67	0.68	<1
Zn 75	1500	1.06	0.61	<1

Tabla N° 16. Precipitación de metales a diferentes concentraciones y volúmenes de muestra

(ppm) Muestra	Volumen (ml)	(ppm) Cu	(ppm) Zn	(ppm) Cloruros
CN 5000	500	2.81	1.42	42605
Cu 2700	1000	0.5	0.74	38200
Zn 750	1500	0.25	1.04	46714
CN 3000	500	2.84	0.88	26800
Cu 1600	1000	0.66	0.27	30100
Zn 450	1500	1.33	1.66	30900
CN 2000	500	0.31	0.18	18200
Cu 1000	1000	0.25	0.26	18800
Zn 300	1500	14	0.55	20300
CN 1000	500	0.34	1.47	9583
Cu 550	1000	0.088	0.06	9804
Zn 150	1500	0.066	0.08	9542
CN 500	500	0.055	0.014	4474
Cu 270	1000	0.088	0.03	6045
Zn 75	1500	0.066	0.0082	5736

La precipitación química y la floculación fueron aplicadas en estas pruebas de acuerdo a las condiciones de operación encontradas y definidas anteriormente.

En la tabla N° 17 se presenta las condiciones de operación encontradas en la experimentación con aguas sintéticas.

Tabla N° 17. Condiciones de operación para la oxidación de cianuros por clorinación alcalina en aguas sintéticas

ETAPA	CONDICIONES	OBSERVACIONES
Ajuste de pH de la solución sintética.	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de la muestra: • Determinación de pH inicial: • Reactivo: Hidróxido de Sodio (NaOH) 2M. • Volumen: (necesario para conseguir el ascenso de pH entre 11 y 12) • Velocidad de agitación: 250 rpm, debe ser constante. • Determinación pH final: 	<ul style="list-style-type: none"> • Este ajuste debe realizarse por el tiempo necesario hasta que se establezca el pH completamente.
Oxidación de cianuros (Primera etapa)	<ul style="list-style-type: none"> • pH inicial: (entre 11-12.) • Reactivo: Hipoclorito de Sodio (NaOCl). • Tiempo: Mínimo 20 minutos requeridos para obtener lodos de mejor sedimentación. • Velocidad de agitación: 250 rpm constante. • Determinación de pH final: 	<ul style="list-style-type: none"> • NaOCl al 13%, tal y como se comercializa. • Dosificación rápida y en grandes cantidades; por lo menos un 90 % del volumen total en la primera adición. • El potencial mínimo necesario para que los Cianuros pasen a Cianatos debe ser de 260 mV.
Ajuste de pH	<ul style="list-style-type: none"> • Reactivo: Ácido Nítrico (HNO₃) al 65 %. • Volumen: El necesario para dejar el pH entre 8.5 – 9 • Velocidad de agitación: 250 rpm constante. • Determinación de pH final: 	<ul style="list-style-type: none"> • Este ajuste debe realizarse por el tiempo necesario hasta que se establezca el pH completamente.
Oxidación de Cianatos (segunda etapa)	<ul style="list-style-type: none"> • pH inicial: (Entre 8.5-8.9) • Reactivo: Hipoclorito de Sodio (NaOCl). • Volumen que falta por agregar de NaOCl en la oxidación: • Tiempo: mínimo 20 min requerido para alcanzar el potencial y esperar hasta que se establezca y obtener lodos de mejor sedimentación. • Velocidad de agitación: 250 rpm constante. • Determinación de pH final: 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial mínimo para que los cianatos pasen a N₂ y CO₂ debe ser de 400 mV.
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de la muestra: • Determinación pH inicial: • Reactivo: Hidróxido de Sodio (NaOH) 2M. • Volumen: (necesario para conseguir el ascenso de pH) • Velocidad de agitación: 100 rpm, debe ser constante. • pH final: 11.50 	<ul style="list-style-type: none"> • Se lleva hasta el pH de 11.5, ya que este es considerado como el ideal para que la precipitación del Cobre y del Zinc sea total.
Floculación	<ul style="list-style-type: none"> • Reactivo: Sulfato Férrico. • Volumen: 0.1 % solución a tratar. • Sedimentación: Mínimo 20 min • Determinación de pH final: 	<ul style="list-style-type: none"> • El Floculante se agrega en solución 1:2 • Mezcla rápida en tres minutos con una agitación mecánica de 100 rpm.

Obtenidas las condiciones de operación para la precipitación de metales y oxidación de cianuros se realizaron pruebas directas con los efluentes reales de la empresa Fantaxias Ltda para analizar el comportamiento de acuerdo a las condiciones de operación encontradas con aguas sintéticas y evaluar el consumo de reactivos junto con la generación de lodos de cada proceso.

Tabla N° 18. Resultados de precipitación de metales en efluentes reales

Mezcla	Variables								
	Vol. (ml)	pH i	Cu (ppm)		Ni (ppm)		Zn (ppm)		pH f
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
B: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M5, M7 y M8 (Mezcla aguas sin CN)	500	7.08	2.60	1.19	88.8	1.22	58.4	0.058	9.80
	1000	7.08	2.60	1.08	88.8	1.14	58.4	0.13	9.82
	1500	7.08	2.60	1.12	88.8	0.96	58.4	0.11	9.87
C: Compuesta por los puntos M5 y M11 (Mezcla aguas por encima de 100 ppm)	500	7.14	0.83	0.12	241	1.25	124	0.42	9.50
	1000	7.14	0.83	0.15	241	1.13	124	0.34	9.57
	1500	7.14	0.83	0.09	241	1.15	124	0.48	9.60
D: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M7 y M8 (Mezcla aguas por debajo de 100 ppm)	500	6.93	3.64	2.09	2.77	1.08	26.8	0.082	9.35
	1000	6.93	3.64	1.96	2.77	1.14	26.8	0.11	9.40
	1500	6.93	3.64	1.84	2.77	1.06	26.8	0.12	9.36
E: Compuesta por los puntos M1, M5 y M7 (Mezcla aguas alcalinas)	500	8.55	0.61	0.14	166	0.50	0.48	0.016	10.96
	1000	8.55	0.61	0.23	166	0.68	0.48	0.03	10.54
	1500	8.55	0.61	0.30	166	0.78	0.48	0.078	10.80
F: Compuesta por los puntos M2, M4, M8 y M11 (Mezcla aguas acidas)	500	2.92	4.09	1.65	63.8	1.52	101	0.043	9.05
	1000	2.92	4.09	1.52	63.8	1.63	101	0.26	9.10
	1500	2.92	4.09	1.26	63.8	1.45	101	0.079	9.17
Condiciones permitidas por la Normatividad Ambiental			3		2		5		6-10

Tabla N° 19. Resultados de oxidación y precipitación del punto global cianurado M12

OXIDACION DE CIANUROS								
Volumen (ml)	Caracterización Inicial				Caracterización Final			
	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	CN (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	CN (ppm)
500	1901	85.7	209	1583	40.4	11.3	21.6	<1
1000	1901	85.7	209	1583	40.4	11.3	21.6	<1
1500	1901	85.7	209	1583	40.4	11.3	21.6	<1
PRECIPITACION DE METALES								
500	40.4	11.3	21.6	<1	1.04	1.25	0.83	<1
1000	40.4	11.3	21.6	<1	1.04	1.25	0.83	<1
1500	40.4	11.3	21.6	<1	1.04	1.25	0.83	<1

Las pruebas experimentales con efluentes reales se hicieron teniendo en cuenta el diseño de las alternativas para la oxidación de cianuros, precipitación de metales y eliminación de sales. La tabla N° 18 y 19 representan la concentración inicial y final de los contaminantes para cada una de las mezclas de aguas en donde se indica y se comprueba la efectividad de la eliminación de cianuros y remoción de los metales. Ver **Anexo J (Ecuaciones de consumos de reactivos y volumen de lodos generados en volúmenes pequeños de efluente).**

4.4 Selección de alternativas según parámetros de diseño.

Después de que se comprobaron las condiciones de operación establecidas con las aguas sintéticas aplicadas a los efluentes reales de la sección de electrorrecubrimientos de la empresa, se procedió a la selección de las dos mejores alternativas de diseño de las cuatro propuestas realizadas para su tratamiento, por medio de una matriz de valoración ponderal²⁶ en función de varios criterios de diseño.

Tabla N° 20. Descriptores de calidad para la selección de alternativas

Valor	Descripción
0	Muy Malo
1	Malo
2	No aceptable
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente

Tabla N° 21. Calificación de alternativas de acuerdo a los criterios de evaluación

CRITERIO	ALT 1	ALT 2	ALT 3	ALT 4
Concentraciones Finales CN, Cu, Zn, Ni	4	4	4	4
Consumo de Reactivos	5	0	4	3
Productos Residuales (Cant. Lodos)	3,36	0	5	5
Servicios Industriales (Consumo Energía y Agua)	5	4.31	3.6	0
Maquinaria y Equipos (costo equipos e instalación)	5	3,34	1.68	0
Seguridad Industrial	5	3.34	1.68	0
Tiempo de Operación	3.34	5	2	1.68
Personal Operativo (Cant. operarios)	5	4	3	3
TOTAL	35.7	23.99	24.96	16.68

De acuerdo al método de escala de clasificación verbal ²⁶ y a los criterios de evaluación de las alternativas de tratamiento, se determinó por medio de criterios de diseño que las estrategias 1 y 3 son las más adecuadas por su alto puntaje obtenido. Ver **Anexo K (Diagramas en HYSYS de las alternativas de tratamiento seleccionadas)**.

4.5 Análisis de consumos de reactivos y volumen de lodos generados

Seleccionadas las dos mejores alternativas, se realizaron pruebas con efluentes reales tratando volúmenes que van desde 5 hasta 20 litros.

Tabla N° 22. Resultados de precipitación de metales en 5, 10 y 20 litros de efluente real

Mezcla	Variables								
	Vol. (L)	pH i	Cu (ppm)		Ni (ppm)		Zn (ppm)		pH f
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
B: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M5, M7 y M8 (Mezcla aguas sin CN)	5	7.10	2.22	1.24	64.8	1.45	45.9	2.03	10.90
	10	7.10	2.22	1.50	75.6	0.84	42.5	0.13	11.04
	20	7.10	2.22	1.32	75.6	0.8	45.9	0.13	10.99
C: Compuesta por los puntos M5 y M11 (Mezcla aguas por encima de 100 ppm)	5	7.25	1.56	0.20	197.4	1.2	105.9	0.10	11.05
	10	7.25	1.56	0.25	195.2	1.23	99.1	0.083	10.45
	20	7.25	1.56	0.08	295.2	1.17	101.7	0.073	10.45
D: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M7 y M8 (Mezcla aguas por debajo de 100 ppm)	5	9.41	2.85	2.12	2.13	0.47	26.8	0.082	10.74
	10	9.41	2.85	2.03	1.82	0.49	16.3	0.11	10.44
	20	9.41	2.85	1.84	2.14	0.32	16.4	0.12	10.87
Condiciones permitidas por la Normatividad Ambiental			3		2		5		6-10

Tabla N° 23. Resultados de oxidación y precipitación en 5, 10 y 20 litros de efluente real

OXIDACION DE CIANUROS								
Volumen (L)	Caracterización Inicial				Caracterización Final			
	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	CN (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	CN (ppm)
5	233.5	14.28	17.7	310	9.12	2.03	3.24	<1
10	233.5	14.28	17.7	310	9.12	2.03	3.24	<1
20	233.5	14.28	17.7	310	9.12	2.03	3.24	<1
PRECIPITACION DE METALES								
5	9.12	2.03	3.24	<1	1.50	0.76	0.63	<1
10	9.12	2.03	3.24	<1	1.50	0.76	0.63	<1
20	9.12	2.03	3.24	<1	1.50	0.76	0.63	<1

En estas pruebas experimentales se aplicaron las condiciones de operación descritas en las tablas N° 12 y 17 respectivamente en las cuales se obtuvieron resultados satisfactorios para la remoción de contaminantes y el escalamiento de consumo de reactivos dado que se conserva la linealidad. Ver **Anexo L (Ecuaciones de consumo de reactivos y volumen de lodos generados en 5, 10 y 20 litros de efluente)**

Tabla N° 24. Consumo de reactivos de la alternativa 1

Reactivo	Diario	Mensual	Anual
NaOH (Kg)	11	330	3960
Cl ₂ (Kg)	13.5	405	4860
H ₃ PO ₄ (L)	1.2	36	432
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	4	120	1440

Tabla N° 25. Consumo de reactivos de la alternativa 3

Reactivo	Diario	Mensual	Anual
NaOH (kg)	10	300	3600
Cl ₂ (kg)	13.5	405	4860
H ₃ PO ₄ (L)	1.2	36	432
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	1.8	54	648

En las tablas N° 24 y 25 se presenta el consumo de reactivos de la oxidación de cianuros y precipitación de metales de las alternativas seleccionadas teniendo como base de cálculo **4 m³** de efluentes generados diariamente.

Teniendo en cuenta la cantidad de sales de cloruros que se generaban en la etapa de la oxidación de cianuros ⁸ en muestras sintéticas y efluentes reales se realizaron pruebas de evaporación para analizar la calidad de agua obtenida ²⁷.

Tabla N° 26. Condiciones iniciales del clarificado de la oxidación

Variables						
Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	Cl (ppm)	Vol. Muestra (ml)	Flujo Refrigerante (ml/s)	Temperatura de Evaporación (°C)
9.23	2.03	3.24	3700	300	220.72	115

Tabla N° 27. Resultados de la evaporación

t. condensado (min)	Vol. condensado (ml)	Cl (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)
		Concentraciones finales			
20	45	37.58	0.86	0.92	0.45
40	50	33.96	0.82	1.03	0.53
60	55	33.29	0.95	0.98	0.60
80	50	33.02	0.80	1.04	0.51
100	48	34.03	0.88	0.95	0.50
Mezcla final condensado					
120	248	37.96	0.95	0.83	0.62
Residuo evaporador					
120	48	3650	7.12	1.14	2.4

La tabla N° 27 refleja los resultados que se obtuvieron en la prueba de evaporación logrando remover el 99 % de las sales.

La experimentación de oxidación de cianuros, precipitación de metales y eliminación de sales por evaporación, permitió efectuar el diseño básico de las alternativas de tratamiento que se presenta a continuación:

4.6 Diseño básico de los procesos para las alternativas seleccionadas para el tratamiento de los efluentes.

4.6.1 Capacidad y localización de la planta

Se realizó un análisis del volumen de agua residual que sale de la empresa Fantaxias Ltda., para cuantificar el tamaño de la planta Ver **Anexo M (Caudales de las vertientes de galvanía)**. Observando el promedio de (3414 litros/día) se escogió una capacidad de la planta de 4000 litros/día; es decir 120 m³/mes. El área disponible que existe para la implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales posee una dimensión de 17 m² ubicada en el primer piso de la empresa Fantaxias Ltda. Ver **Anexo N (Plano en AUTOCAD de la empresa Fantaxias Ltda)**.

4.6.2 Tipo de proceso El tipo de proceso escogido es discontinuo; ya que el tiempo de operación de la planta no requiere tiempo completo durante el proceso. Por esta razón, se implementan turnos de trabajo de acuerdo al día de operación y el volumen de agua recogido para su depuración.

4.6.3 Descripción diagramas de bloques.

Diagrama N° 3. Esquema de bloques alternativa 1

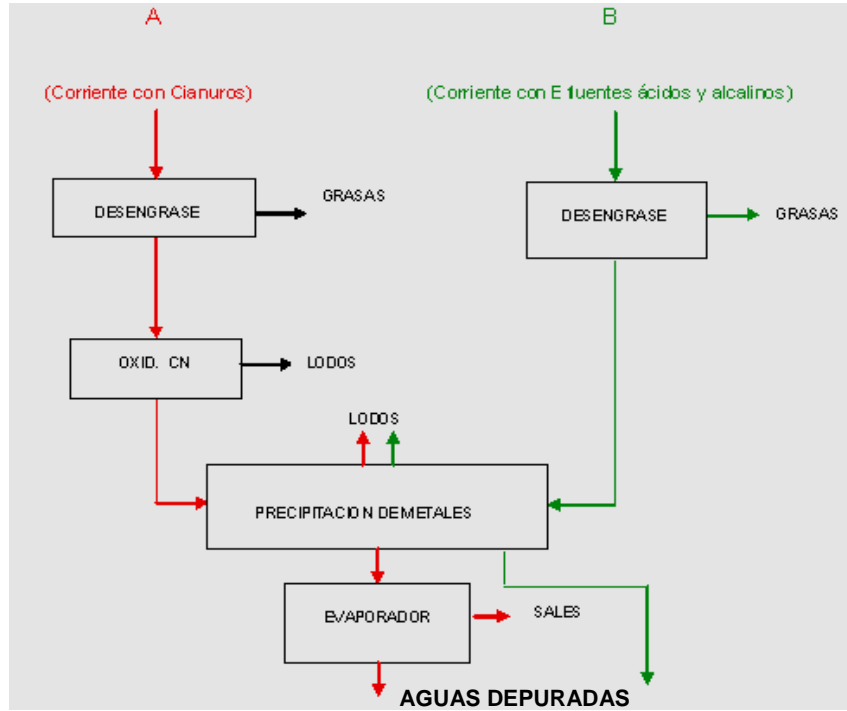
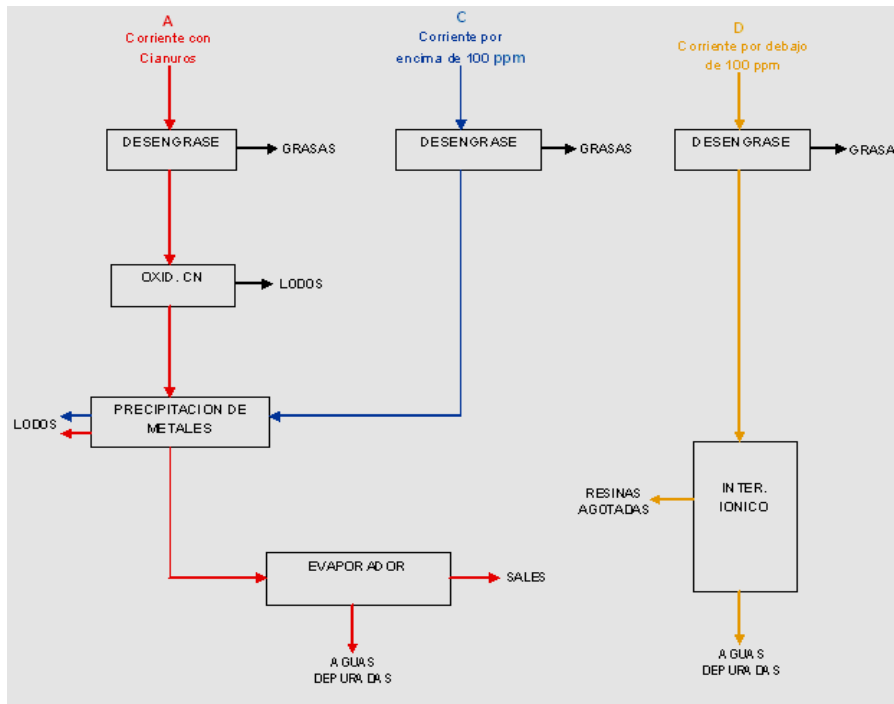


Diagrama N° 4. Esquema de bloques alternativa 3



4.6.4 Unidades de operación y accesorios

Tabla N° 28. Cantidad de equipos y accesorios requeridos para la alternativa 1 y 3

Equipo o accesorio	Cantidad		Característica	Uso
	Alternativa 1	Alternativa 3		
Bombas	6	7	130 Lit/min	Equipo para transportar fluidos
Válvulas	22	28	Diafragma	Mecanismo para regular el flujo
Tanques Cilíndricos	5	6	Polipropileno 1500 Lit	Almacenamiento de efluentes y lodos
Tanques Cilíndricos	2	-----	Polipropileno 3000 Lit	Almacenamiento de efluentes
Tanque Cilíndrico	-----	1	Polipropileno 1000 Lit	Almacenamiento de Agua de enfriamiento
Tanques Cilíndricos	-----	3	Polipropileno 2000 Lit	Almacenamiento de efluentes
Tanque Cilíndrico	1	1	Polipropileno 250 Lit	Almacenamiento de sales del evaporador
Trampas de Desengrase	2	3	Cilíndrica fibra de vidrio	Remover grasas y aceites
Tanque cilíndrico	1	1	Polipropileno 1500 Lit	Oxidación de Cianuros
Tanque cilíndrico	1	1	Polipropileno 1500 Lit	Precipitación de Metales
Decantador cuadrado	2	1	Polipropileno 1500 Lit	Separación de Aguas y Lodos
Agitadores	2	2	Tanques de 1500 Lit (100-300rpm)	Oxidación y Precipitación
Evaporador	1	1	Acero Inoxidable	Eliminación de sales
Intercambiador Iónico	-----	1	Resina Amberlite-120	Adsorbente de metales
Tuberías	80 m	120 m	PVC (1-2 pulgadas)	Transporte de efluentes y Lodos

La cantidad de equipos y accesorios se determinaron según las etapas de tratamiento que hacen parte de las alternativas de diseño seleccionadas. Ver **Anexo O (Diagramas de equipos y accesorios de las alternativas 1 y 3)**

4.6.5 Unidad recolección aguas residuales.

Se recogerá un volumen de aproximadamente 2750 litros diarios de aguas no cianuradas para luego llevarlas a la unidad de precipitación y un volumen de 1250 litros diarios aproximadamente para llevarlas a la unidad de oxidación.

4.6.6 Unidad de oxidación.

Al tanque de oxidación de cianuros entran 1250 litros de agua en donde se realiza oxidación de CN por medio de hipoclorito de sodio al 13% en dos etapas.

En la primera etapa se debe ajustar el pH entre 11- 12 para agregarle el hipoclorito de sodio cuyo volumen es calculado estequiométricamente mas un 10% de exceso y el NaOH que requiere para mantener el pH en ese rango, así el CN pasa a cianato en un tiempo de 20 minutos; la reacción de oxidación en la primera etapa alcanza un potencial de 260 mV.

Para la segunda etapa se ajusta el pH en un rango de 8,5 – 9 con ácido fosfórico al 85% y se completa la dosificación de hipoclorito de sodio hasta que alcance un potencial de 400 mV, reaccionando el cianato para convertirse en nitrógeno y dióxido de carbono en un tiempo de 20 minutos; este proceso se realiza con una agitación de 250 rpm.

4.6.7 Unidad de evaporación.

El sistema de evaporación se implementa con el objeto de reducir la concentración de sales provenientes de la unidad de oxidación de cianuros por medio de un intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras el vapor de agua se enfría, disminuyendo su temperatura, el clarificado de la oxidación se calienta aumentando su temperatura, pasando de su estado líquido original a estado vapor. Este vapor de agua entra en un sistema de enfriamiento en donde se condensa, obteniéndose finalmente concentraciones mínimas de sales en la corriente líquida ²⁷.

En este sistema se trata un volumen de líquido entre 1035-1195 litros que salen de la unidad de oxidación.

4.6.8 Unidad de precipitación.

En el tanque de precipitación ingresa un volumen que va desde 630 – 2750 litros provenientes de las corrientes de la unidad de oxidación y del tanque de efluentes no cianurados, aplicando una agitación mecánica de 100 rpm y llevando el pH de la solución a 11.5. De esta manera, se consigue que los metales que están en forma de iones disueltos se insolubilizan y caigan al fondo del recipiente en forma de hidróxidos por medio de la alcalinización de la solución con NaOH en un tiempo de una hora.

4.6.9 Unidad de intercambio iónico.

El intercambio iónico es básicamente una reacción química de sustitución entre iones metálicos presentes en los efluentes de la empresa y un electrolito insoluble (resinas adsorbentes) en el cual se pone en contacto el efluente.

4.6.10 Unidad trampa de desengrase.

Consiste en un tanque en donde se realiza la separación de grasas y aceites del efluente por medio de densidades, quedando el aceite en la parte superior para posteriormente ser removido por arrastre.

4.7 Dimensiones de equipos

4.7.1 Sistema de oxidación de cianuros, precipitación de metales y tanques de almacenamiento

Tabla N° 29. Características de las unidades de oxidación y precipitación

Condiciones	UNIDAD DE OXIDACION Corriente A Concentración 300 – 1500 ppm		UNIDAD DE PRECIPITACION DESPUES DE OXIDACION Corriente A Concentración 300 – 1500 ppm		UNIDAD DE PRECIPITACION Corriente B Concentraciones Cu 2,60 ; Ni 88,8; Zn 58,4 ppm		UNIDAD DE PRECIPITACION Corriente C Concentraciones Cu 1,56; Ni 241; Zn 124 ppm		UNIDAD DE PRECIPITACION Corriente D Concentraciones Cu 3,64 ; Ni 2,77; Zn 26,8 ppm	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Volumen de Agua (L)	1250	1035 - 1195	1035 - 1195	1009 - 1189	2750	2470	630	554	2120	2012
Volumen de Lodos (L)	0	55 – 215	0	6 – 26	0	280	0	76	0	108
Consumo NaOH (Kg)	0,7 – 5,4		0,85 - 3,5		2		1,12		0,98	
pH	1 Ajuste:11-12 2 Ajuste:8,5-9		8,5-9	10,5 – 11,5	7-7,15	10,5 -11,5	6,90-7,35	10,5 -11,5	9,30-9,50	10,5 -11,5
Consumo Cl ₂ (Kg)	2,93 – 13,5		-----		-----		-----		-----	
Consumo H ₃ PO ₄ (L)	0,8 – 1,2		-----		-----		-----		-----	
Tiempo de Operación	1:30 horas		1 hora		1 hora		1 hora		1 hora	
Agitación (rpm)	250		100		100		100		100	
Potencial	1 Etapa: 260 mV 2 Etapa: 400 mV		-----		-----		-----		-----	
Consumo Floculante			1 – 1,2		2,75		0,63		2,1	

El dimensionamiento y especificaciones se determinaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la oxidación de cianuros, precipitación de metales y las características principales de cada una de las unidades de acuerdo a la clasificación de corrientes de las alternativas presentadas en la tabla N° 29.

Tabla N° 30. Especificaciones tanques alternativa 1

TANQUES	DIMENSIONES					CARACTERISTICAS ESPECIALES
	Altura (m)	Diámetro B (m)	Diámetro C (m)	Ancho (m)	Largo (m)	
TK _{A1} , TK _{A2} , TK _{A3} , TK _O , TK _P , TK _{L1} , TK _{A4}	1.19	1.45	1.10	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Capacidad: 1500 L Material: Polipropileno
TK _{D1} - TK _{D2}	1.19	1.45	1.10	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Caudal de 300 ml/seg Material: Fibra de vidrio Capacidad: 1500 L
TK _{TV1} -TK _{TV2}	1.79	-----	-----	1.10	1.10	Una entrada y Tres salidas de 1 ½ pulg Material: Polipropileno Capacidad: 1500 L
TK _{L2}	0.76	0.84	0.58	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad: 250 L
TK _{A5} -TK _{A6}	1.46	1.86	1.47	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad 3000 L

Tabla N° 31. Especificaciones tanques alternativa 3

TANQUES	DIMENSIONES					CARACTERISTICAS ESPECIALES
	Altura (m)	Diámetro B (m)	Diámetro C (m)	Ancho (m)	Largo (m)	
TK _{A1} , TK _{A2} , TK _O , TK _P , TK _{L1} , TK _{A4} , TK _{A5} , TK _{A6} , TK _{A7}	1.19	1.45	1.10	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad: 1500 L
TK _{A3}	1.06	1.30	0.96	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad: 1000 L
TK _{D1} - TK _{D2} - TK _{D3}	1.19	1.45	1.10	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Caudal de 300 ml/seg Material: Fibra de Vidrio Capacidad: 1500 L
TK _{TV1}	1.79	-----	-----	1.10	1.10	Una entrada y Tres salidas de 1 ½ pulg. Material: Polipropileno Capacidad: 1500 L
TK _{L2}	0.76	0.84	0.58	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad: 250 L
TK _{A8} - TK _{A9} - TK _{A10}	1.41	1.58	1.25	-----	-----	Entrada y Salida de 1 ½ Pulg Material: Polipropileno Capacidad: 2000 L

Ver Anexo P (Diagramas de los diferentes equipos y tanques)

4.7.2 Sistema de agitación y características de las bombas

En la siguiente tabla se presenta las características del sistema de agitación compuesto por un eje, motoreductor y un par de aspas que se utilizan en los tanques de precipitación de metales y oxidación de cianuros.

Tabla Nº 32. Especificaciones del sistema de agitación para las alternativas 1 y 3

SISTEMA DE AGITACION	DIMENSIONES				CARACTERISTICAS
	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Diámetro (m)	
Aspas	0.45	0.127	0.016	-----	Fibra de vidrio reforzado
Eje	0.60	-----	-----	0.0254	polipropileno
Motor	-----	-----	-----	-----	Motoreductor de velocidad variable mecánico 100-300 rpm Potencia 0.5 HP

El sistemas de bombeo esta constituido por electrobombas tipo caracol monofásica de flujo continuo.

Tabla Nº 33 Especificación de bombas para las alternativas 1 y 3

Variable	Característica
Caudal	130 Lit/min
Potencia	0.5 HP
Altura máxima	24 m
Altura de succión	5 m
Diámetro de succión	1 ¼ Pulg
Diámetro de descarga	1 ¼ Pulg
Motor	110-220 V

4.7.3 Sistema de evaporación ²⁷

El sistema de evaporación consta de un evaporador tipo caldera con un condensador de carcasa y tubo; trabajándolo con gases de combustión procedentes de las calderas que se utilizan en la sección de fundición en Fantaxias Ltda.

De manera alternativa se puede trabajar con gas natural domiciliario utilizando un quemador de 40000 BTU de energía.

Tabla N° 34. Características del evaporador

Variable	Característica
Volumen de agua a evaporar	2000 L
Volumen de Sales	10 % del líquido a tratar
Volumen de aguas a condensar	90 % del líquido a tratar
Capacidad por hora de evaporación	290 L
operación	Con gases de combustión
Sistema de control y seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel de agua • Válvula de seguridad • Presostato de seguridad • Tablero eléctrico de fuerza y control • Cámara de gases aislada en refractario
Dimensiones	Diámetro: 0.5 m Altura: 1,5 m
Tipo	Caldera

Tabla N° 35. Características del condensador

Variable	Característica
Capacidad por hora	290 L
Tipo	Carcaza y Tubo
Material	Acero al carbono, lámina estructural.
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro: 0,5 m • Longitud: 1,4 m
Líquido de enfriamiento	Agua almacenada que garantiza temperatura ambiente

4.7.4 Sistema de intercambio iónico.

El intercambiador iónico se basó en un estudio realizado anteriormente en un trabajo de grado ²³ el cual suministro la información experimental necesaria para diseñar una torre de intercambio iónico para tratar un volumen de efluentes de acuerdo a sus condiciones fisicoquímicas.

Bombeo de las aguas: Se seleccionó una bomba centrífuga para la impulsión del agua a tratar hacia el módulo de intercambio iónico, con un flujo de 1470 L/ hora (Características de la bomba en la tabla N° 33).

Módulo de intercambio iónico: El diseño de la columna esta basado en los resultados del ensayo final de carga con la mezcla de los metales de cobre, níquel y zinc. Dado que la resina amberlite IR-120 es más selectiva para el níquel, se tuvo como referencia la capacidad y el punto de ruptura obtenidos en los experimentos anteriores efectuados para este metal ²³ y así poder determinar su diseño. Las condiciones de operación obtenidas se presentan en la tabla N° 36.

Tabla N° 36. Condiciones de operación para la columna de Intercambio Iónico

Descripción	Valor
Concentración de Cu, Ni y Zn en el alimento (Kg/m ³)	0.07 - 0.1
Concentración máxima permisible de Ni según normatividad ambiental (mg/L)	2
Capacidad en Volumen de la Resina para Ni (mgNi/mL lecho)	18,23
Volumen a tratar por ciclo de operación (m ³)	12.72
Flujo de operación (m ³ /s)	0,00041
Capacidad de ruptura requerida (Kg)	2,8
* Volumen Empacado Efectivo Requerido(m ³)	0,07
*Volumen Total Empacado (m ³)	0,098
*Área Transversal de la Columna (m ²)	0.105
*Longitud del Lecho (m)	0.78
*Diámetro (m)	0.36
*Expansión del Lecho %	50
*Altura Total de la columna (m)	1.47

* Ver **Anexo Q (Diseño de la columna de intercambio iónico)**.

La columna tiene un tiempo de operación de 1.5 horas diarias tratando 2120 L de efluente. Se encontró que la resina amberlite IR-120 alcanza las condiciones máximas de saturación a un volumen de lecho de 36 BV, obteniéndose una concentración de 1.98 ppm de níquel que esta bajo los parámetros establecidos por la normatividad ambiental. La resina es inertizada después de la saturación, teniendo un consumo mensual de 1,41 m³.

El material de la columna que contiene la resina se recomienda en acero inoxidable o en poliglass con una presión máxima de 150 psi y una temperatura máxima de 85 ° C, debe tener difusores internos y cabezal.

Actualmente se esta realizando un trabajo de grado en el grupo de investigaciones en Minerales Biohidrometalúrgia y Ambiente GIMBA sobre la inertización de las resinas y los lodos generados en el proceso de oxidación de cianuros y precipitación de metales en el tratamiento de los efluentes líquidos de la empresa Fantaxias Ltda.

4.8 Análisis financiero

A continuación se presenta los resultados obtenidos en el cálculo de los costos de la inversión de la planta

Se realizaron diferentes cotizaciones principalmente en la ciudad de Bucaramanga y con proveedores de la empresa Fantaxias Ltda. En la tabla N° 34 se presentan estos valores.

Tabla N° 37. Costos de los equipos y accesorios

Equipos y accesorios	Alternativa 1		Alternativa 3	
	Costo unitario (pesos)	Costo total (pesos)	Costo unitario (pesos)	Costo total (pesos)
Bombas	260000	1560000	260000	1820000
Válvulas	45000	990000	45000	1260000
TK Cilín. 250 L	75000	75000	75000	75000
TK Cilín. 1000 L	-----	-----	210000	210000
TK Cilín. 1500 L	350000	2450000	350000	2800000
TK Cilín. 2000 L	-----	-----	427000	1281000
TK Cilín. 3000 L	880000	1760000	-----	-----
Trampas de Desengrase	350000	700000	350000	1050000
Intercambiador Iónico	-----	-----	2700000	2700000
Decantador cuadrado	3250300	6500000	3250000	3250000
Agitadores	700000	1400000	700000	1400000
Evaporador	18000000	1800000	18000000	1800000
Tuberías	32000	2560000	32000	3840000
Costo total		35995000		37686000

4.8.1 Costo de nómina necesaria para el funcionamiento de la planta y construcción.

En este costo solamente se tiene en cuenta el número de operarios necesarios para la operación de la planta, debido que los demás cargos en el área de gerencia, producción y mantenimiento, departamento administrativo ya se encuentran dentro de la nomina de Fantaxias Ltda. ²⁷

Tabla N° 38. Costo de nómina y mano de obra

Departamento	cargo	Alternativa 1			Alternativa 3		
		Cant.	Sueldo mes (pesos)	Sueldo anual (pesos)	Cant.	Sueldo mes (pesos)	Sueldo anual (pesos)
Producción y mantenimiento	operadores	1	600.000	7.200.000	2	1.200.000	14.400.000
Mano de obra	Supervisor	1	10000000		1	10000000	
	operario	2	5000000		2	5000000	

4.8.2 Costo de insumos

Son los reactivos necesarios para el tratamiento de las aguas residuales industriales de Fantaxias Ltda.

Tabla N° 39. Costos de insumos

Reactivo	Alternativa 1		Alternativa 3	
	Costo mensual (en pesos)	Costo anual (pesos)	Costo mensual (pesos)	Costo anual (pesos)
NaOH (Kg)	924000	11088000	840000	10080000
Cl ₂ (Kg)	400000	4800000	4000000	48000000
H ₃ PO ₄ (L)	40500	486000	40500	486000
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	60000	720000	27000	324000
Amberlite IR - 120	-----	-----	761400	9136800
Arena sílice 10-20	-----	-----	2000	24000
Total costo	5024500	60029400	5670900	68050800

4.8.3 Costo de servicios industriales

Tabla N° 40. Costos de servicios industriales

Servicios Industriales						
Componente	Unidad	\$/unidad	Unidad/año		\$/año	
			Alternativa 1	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 3
Agua de Lavado	m ³	585	18.25	21.2	10.676	12.402
Electricidad	Kw/h	207	14400	18000	2.980.800	3.726.000
Agua de Enfriamiento	m ³ /h	680	175	175	119.000	119.000
Total					3.110.476	3.857.402

La construcción de la planta de tratamiento de los efluentes líquidos de la empresa Fantaxias Ltda, requiere de una inversión inicial que contemple el costo de equipos y accesorios, mano de obra y materiales de construcción. El valor de inversión para la alternativa 1 y 3 es de \$ 50.995.000 y \$ 52.686.000 respectivamente.

Los gastos anuales para el tratamiento de las aguas en cuanto a costo de insumos y servicios industriales para la alternativa 1 y 3 son de \$ 70.339.876 y \$ 86.308.202 respectivamente.

Es importante resaltar que el tratamiento de estos efluentes permite la recirculación del 90% de las aguas tratadas, para los diferentes usos que la empresa crea conveniente de acuerdo a las características fisicoquímicas de las aguas depuradas consignadas en las tablas de los resultados experimentales; Lo más importante, es el valor a nivel ambiental que se esta generando con el tratamiento y los grandes beneficios sociales y económicos que trae para la empresa Fantaxias Ltda.

5. CONCLUSIONES

1. Se comprobó que el tratamiento de efluentes por precipitación química con hidróxido de sodio es muy útil para tratar las aguas industriales de la empresa de electrorecubrimientos Fantaxias Ltda, logrando remoción de metales como cobre, níquel y zinc hasta un 99%. Las razones son su sencillez, bajo costo y facilidad de implementación.
2. El uso de sulfato férrico como agente floculante es un complemento al proceso de precipitación química ya que además de presentar un elevado porcentaje de remoción de metales pesados, se obtiene excelentes resultados para la sedimentación de los precipitados. Por tanto, la técnica de precipitación asistida por floculantes es una alternativa descontaminante de fácil implementación para el sector de recubrimientos metálicos.
3. La técnica de oxidación de cianuros por clorinación alcalina fue efectiva dado que se eliminó el ión cianuro presente en las vertientes líquidas de la sección de recubrimientos metálicos, consiguiendo los niveles permisibles por la normatividad ambiental. Para una posible recuperación de estos efluentes es necesario disminuir la concentración de cloruros generados al oxidar el cianuro por medio de sistemas de evaporación que permite remociones hasta de un 99 %.
4. La técnica de precipitación química presenta resultados similares cuando se aplica a las diferentes alternativas de tratamiento indicando que la separación y mezclas de efluentes no cianurados no son un factor clave para evitar la remoción del metal.
5. La construcción de la planta de tratamiento de los efluentes líquidos de la empresa Fantaxias Ltda, requiere una inversión inicial para la alternativa uno y tres de \$ 50.995.000 y \$ 52.686.000 respectivamente y gastos anuales de \$ 70.339.876 y \$ 86.308.202 respectivamente.
6. El diseño indica que la alternativa más adecuada para su implementación es la numero uno debido a que cumple con todos los requerimientos ambientales y posee menor inversión inicial y costos de tratamiento.

6. BIBLIOGRAFIA

1. GUERRERO G, Andrés; ROMERO C, Manuel. Evaluación de la Carga Contaminante de las Vertientes Líquidas de la empresa Fantaxias Ltda: Universidad Industrial de Santander, 2006.
2. NODO DE PRODUCCION MÁS LIMPIA. Optimización de Procesos de Recubrimientos metálicos en pequeñas y medianas empresas dedicadas a esta actividad en el área metropolitana de Bucaramanga.
3. Plano suministrado por la Empresa de Fantaxias Ltda. de la sección de galvanía.
4. ALZATE, Adriana. Guía de producción más limpia para el sector de electrorecubrimientos electrolíticos en Colombia. Guía nacional de producción mas limpia. Universidad Pontificia Bolivariana. Grupo de estudios ambientales.
5. MANUAL PARA EL TRATAMIENTO DE VETIMIENTOS DE EMPRESAS DEL SECTOR DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS. Capítulos 4 y 5. Southwest Pollution Prevention Center. 1998.
6. GUIA AMBIENTAL PARA EL MANEJO DEL CIANURO.
7. Copyright ATL Tecnología, S.A. de C.V. 1998-2001. ACS Medio Ambiente. Marca registrada de ATL Tecnología, S.A. de C.V.
8. PAHECO CABRERA Pilar, VERA BLANCO. USO DE MATRIZ PONDERAL PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES CIANURADOS DE PLANTAS GALVÁNICAS. Instituto de Geofísica y Astronomía, calle 212 No.2906 entre 29 y 31, CP 11600, La Habana Cuba, e-mail: ppacheco@iga.cu, Centro de Investigaciones y Proyectos para la Industria Minero Metalúrgica, Carretera Varona No.12028, Boyeros, La Habana Cuba, e-mail avera@cipimm.minbas.cu/. www.iga.cu/
9. GUIA NACIONALES DE CALIDAD DE AGUA AMBIENTE CORRESPONDIENTES A CIANUROS. SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS DE LA NACION. DICIEMBRE 2003.
10. E.J. ORMAZABAL. Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones, Recubrimientos Electrolíticos. España 2002.
11. GAVIRIA C. Ana C, MEZA S. Luis A. PLANTA DE BENEFICIO DE LA EMPRESA MINEROS NACIONALES, MUNICIPIO DE MARMATO, CALDAS. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Revista de la facultad de Minas (DYNA). Publicado 7 de mayo 2006. www.dyna.unalmed.edu.co/
- 12 COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. CETESB. "Tratamiento de residuos líquidos de pequeñas industrias de galvanoplastia". SAO PAULO. BRASIL. 1985.

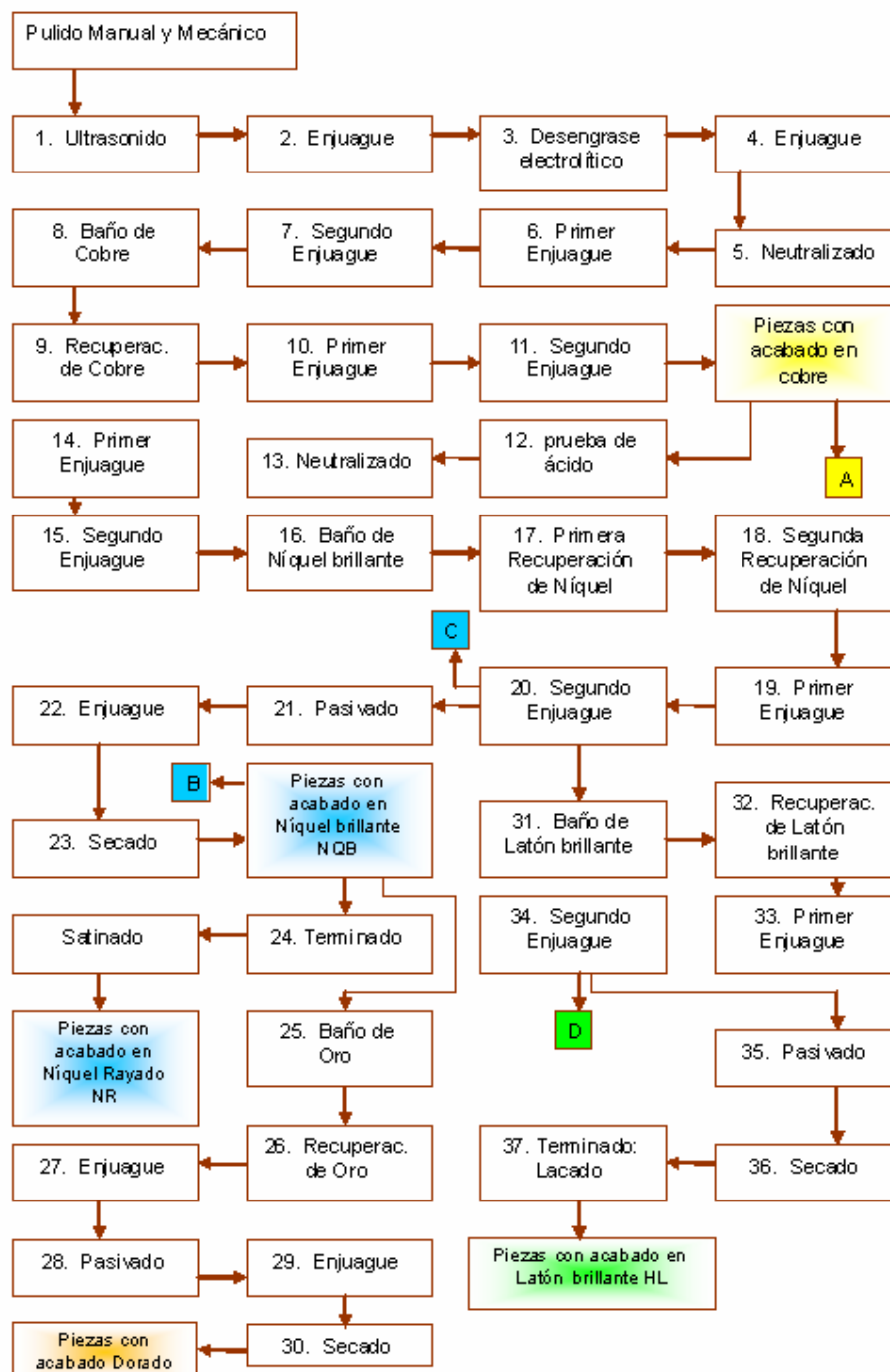
- 13.** P&ID DEL TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE CIANURO (CN⁻) DE AGUAS RESIDUALES. www.cipres.cec.uchile.cl/
- 14.** Leandro Herrera Z., Ph. D. INSTRUMENTACION DE PROCESOS INDUSTRIALES.
- 15.** ASCURI, V. Principios de Hidrometalurgia y algunas aplicaciones fundamentales. PERU. GOL S. LTDA. 1984. P 73-85.
- 16.** ECKENFELDER, W Wesley. Industrial Water Pollution Control. Tercera Edición. Mc Graw Hill. Estados Unidos de América. 2000.
- 17.** AFRICANO CASTILLO Liliana Carolina, PINZÓN DÍAZ Rocío del pilar Ing. Química UIS. TRATAMIENTO DESCONTAMINANTE DE LOS AFLUENTES GENERADOS EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE ORO CON ÁCIDO NÍTRICO. Bucaramanga 2004.
- 18.** ARBOLEDA, Jorge. Teoría y práctica de purificación de aguas, tomo I. Santa Fe de Bogotá. Mc Graw Hill. 2000. P 51-57.
- 19.** ROMERO, J. Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. P 139-341.
- 20.** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards. Water and Environmental Technology Vol. 11.01.2000.
- 21.** APHA, AWWA, AWOAOC STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. Washington. 19 Ed 1995.
- 22.** DOMIC, Esteban. Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y Aplicaciones.
- 23.** GAMBOA G, Maritza; QUIROGA E, Lenny. Desarrollo de una técnica de precipitación para reducir el contenido de Cobre, Níquel y Zinc presentes en las aguas industriales de la empresa de electrorecubrimientos Fantaxias Ltda. Universidad Industrial de Santander. 2006
- 24.** TECNOLOGIAS MEDIOAMBIENTALES EN EL SECTOR DE RECUBRIMIENTOS METALICOS. INFORME DE VIGILANCIA TECNOLOGICA SECTORIAL PARA LA ASOCIACION "ASOREME". 2003.
- 25.** DEPLAN, S.L. Empresa de Servicios, Ingeniería, Consultoría y Formación del Medio Ambiente. www.interempresas.net
- 26.** TOMAS C, Kinnear; JAMES R, Taylor. Investigación de Mercados. Quinta Edición. Mc Graw Hill. 2001
- 27.** PETERS, Max S; TIMMERHAUS, Klaus D. Diseño de Plantas y su Evaluación Económica Para Ingenieros Químicos. Editorial Géminis S. R. L. Buenos Aires-Argentina. 1978

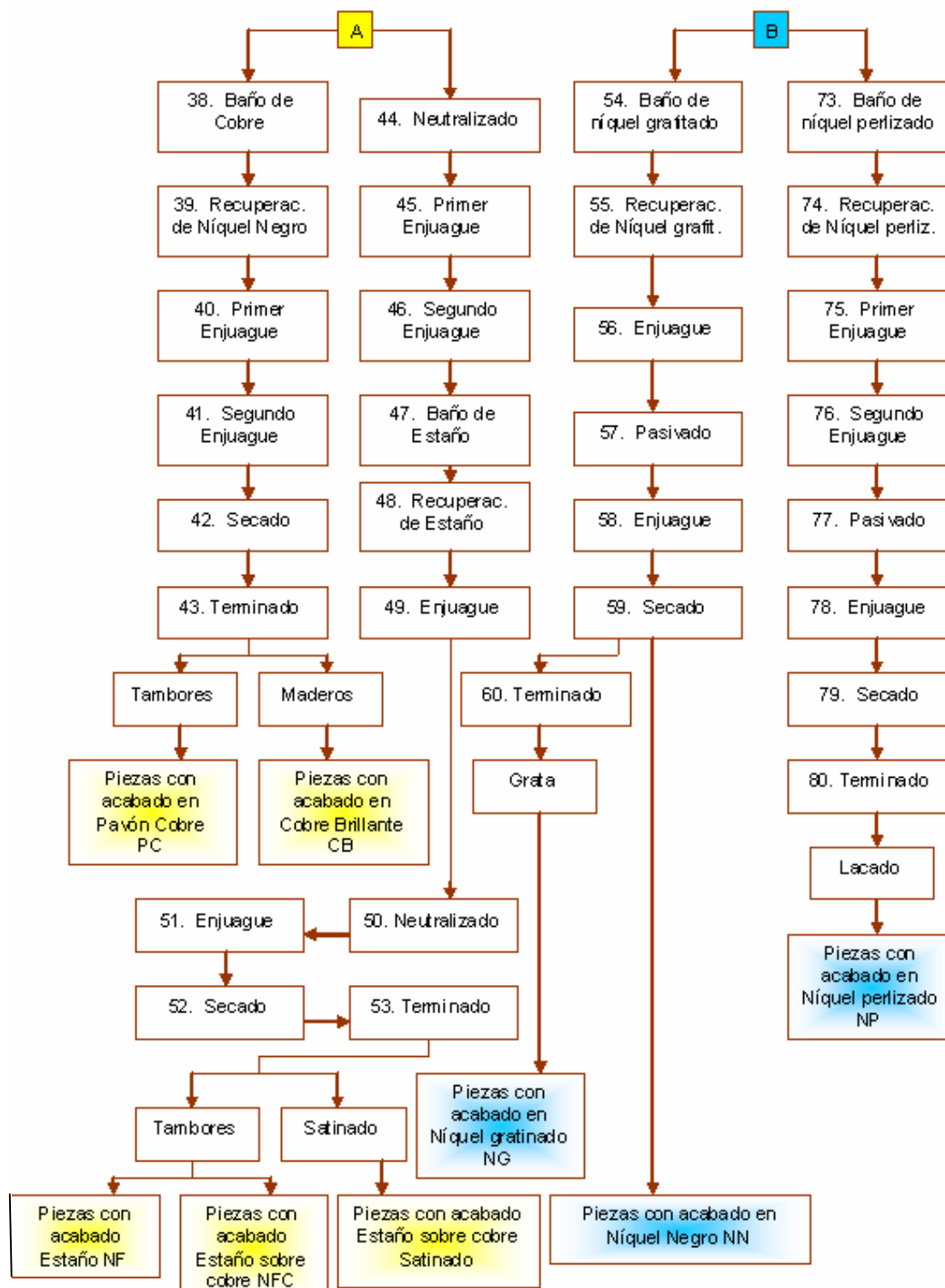
ANEXOS

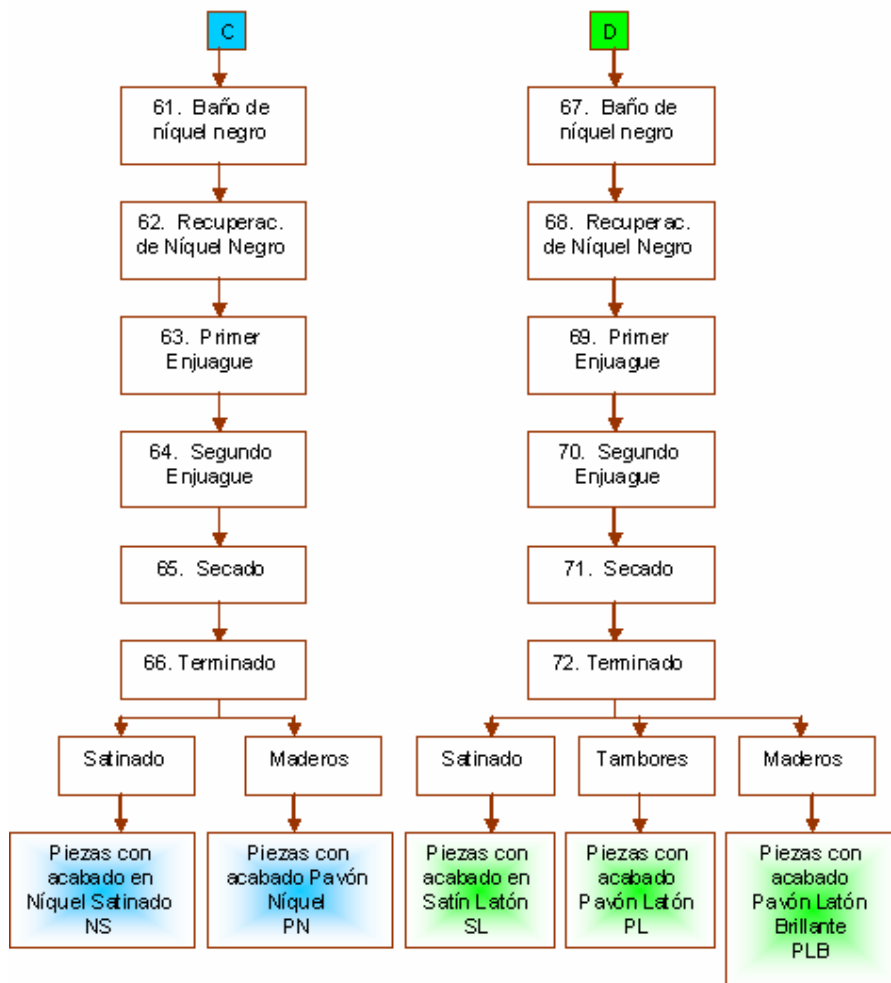
ANEXO A. Tecnologías alternas para la remoción de cianuros.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Acidificación	Se obtiene un elevado grado de remoción, en cuanto a los cianuros simples y complejos; y a la automatización, ya que la instalación para llevar a cabo este método debe ser totalmente automatizada, para evitar riesgos de accidentes fatales.	Costo de inversión y explotación elevadas. Es imposible recircular, ya que el tratamiento no elimina las sustancias tóxicas como son los metales pesados.
Cloración	Fácil manipuleo y control del dosaje, la segunda etapa no es necesario si los desechos no entran en contacto con otros que contienen cromo.	La reacción es exotérmica a altas concentraciones de Cianuros mayores a 10 g/L pueden producir combinaciones gaseosas tóxicas.
Ozonización	Oxidación de cianuros a dióxido de carbono y nitrógeno. Adicionalmente, el ozono oxida fenoles y cromóforos, y los transforma en productos no tóxicos e incoloros	Por su inestabilidad, el ozono se debe generar in situ. Dificultad en el manipuleo y control del dosaje.
Intercambio iónico	Es un método que permite recircular totalmente el agua	Los costos de inversión y los reactivos a utilizar son caros y estos reactivos no se producen en el país.
Método por vía electrolítica	Oxidación de cianuros a cianatos, el método es eficiente, reduce concentraciones de cianuros amenos de 1 ppm. No requiere el uso de reactivos químicos.	Costo del tratamiento alto. Es aplicable a volúmenes de agua residual, menores de 100 litros.
Peróxido de hidrógeno	Oxidación de cianuros a cianatos, Precipitación de metales pesados en forma de óxidos e hidróxidos	Los cianuros se oxidan parcialmente a cianatos
Sulfato ferroso	Bajo costo de operación, la solución de sulfato ferroso proviene del baño agotado del decapado. Fácil manipuleo y control de dosaje.	Efluente coloreado de azul. El ferrocianuro se descompone a cianuro libre en presencia de la luz solar.

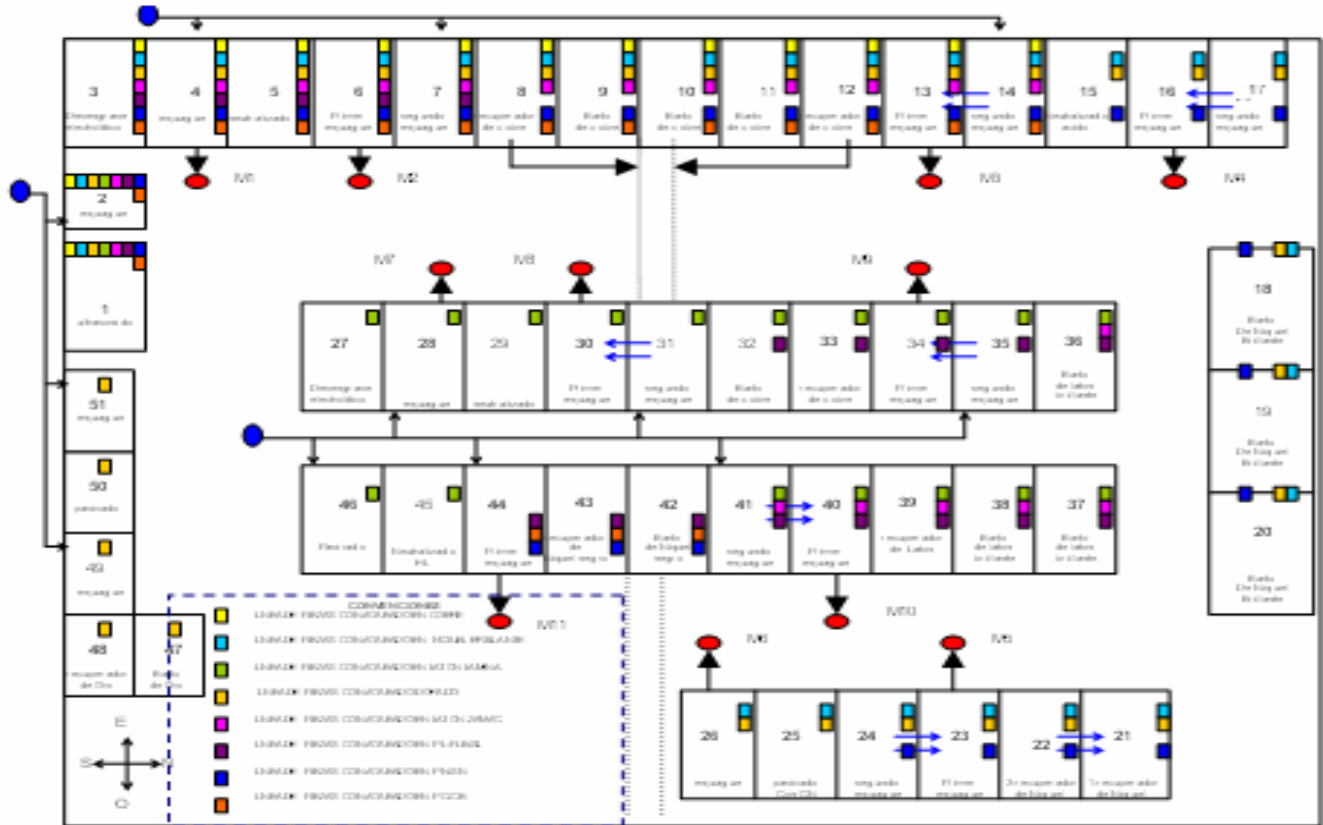
ANEXO B. Diagrama del proceso para la obtención de los recubrimientos electrolíticos



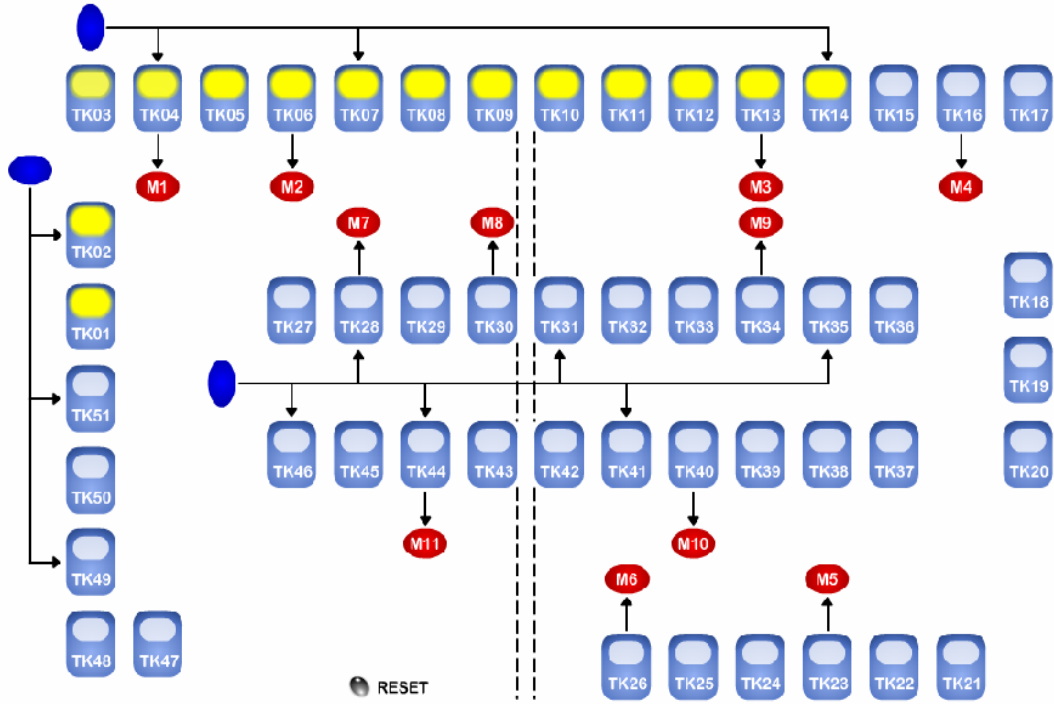




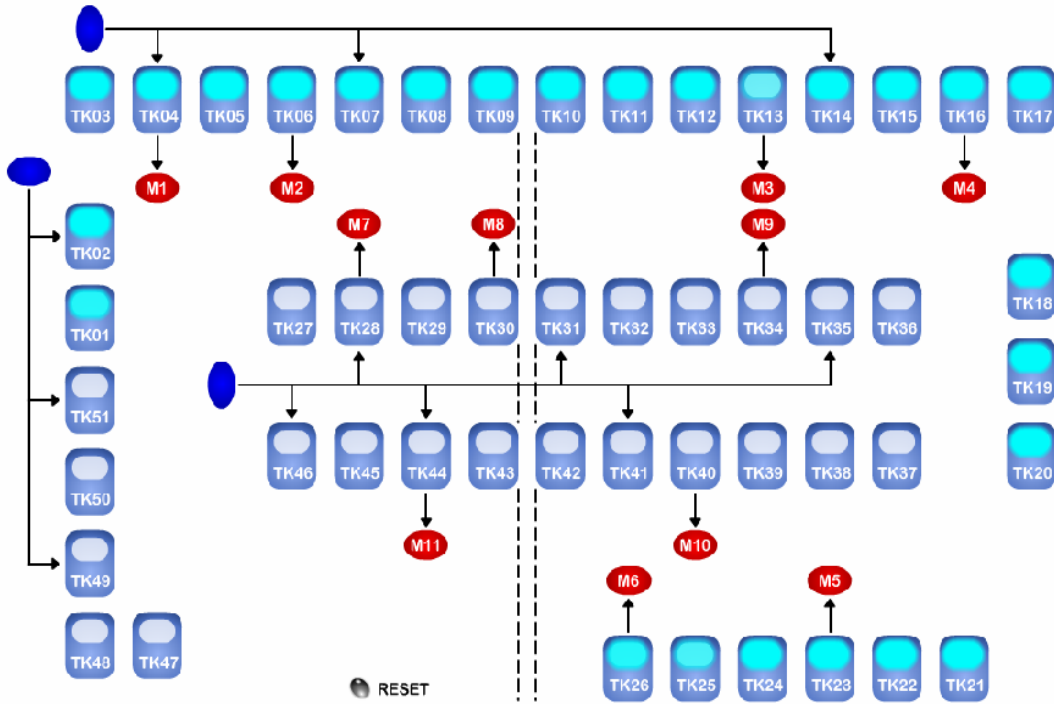
ANEXO C. Plano actual de la sección de galvanica con sus respectivos puntos de muestreo



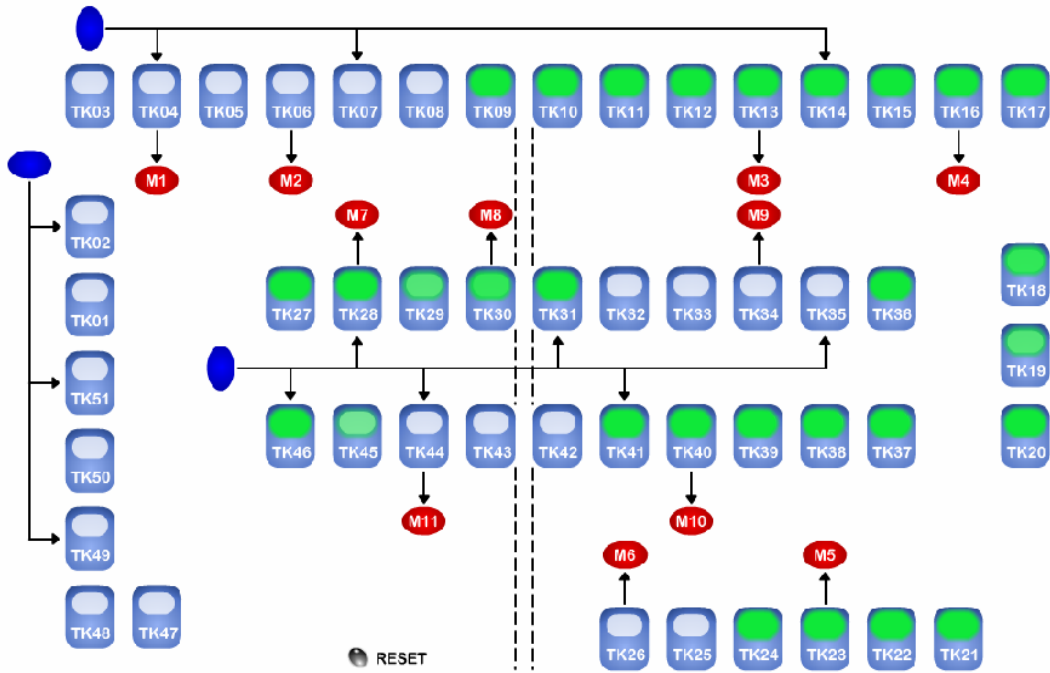
Proceso de cobrizado



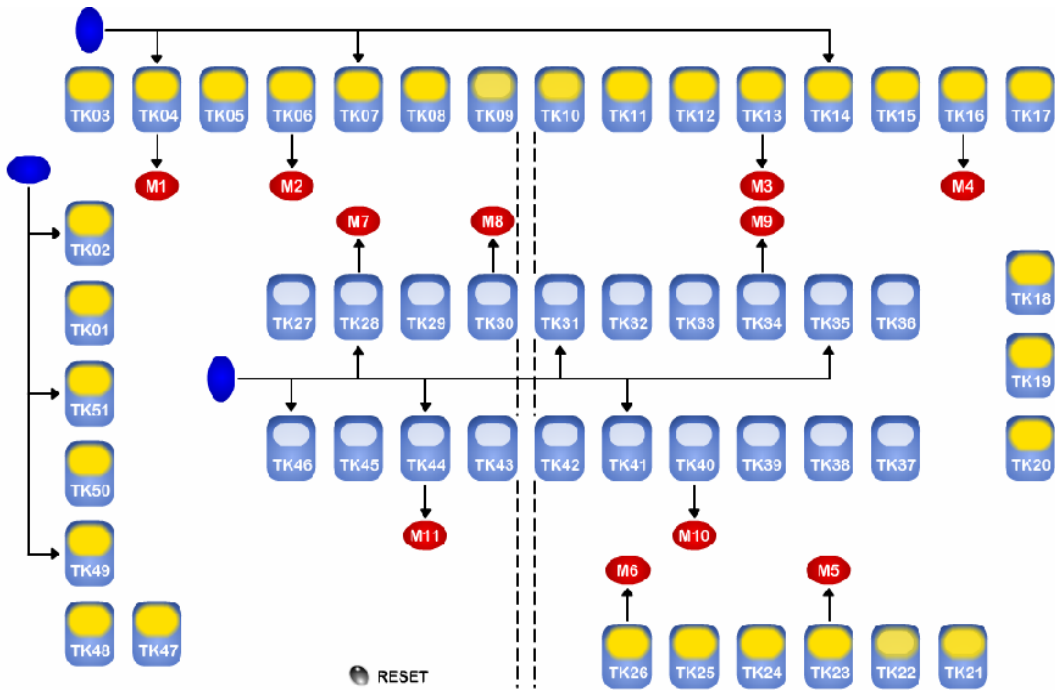
Proceso de niquelado brillante



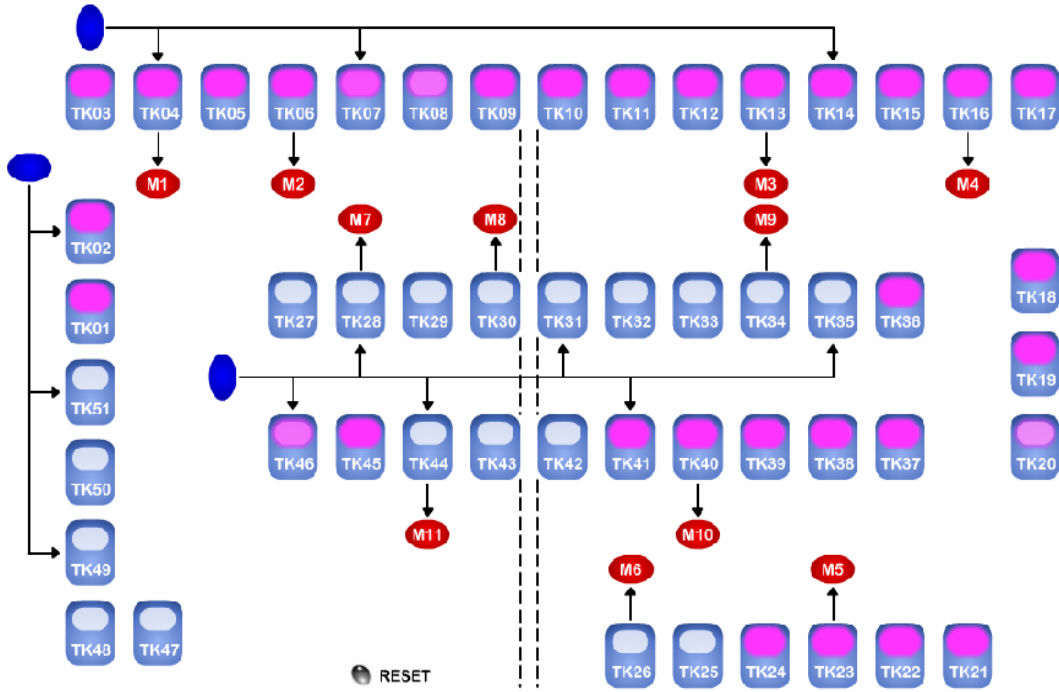
Proceso de latonado lámina



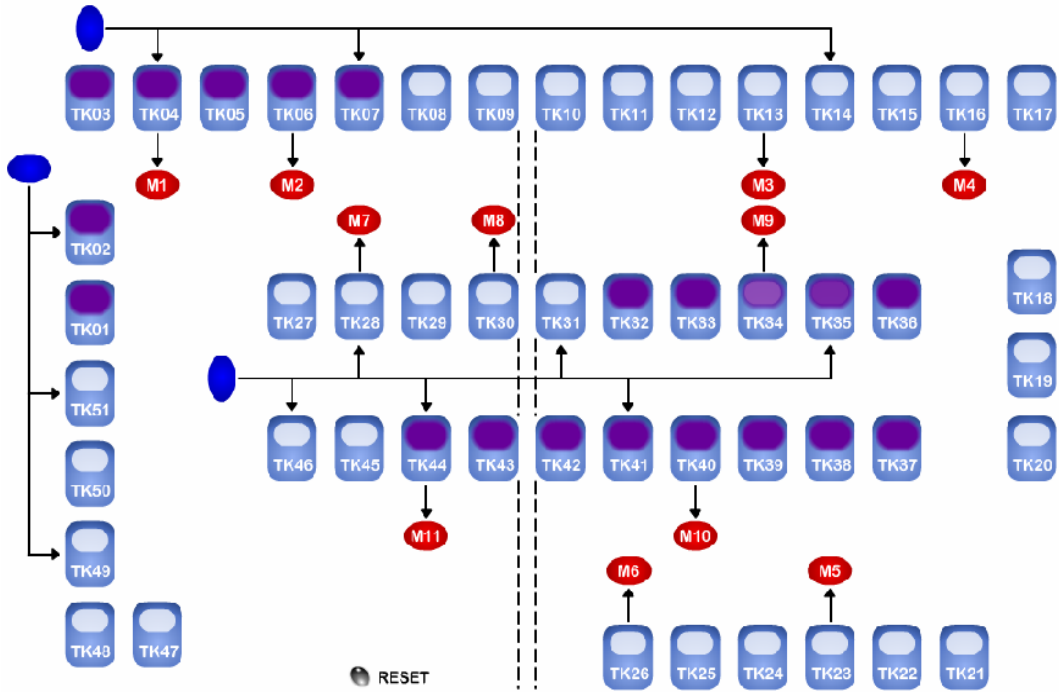
Proceso de dorado



Proceso de latonado Zamac



Proceso de pavón-latón, pavón-latón brillante, satín-latón



ANEXO D. Toma de muestras y parámetros para la determinación de variables fisicoquímicas

Los aspectos básicos que se deben cumplir dentro de un programa de muestreo son:

- a) Asegurar que la muestra que se tome sea representativa del agua residual o corriente muestreada.
- b) Utilizar técnicas de muestreo apropiadas.
- c) Preservar las muestras adecuadamente antes de ser analizadas.
- d) Analizar correctamente los resultados obtenidos.

Tipos de Muestras

Los tipos más comunes de muestras son las instantáneas y las compuestas pudiendo ser obtenidas ambas de una manera manual o automática.

Muestras Instantáneas: Una muestra instantánea representan las condiciones de una corriente o agua residual en el momento de ser tomada. Este tipo de muestra se aconseja cuando:

- a) Las descargas de agua residuales son intermitentes.
- b) Las características de los desechos son constantes. En ciertos casos las descargas de aguas residuales son muy constantes con el tiempo.
- c) Cuando un agua residual presenta variaciones extremas en su composición una muestra instantánea es necesaria.

Muestra Compuesta: Cuando la composición de un desecho presenta cierta variabilidad, el uso de muestras compuestas es aconsejado. Una muestra compuesta consta de muestras pequeñas individuales que se toman ya sea proporcional al tiempo o al flujo y son mezcladas para formar una muestra total que es la que se somete a un análisis posterior.

1) Plan de muestreo: Doce puntos de muestreo escogidos por estudios anteriores en los sitios más representativos de los enjuagues según su nivel de contaminación local y global ¹, teniendo en cuenta semanas de máxima operatividad y a la vez cantidad de efluentes.

2) Volumen de muestra: Se tomaron volúmenes de 1000 ml de muestra instantánea en frascos de vidrio color ámbar.

3) Rotulado y cuidado de la muestra: Identificación de cada muestra con rótulos, sellamiento, registro en el libro de campo, almacenamiento y preservación de la muestra: Clase de recipiente, método de preservación, tiempos máximos permitidos para almacenamiento ^{20,21}.

Parámetros medidos en la caracterización fisicoquímica de los efluentes de Fantaxias Ltda.

Tabla No 1. Parámetros de evaluación para la caracterización fisicoquímica de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

CODIGO	PARAMETRO Y/O VARIABLE	TIPO DE PARAMETRO	
		FISICO	QUIMICO
T	Temperatura (°C)	X	
CT	Conductividad (.m S/cm)	X	
TB	Turbidez (NTU)	X	
ST	Sólidos Totales (ppm)	X	
p H	p H.		X
CN	Cianuro (ppm)		X
Cu	Cobre (ppm)		X
Ni	Níquel (ppm)		X
Zn	Zinc (ppm)		X
GA	Grasa y Aceites (ppm)		X

Tabla No 1. Especificaciones para la determinación de las variables seleccionadas en la caracterización fisicoquímica de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

VARIABLES	UNIDADES	TECNICA	EQUIPO *
pH	Unidades de pH	ASTM D 1293-01	p H meter Toledo MP 120 Metter Toledo
Temperatura	°C	ASTM E1-58	Termómetro.
Conductividad	mS/cm	ASTM D 1125-82	Conductómetro 712 Metrohm
Turbidez	NTU	ASTM D 1889-00	Turbidimeter DRT-15 CE
Sólidos Totales	ppm	ASTM 2540	Filtro de Membrana de 0.45 um. Balanza Metter Toledo AB204 Y AE240.
Cianuros	.ppm	Destilación	Sistema de Destilación. Titulador Automático Titrino 7516 PA Metrohm
Metales	.ppm	ASTM Standards Vol 11-01.1986	Espectrofotómetro de Absorción Atómica ELMER PERKIN.
Grasas y Aceites	.ppm	Gravimetrico.**	-----

* Análisis de las muestras se realizaron en los laboratorios del Grupo de Investigación en Minerales Biohidrometalurgia y ambiente (GIMBA) de la Universidad Industrial de Santander.

** Para la determinación de Grasas y Aceites (ppm) se acudió al Centro de Investigaciones ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander.

ANEXO E. Evaluación del índice de carga contaminante de las vertientes líquidas de la empresa Fantaxias Ltda.

ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE

A continuación se presenta la ecuación que define el modelo matemático del Índice de Carga Contaminante (ICC.), elaborado por los ingenieros ANDRÉS JAVIER GUERRERO GÓMEZ y LUDWINK MANUEL ROMERO CABEZAS:

$$I.C.C. = \sum_{i=1}^n w_i * Q_{ij}$$

Donde:

Q_{ij} = Calidad promedio del parámetro (0-100).

w_i = peso asignado a cada grupo.

n = número total de grupos.

j = Grupo de importancia.

Para cada una de las variables de estudio, se tuvo en cuenta la escala de calificación estándar, a partir de esta se genera una tabla de calificación con las diferentes variables de estudio, dando un rango de calificación de 0 a 100, y partiendo de tres puntos que son, el valor de emisión ideal que sería el 100% de calidad, el valor normal tomado del máximo permisible que sería el 50%, y el valor de la variable cuando excede 50 veces el máximo permisible que daría un porcentaje de calidad del 0%.

- Impropio: 2 veces por encima de la norma.
- Desagradable: 5 veces por encima de la norma.
- Malo: 10 veces por encima de la norma.
- Muy Malo: 20 veces por encima de la norma.
- Pésimo: 50 veces por encima de la norma.

Partiendo de la definición de asignarle un valor del 100% a la emisión 0, 50% a una emisión igual al máximo permitido por la norma y de 0% a una emisión mayor o igual a

50 veces por encima de la norma se asignó una escala de valores cualitativos para calificar los parámetros estudiados. En la tabla No.11, se especifican dichas asignaciones.

Tabla No 1. Descriptores de calidad para los ICC utilizados en la escala estándar.

VALORACIÓN	CALIDAD
0	Pésimo
10	Muy Malo
20	Malo
30	Desagradable
40	Impropio
50	Normal
60	Aceptable
70	Agradable
80	Bueno
90	Muy Bueno
100	Excelente

Tabla No 2. Grupos de importancia y sus respectivos pesos de incidencia ambiental.

GRUPO DE IMPORTANCIA (GDI)	Variable que Influye	Peso de Incidencia Ambiental (w)
I	p H	0.1
II	Conductividad (.m S/cm)	0.05
III	Turbidez (NTU)	0.05
IV	Sólidos Totales (ppm)	0.05
V	Grasas y Aceites (ppm)	0.05
VI	Cianuro (ppm)	0.2
VII	Cobre (ppm)	0.2
VIII	Níquel (ppm)	0.15
IX	Zinc (ppm)	0.1
X	Temperatura (°C)	0.05

Tabla No 3. Ecuaciones para los rangos de calificación estándar de cada variable.

VARIABLE	ECUACION RANGO SUPERIOR (Concentración).	ECUACION RANGO INFERIOR (Concentración).
p H (p H)	$Q=0,19 \cdot X^3 - 4,9 \cdot X^2 + 22,2 \cdot X - 122,7$	$Q= -10.685(p H) + 148.77$
Cianuro (CN)	$Q= -12.861 \cdot \ln(CN) + 49.677$	$Q= -47.505(CN) + 97.96$
Temperatura (T)	$Q= 85.336 \cdot \ln(T) - 263.72$	$Q= 3.333 \cdot T - 83.333$
Conductividad (CT)	$Q= -12.861 \cdot \ln(CT) + 85.335$	$Q= -3.4861(CT) + 104.34$
Turbidez (TB)	$Q= -12.861 \ln (TB) + 70.376$	$Q= -10(TB) + 100$
Sólidos Totales (ST)	$Q= -104.63 \cdot \ln(ST) + 770.77$	$Q= -0.05(ST) + 100$

Cobre (Cu)	$Q = -12.861 \cdot \ln(\text{Cu}) + 63.806$	$Q = -16.04 \cdot (\text{Cu}) + 97.99$
Zinc (Zn)	$Q = -12.861 \cdot \ln(\text{Zn}) + 79.29$	$Q = -5 \cdot (\text{Zn}) + 100$
Níquel (Ni)	$Q = -12.861 \cdot \ln(\text{Ni}) + 58.592$	$Q = -25 \cdot (\text{Ni}) + 100$
Grasas y Aceites (G.A)	$Q = -12.861 \cdot \ln(\text{G.A}) + 88.204$	$Q = -2.5 \cdot (\text{G.A}) + 100$

Utilizando el software (Macro, Visual Basic) diseñado por los ingenieros ANDRÉS JAVIER GUERRERO GÓMEZ y LUDWINK MANUEL ROMERO CABEZAS, que calcula el Índice de Carga Contaminante de cada uno de los vertimientos de la empresa así como el conglomerado global teniendo en cuenta la linealidad que presentaron los metales con la concentración e ingresando el valor de la masa de carga promedio efectuada para un periodo de tiempo. Se presentan los valores para un promedio de masa de carga de 20 kg la cual fue el promedio de carga en el tiempo en el que fue llevado a cabo el monitoreo.

Tabla No 4. Índice de carga contaminante para los efluentes líquidos muestreados en la empresa Fantaxias Ltda.

Muestra	ICC				Comentario
	Trab.1*	Calidad	Trab.2**	Calidad	
M1	58.65	Normal	49.60	Normal	A pesar que se mantiene en el rango de normal, nos damos cuenta que el ICC empeora debido al aumento de masa de carga.
M2	39.73	Desagradable	37.76	Desagradable	A pesar que se mantiene en el rango de desagradable, nos damos cuenta que el ICC empeora debido al aumento de masa de carga.
M3	29.67	Malo	30.82	Malo	Aunque se introdujeron dos recuperadores de cobre se observa que el cambio de ICC mejoro pero no es significativo. Esto puede ser debido a que aumento la masa de carga
M4	47.2	Impropio	28.04	Malo	Existe un cambio significativo en el ICC debido al aumento de masa de carga y los posibles cambios en el tanque de neutralizado
M5	52.08	Normal	51.83	Normal	Aunque se introdujeron dos recuperadores de cobre se observa que el cambio de ICC mejoro pero no es significativo. Esto puede ser debido a que aumento la masa de carga y los recuperadores no cumplen con su función esperada.
M6	54.89	Normal	54.29	Normal	Aunque la concentración de CN disminuyo y la concentración de metales estuvo en el mismo rango de valores el ICC se mantuvo, pero hay que tener en cuenta que la masa de carga aumento.

M7	45.80	Impropio	29.73	Malo	Existe un cambio significativo en el ICC debido al aumento de masa de carga: El peso de incidencia ambiental no es muy grande en lo sólidos totales, sin embargo se encontró una gran concentración de estos que influye el ICC. En realidad no debería existir un aumento en las concentraciones de los metales ya que en este punto de muestreo no influye ningún baño.
M8	38.84	Desagradable	25.89	Malo	Debido al aumento de la masa de carga el ICC empeoro y también teniendo en cuenta que en este punto la concentración de Zinc y de Níquel fue mayor que la del trabajo anterior.
M9	16.20	Muy malo	20.59	Malo	En este punto se observa que las concentraciones de todas las propiedades a excepción de los sólidos totales bajaron considerablemente. Por esta razón el ICC mejoro pero no se ve reflejado en gran magnitud debido a la masa de carga. Era de esperarse ya que en esta línea se incluyo un recuperador de cobre.
M10	19.28	Muy Malo	10.74	Muy Malo	Este punto de muestreo tuvo un gran aumento en las concentraciones de todas sus variables, debido a la implementación de un baño nuevo de Níquel Brillante aunque también se implemento un recuperador de latón este no reflejo los resultados esperados en el ICC. El ICC no se mantuvo pero hay que recordar que la masa de carga no es la misma.
M11	35.83	Desagradable	37.99	Desagradable	En este punto se ve la mejora en el ICC, debido a que disminuyeron algunas de las variables que influyen en éste. El recuperador de Níquel negro esta dando resultados a pesar del aumento de masa de carga
M12	23.36	Malo	28.06	Malo	A pesar que existe un aumento en la concentración de CN y la masa de carga, también hay una disminución en la concentración de cobre y Níquel, por estas razones el ICC mejoro.

***Trab. 1** Realizado por los Ingenieros Químicos ANDRÉS JAVIER GUERRERO GÓMEZ y LUDWINK MANUEL ROMERO CABEZAS con una masa de carga promedio de **16Kg**

****Trab. 2** Realizado por los Ingenieros Químicos EDUIN BALLESTEROS CARRILLO Y RUBEN DARIO MARTINEZ MONSALVE con una masa de carga promedio de **20Kg**

ANEXO F. Recomendaciones de técnicas de producción más limpia (PML).

Nº	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
1	Sustitución de algunos reactivos químicos. En muchos casos se están utilizando reactivos químicos altamente contaminantes en los procesos de preparación de la pieza o en los baños de proceso. No obstante, existen alternativas a estas materias, empleadas ya con buenos resultados, basadas en productos químicos que no atacan al medio ambiente de la manera que lo hacen los que hasta ahora han sido tradicionales y que, al mismo tiempo, realizan la misma función o proporcionan los mismos resultados que éstos.	Usar químicos no cianurados	<ul style="list-style-type: none"> - Simplifica el tratamiento de aguas residuales. - Ahorra costos de químicos en tratamientos. - Reduce la generación de lodos. 	ALZATE, Adriana. Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia. Centro nacional de producción mas limpia. Grupo de Estudios Ambientales. Centro de actividad regional para la producción limpia (CAR/PL), plan de acción para el Mediterráneo.
		Eliminar la grasa superficial	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora y optimiza el tiempo de vida los desengrasantes. - Evita que al retirarse la pieza del baño ésta quede impregnada de aceite, contaminando los baños posteriores y causando problemas en la calidad del recubrimiento. 	

Nº	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
1	Sustitución de algunos reactivos químicos.	Utilizar productos químicos de alta pureza***	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce la contaminación en el baño de recubrimiento y disminuye el mantenimiento. - El reproceso de las piezas - La contaminación de aguas residuales y - La generación de lodos. 	Diagnóstico de los planes de producción limpia en el sector de galvanoplastia en Argentina. Fundación Tekniker. IHOBE, S.A. Producción más limpia en una empresa de tratamiento de superficies. Zincats Industrials Canovelles, S.L. (España) Informe de vigilancia tecnológica sectorial para la asociación ASOREME. Tecnologías Medioambientales para el Sector de Recubrimientos Metálicos. Madrid, 2003
		Cubrir y remover los ánodos.	<ul style="list-style-type: none"> - Para que los ánodos no se disuelvan y no aumente la concentración de metal en los baños. 	
		Evitar el uso de productos grasos en el pulido.	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la limpieza posterior. - Simplifica el tiempo en el baño de desengrase. - Mejora la calidad del producto final. - Reduce el costo por mano de obra. 	

*** Involucra incremento en costos

N°	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
2	Reducción de arrastres.			
	El arrastre es la cantidad de líquido que se extrae involuntariamente de una cuba con la operación de extracción de las piezas entre dos etapas de proceso galvanico cualquiera. Se trata de la fuente más significativa de pérdida de materias primas procedentes de los baños de proceso y de contaminación de las aguas de lavado. El conocimiento de los condicionantes que contribuyen al arrastre es clave si se desea reducirlo.	Reducir la concentración en los baños	- Para promover un drenaje mas rápido de las soluciones adheridas a la pieza - Disminuir el volumen de arrastre.	ZANDUETA, Maria Eugenia. Ingeniera Ambiental Recopilación de Experiencias de Buenas Prácticas de Gestión Ambiental y Producción Limpia en Micro, Pequeña y Medianas Empresas. Proyecto Competitividad y Medio Ambiente. Buenos Aires, Argentina. 2004
	Los factores principales que conllevan al arrastre son los siguientes: - tamaño y forma de las piezas - viscosidad y concentración química del baño - tensión superficial del baño - temperatura del baño y - forma de trabajar *** involucra incremento en costos energéticos	Aumentar la temperatura en los baños***	- Para reducir la viscosidad de los baños del proceso. esto permite que la solución drene a mayor rata desde la pieza. - Se reduce el volumen de perdidas por arrastre	
	Usar agentes humectantes y/o esferas de polipropileno	- Para reducir la tensión superficial y el volumen de perdidas por evaporación.	Minimización de residuos en un proceso de niquelado químico. Electroless Hoard Coat, S.A. (España).	

N°	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
2	Reducción de arrastres.	Optimizar la forma y tiempo de introducción y retirada de las piezas.	- Se estima que en un escurrido mínimo de dos minutos, se recupera el 80% de los arrastres del baño. - El tiempo de inmersión de las piezas en el baño debe ser corto para aumentar la vida de los baños. - La introducción de las piezas debe efectuarse con la mayor rapidez posible para evitar la formación de matas, residuos que deben tratarse. - Su extracción debe realizarse lo más lentamente posible, entre más rápido se saca la pieza, mayor es el grosor de la película de líquido.	Opciones de gestión ambiental en el sector de galvanoplastia. Proyecto Generación de Capacidades Nacionales en Tecnologías Aplicables a Residuos Industriales Líquidos. Proyecto FDI CORFO. Chile, año 1995. Producción más limpia en un establecimiento del sector de baños galvanicos mediante la adopción de buenas prácticas y cambios en el proceso. Industrias F. Sandoval, S.L. (España).

N°	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
2	Reducción de arrastres.	Evitar la producción de derrames Ver figura 1	- Colocar rejillas colectoras alrededor de las cubas de tratamiento, para capturar los productos químicos que gotean de las piezas y las aguas que se derraman por accidentes, conduciéndolas a la depuradora.	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Dirección General de Proyectos Ambientales Subdirección de Residuos Peligrosos Plaza de la Constitución No. 1, 3er. Piso Col. Centro C.P. 06000 México D.F. Tel.: 521 81 60 y 542 24 83
		Incluir puentes de polipropileno (tapajuntas). Ver figura 2	- Para capturar los productos químicos que gotean de la pieza cuando esta es movida del baño de proceso hacia el enjuague.	
3	Control de flujo La instalación de diferentes tipos de controladores de flujo permite que la empresa conozca con exactitud el consumo de agua dentro de ella.	Instalar restrictotes de flujo	- Para limitar el volumen de agua de enjuague que fluye a través del sistema.	
		Utilizar controladores de pH y Conductividad.	- Para medir el nivel de sólidos disueltos o iones hidrogeno y - Control de agua fresca	

N°	Recomendación	Descripción	Justificaciones	Referencias
3	Control de flujo	Instalar medidores de flujo de agua	- Para conocer el consumo de agua en la planta y tomar las acciones correctivas necesarias.	SALAZAR, Rubén Darío. Gerente FUNDES. Guía de Buenas Practicas Para el Sector de Galvanotecnia. Colombia, 1998.
4	Mejoramiento en la eficiencia del enjuague. Si se evalúa de manera permanente la calidad de los enjuagues y el consumo de agua, podemos definir y ajustar en detalle el tiempo, la temperatura y la concentración del enjuague para así mejorar su eficiencia y tiempo de vida	Realizar enjuagues por aspersión	- Disminuye entre un octavo y un cuarto el volumen de agua de enjuague por inmersión.	
		Mantener la temperatura entre 24 y 29 °C	- La calidad del enjuague mejora al aumentar la temperatura del agua ya que las capas residuales del limpiador y los jabones se disuelven más fácilmente.	
5	Eliminación de grasas y aceites. Al eliminar grasas y aceites se facilita de manera significativa la depuración de las aguas y la implementación de sistemas de lavado estanco permite la recuperación de reactivos químicos.	Instalar un lavado estanco entre el desengrase y el enjuague y la implementación de un lavado en cascada.	- Permite recuperar las pérdidas por evaporación cuando los desengrases trabajan a más de 40.°C. - Reduce la contaminación de los baños siguientes.	

Las recomendaciones anteriores son de vital importancia ya que significaría una reducción de la contaminación, por ende evitaría un aumento de los costos en el tratamiento de los efluentes y junto con una estandarización del proceso se alcanzarán beneficios muy importantes para la empresa.



Fig. 1. Rejillas colectoras.

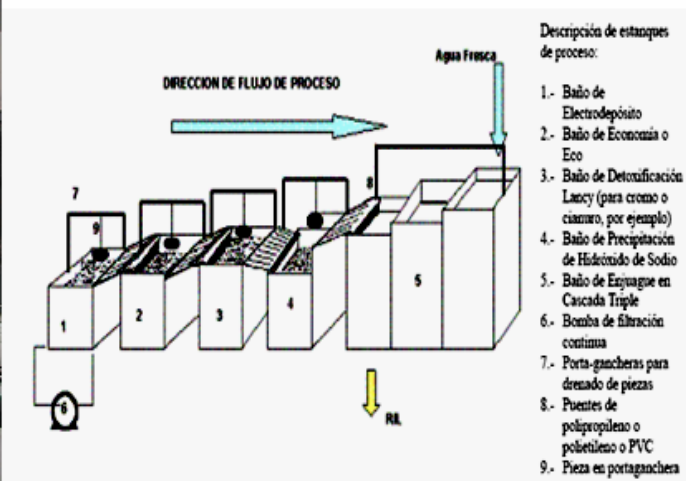


Fig. 2. Sistema de puentes de polipropileno.

ANEXO G. Fotos de las pruebas realizadas
Montaje para realizar la destilación de cianuros



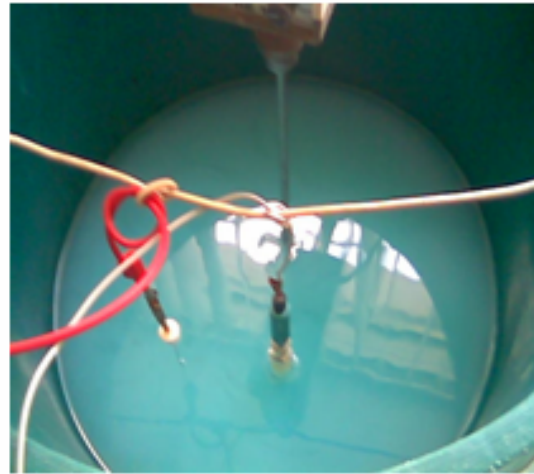
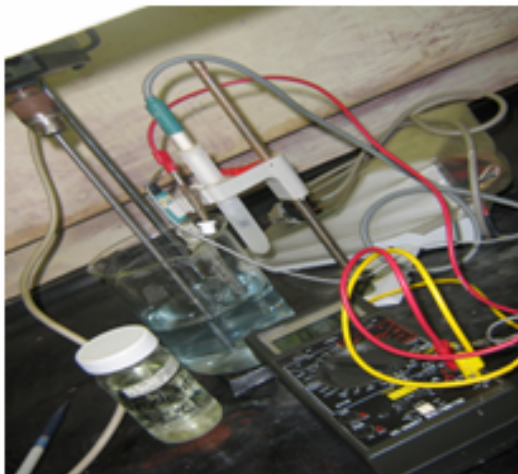
Titulación automática de cianuros



Montaje para realizar la oxidación de cianuros

Pruebas volúmenes pequeños

Pruebas volúmenes grandes



Precipitado después de la oxidación



Precipitado después de la floculación



Lectura de metales por absorción atómica

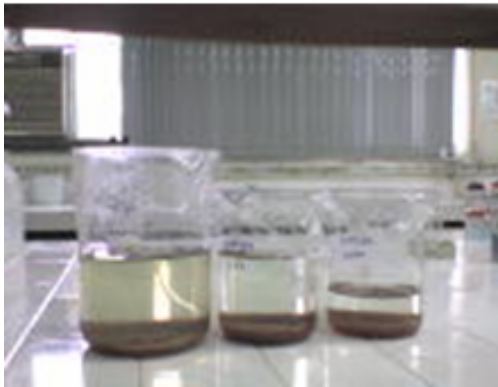


Precipitación química de metales



Sedimentación de lodos de precipitación

Pruebas volúmenes pequeños



Pruebas volúmenes grandes



Montaje para la evaporación del clarificado de la oxidación

Calentamiento muestra

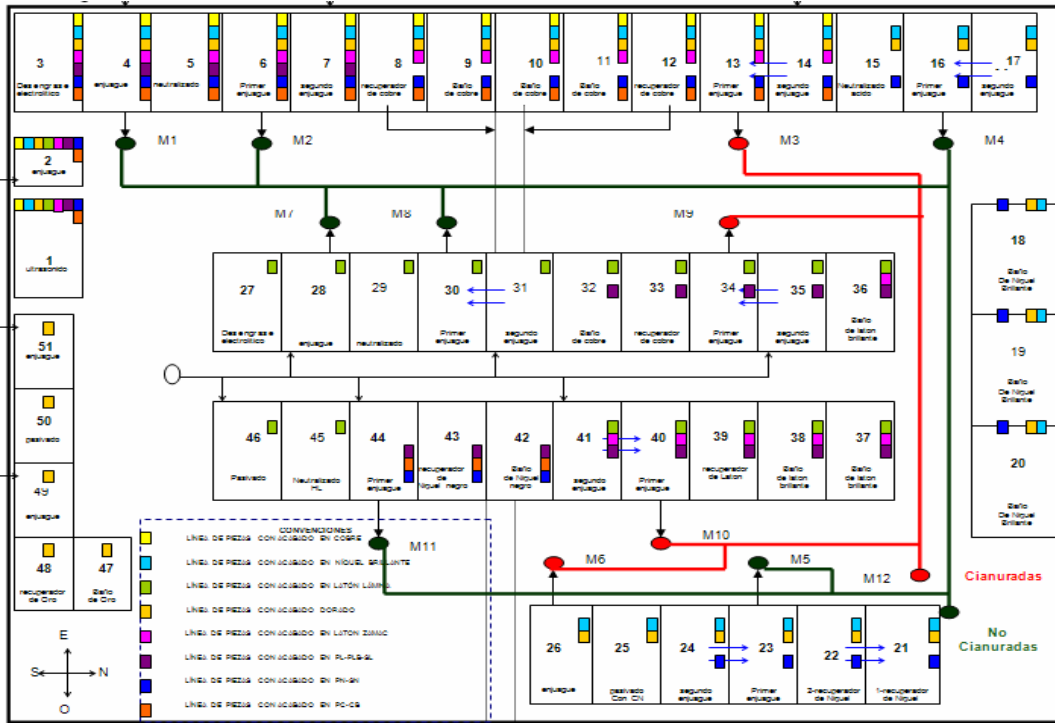


Evap., refrigeración y condensación

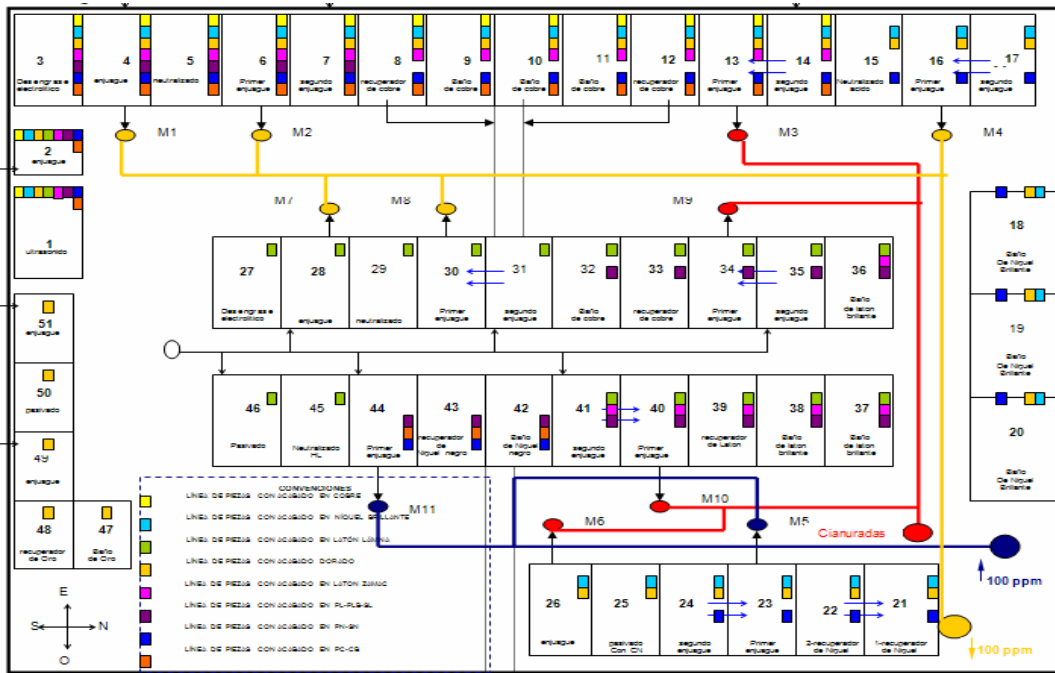


ANEXO H. Plano de separación de las corrientes

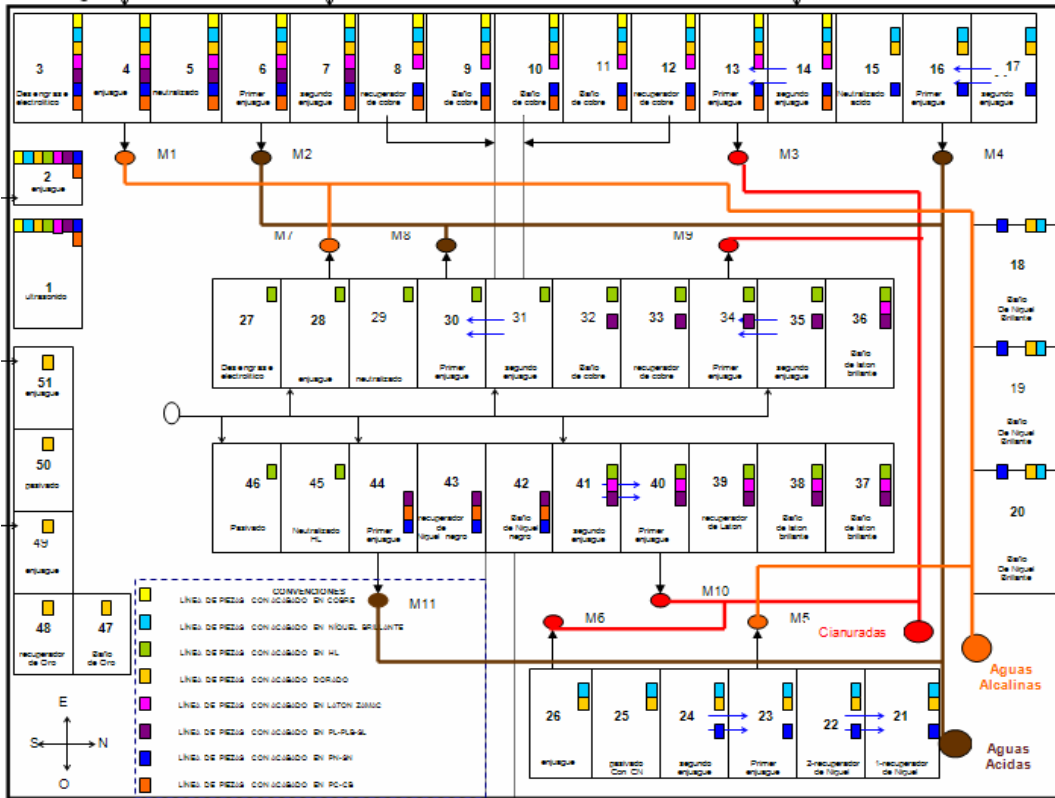
Alternativa 1 y 2



Alternativa 3



Alternativa 4

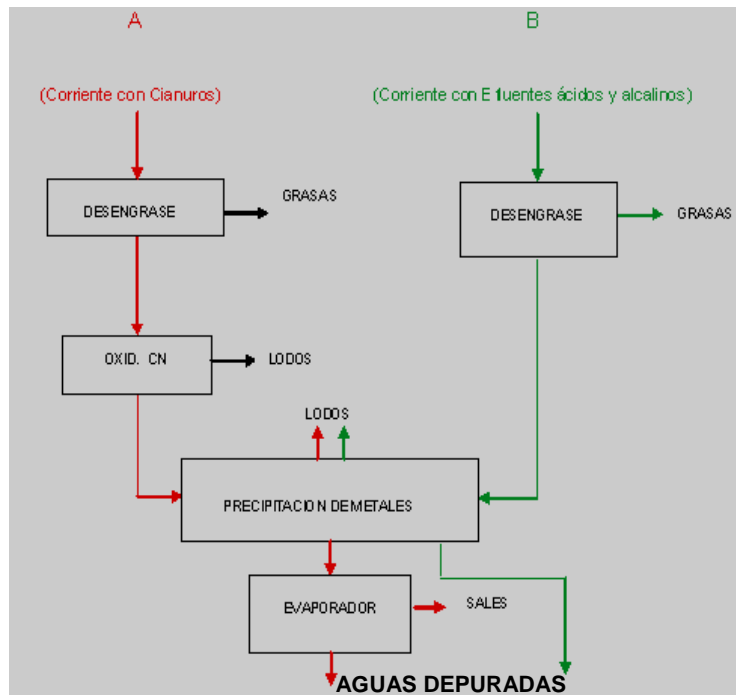


ANEXO I. Planos de unidades de operación

Diseño de alternativas para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

Alternativa 1

1. Separación de corrientes.
 - **Corrientes con concentraciones de Cianuro:** esta corriente (A) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M3, M6, M9 y M10.
 - **Corrientes sin cianuros (ácidas y alcalinas):** esta corriente (B) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M1, M2, M4, M5, M7, M8, y M11.
2. Aplicación de sistemas de desengrase a las corrientes A y B.
3. Oxidación de cianuros y precipitación de metales a la corriente A.
4. Proceso de evaporación a la corriente A después de la precipitación.
5. Proceso de precipitación a la mezcla de los puntos no cianurados (corriente B).



Diseño de alternativas para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

Alternativa 2

1. Separación de corrientes.

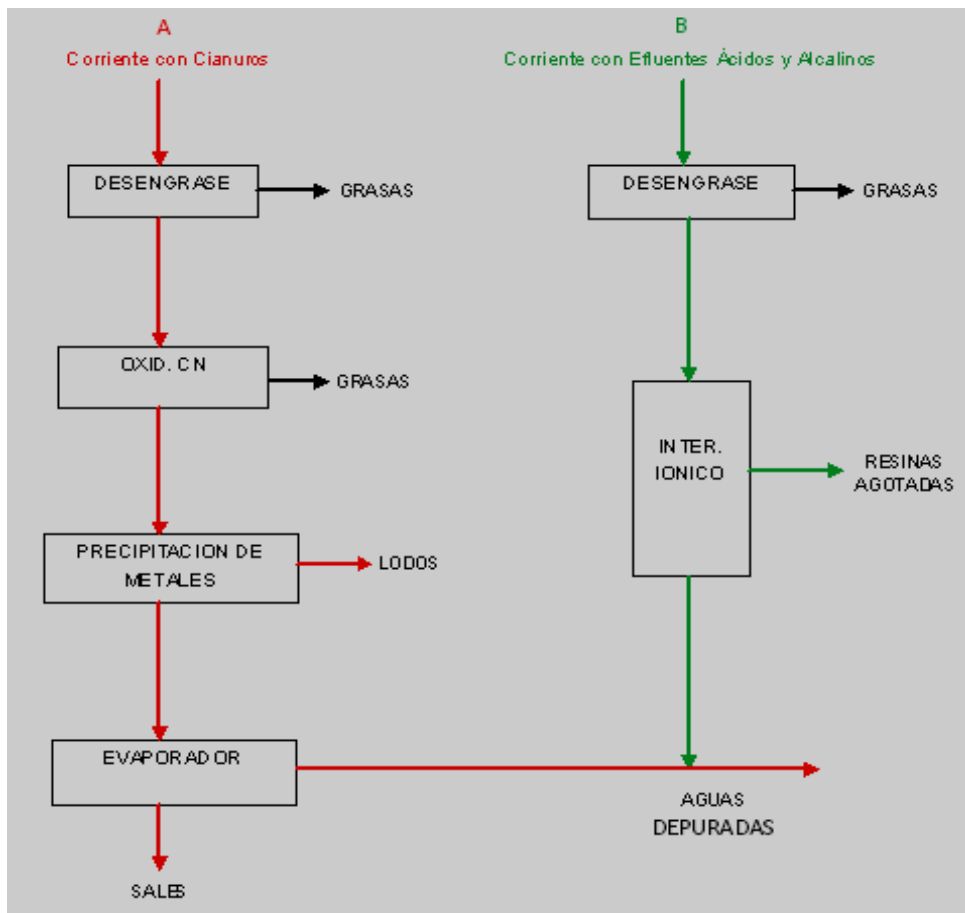
- **Corrientes con concentraciones de Cianuro:** esta corriente (A) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M3, M6, M9 y M10.
- **Corrientes sin cianuros (ácidas y alcalinas):** esta corriente (B) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M1, M2, M4, M5, M7, M8, y M11.

2. Aplicación de sistemas de desengrase a las corrientes A y B.

3. Oxidación de cianuros y precipitación de metales a la corriente A.

4. Proceso de evaporación a la corriente A después de la precipitación.

5. Proceso de remoción de metales por intercambio iónico a la mezcla de los puntos no cianurados (corriente B).



Diseño de alternativas para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

Alternativa 3

1. Separación de corrientes.

- **Corrientes con concentraciones de Cianuro:** esta corriente (A) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M3, M6, M9 y M10.
- **Corrientes sin cianuros con concentraciones por encima de 100 ppm:** esta corriente (C) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M5 y M11.
- **Corrientes sin cianuros con concentraciones por debajo de 100 ppm:** esta corriente (D) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M1, M2, M4, M7 y M8.

2. Aplicación de sistemas de desengrase a las corrientes A, C y D.

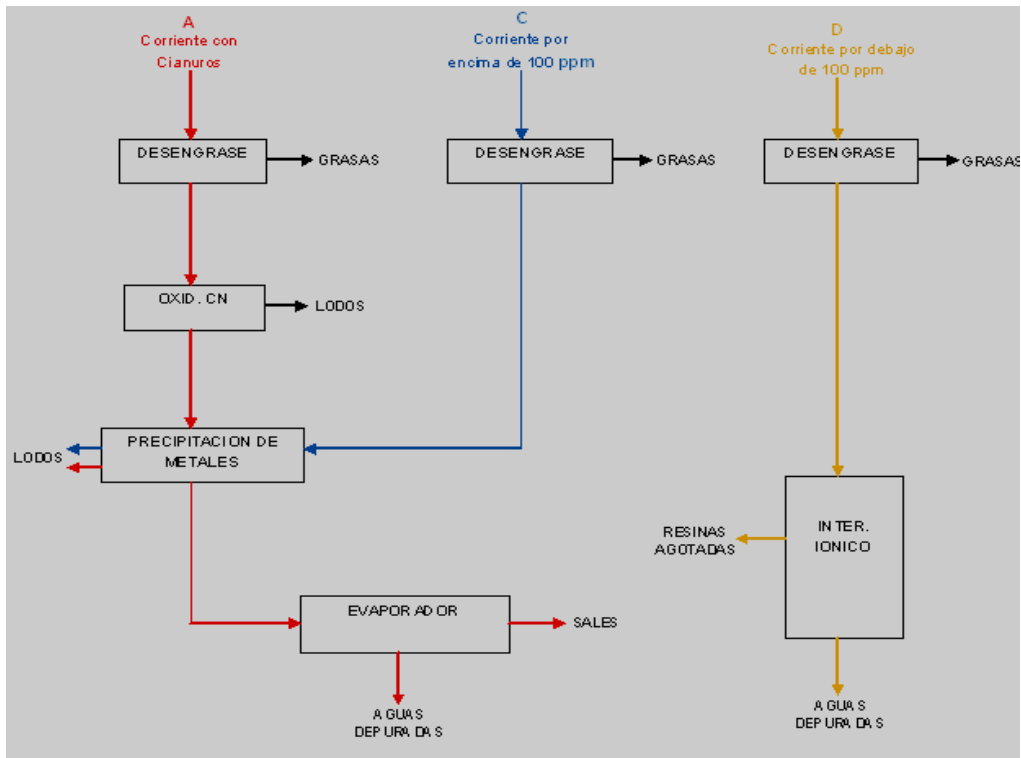
3. Oxidación de cianuros a la corriente A.

4. Proceso de precipitación de metales a la mezcla de la corriente A.

5. Proceso de evaporación a la mezcla de la corriente A.

6. Precipitación de metales a la corriente C.

7. Remoción de metales por intercambio iónico a la corriente D.



Diseño de alternativas para el tratamiento de los efluentes de la empresa Fantaxias Ltda.

Alternativa 4

1. Separación de corrientes.

- **Corrientes con concentraciones de Cianuro:** esta corriente (A) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M3, M6, M9 y M10.
- **Corrientes sin cianuros compuestas por aguas que provienen de enjuagues de diversas etapas (alcalinas):** esta corriente (E) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M1, M5 y M7.
- **Corrientes sin cianuros compuestas por aguas que provienen de enjuagues de etapas de neutralizado (ácidas):** esta corriente (F) esta compuesta por las aguas que llegan de los puntos M2, M4, M8 y M11.

2. Aplicación de sistemas de desengrase a las corrientes A, E y F.

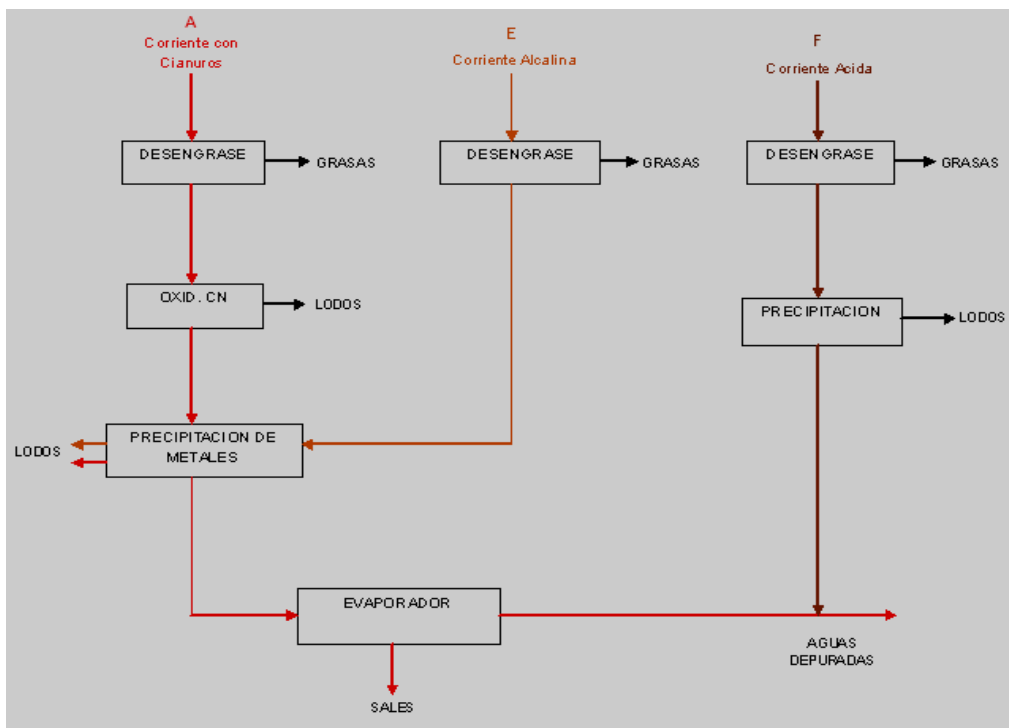
3. Oxidación de cianuros a la corriente A.

4. Proceso de precipitación de metales a la mezcla de la corriente A.

5. Proceso de evaporación a la mezcla de la corriente A.

6. Precipitación de metales a la corriente E (alcalina).

7. Remoción de metales por precipitación a la corriente F (ácida).



ANEXO J. Ecuaciones de consumos de reactivos y volumen de lodos generados para 500, 1000 y 1500 ml de efluente

Precipitación de metales

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente B)

$$g. (\text{NaOH}) = 7.6E-4V - 0.026 \quad V: \text{volumen en ml}$$

$$V \text{ Lodos} = 0.103V + 1$$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente C)

$$g. (\text{NaOH}) = 1.22E-3V - 0.066 \quad V: \text{volumen en ml}$$

$$V \text{ Lodos} = 0.125V + 2.66$$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente D)

$$g. (\text{NaOH}) = 4.8E-4V - 3.3E-3 \quad V: \text{volumen en ml}$$

$$V \text{ Lodos} = 0.048V + 0.66$$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente E)

$$g. (\text{NaOH}) = 6.1E-4V + 0.016 \quad V: \text{volumen en ml}$$

$$V \text{ Lodos} = 0.08V - 0.33$$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente F)

$$g. (\text{NaOH}) = 6.1E-4V + 0.013 \quad V: \text{volumen en ml}$$

$$V \text{ Lodos} = 0.127V + 1$$

Oxidación de cianuros

Consumo de NaOH V: Volumen en ml

- Ajuste de pH.

$$g. (\text{NaOH}) = 0.004V - 0.368$$

- Primera etapa de la oxidación

$$g. (\text{NaOH}) = 1.6E - 4V$$

- Segunda etapa de oxidación

$$g. (\text{NaOH}) = 1.6 E - 4V - 0.08$$

Consumo de Cl₂

V: Volumen en ml

- Primera etapa de la oxidación

$$g. (Cl_2) = 0.010V + 0.538$$

- Segunda etapa de oxidación

$$g. (Cl_2) = 0.001V - 0.191$$

Consumo de HNO₃

V: Volumen en ml

- Ajuste de pH.

$$V. (HNO_3) = 0.018V - 2.58$$

Volumen de lodos generados

V: Volumen ml

$$V \text{ Lodos} = 0.172V - 4$$

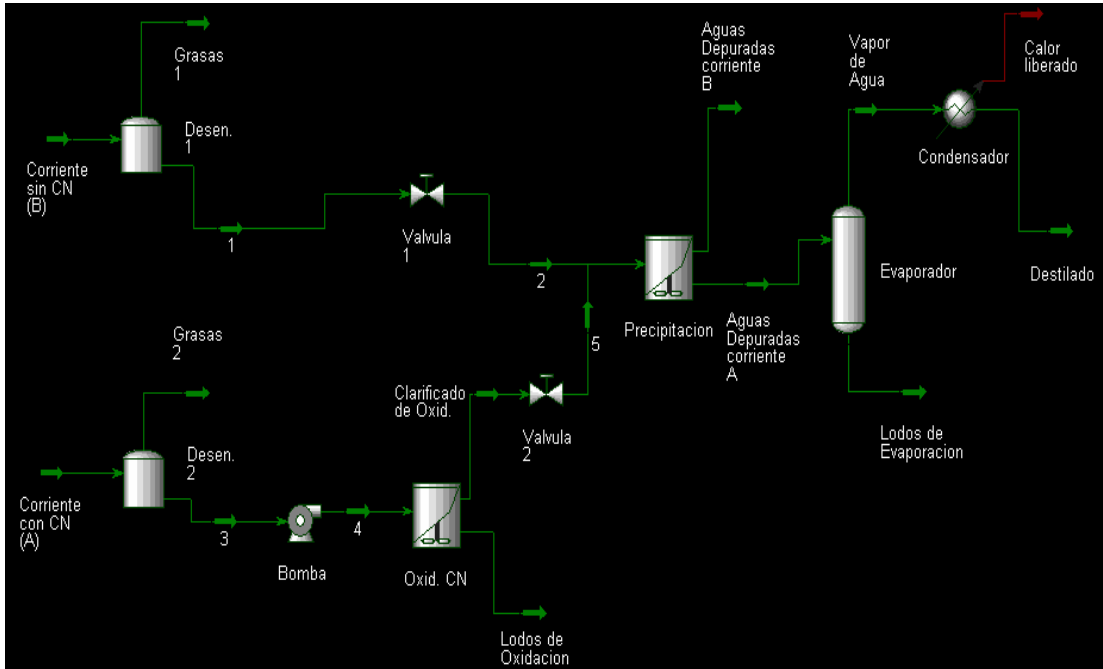
Para la precipitación

$$g. (NaOH) = 0.003V + 0.007$$

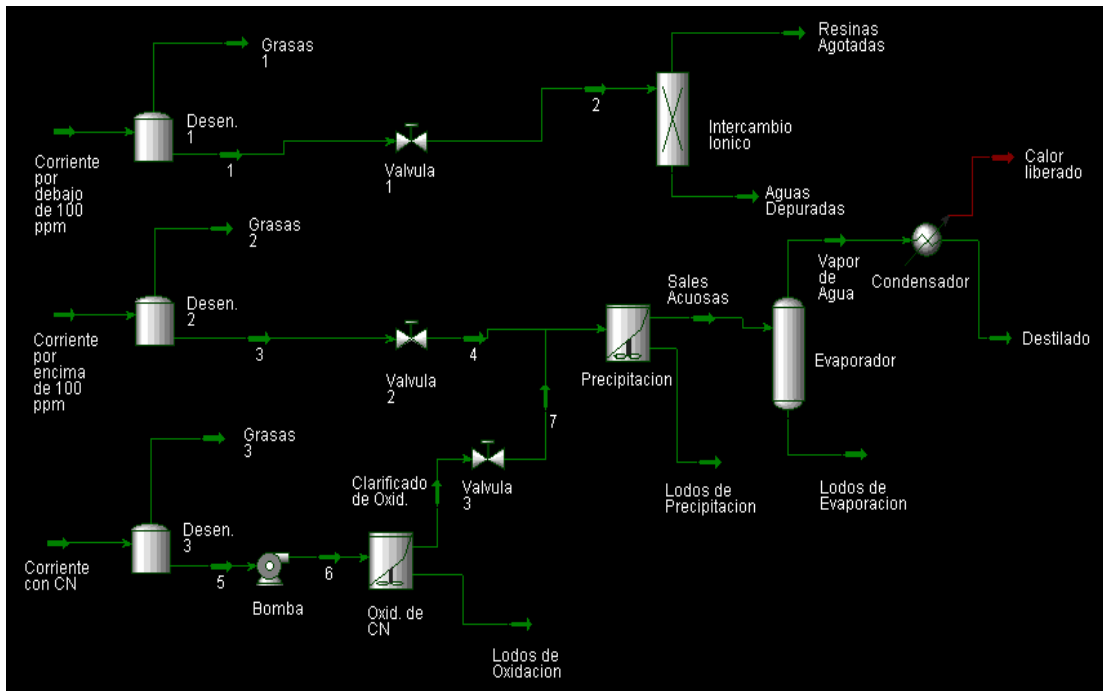
$$V \text{ Lodos} = 0.025V + 0.072$$

ANEXO K. Diagramas en HYSYS de las alternativas de tratamiento seleccionadas

Modelo de la alternativa Nº 1



Modelo de la alternativa Nº 3



ANEXO L. Ecuaciones de consumo de reactivos y volumen de lodos generados en 5, 10 y 20 litros de efluente

Tabla Nº 1. Consumo de reactivos y lodos generados según mezcla y volumen de efluente para la precipitación de metales

Mezcla	Vol. (L)	NaOH (g)	Vol. Lodos (ml)
B: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M5, M7 y M8 (Mezcla aguas sin CN)	5	2.48	450
	10	4.72	1010
	20	9.6	2000
C: Compuesta por los puntos M5 y M11 (Mezcla aguas por encima de 100 ppm)	5	3.84	450
	10	7.82	950
	20	16.32	1850
D: Compuesta por los puntos M1, M2, M4, M7 y M8 (Mezcla aguas por debajo de 100 ppm)	5	1.52	300
	10	2.8	650
	20	6.03	1300

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente B)

$g. (NaOH) = 0.476V + 0.04$ V: volumen en Litros

$V \text{ lodos} = 0.102V - 0.045$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente C)

$g. (NaOH) = 0.834V - 0.4$ V: volumen en Litros

$V \text{ lodos} = 0.093V + 0.012$

Consumo de NaOH y volumen de lodos generados (Corriente D)

$g. (NaOH) = 0.302V - 0.08$ V: volumen en Litros

$V \text{ lodos} = 0.067V - 0.025$

Tabla Nº 2. Consumo de reactivos y lodos generados según mezcla y volumen de efluente para la oxidación de cianuros

Variables	Solución 310 ppm CN		
	5000 ml	10000 ml	20000 ml
	Ajuste de pH.		
pH inicial	9,87	10,05	9,81
Gramos de NaOH	1,84	3,6	9,52
pH final	11,33	11,28	11,33
Primera etapa: Oxidación de Cianuros a Cianatos en medio alcalino (pH entre 11-12)			
pH inicial	11,33	11,28	11,33
Gramos de NaOH	0,4	0,8	1
Gramos de Cl ₂	7,315	14,63	29,26
Volumen de lodos (ml)	-----	-----	-----
pH final	11,34	11,10	11,05
Ajuste de PH.			
pH inicial	11,34	11,10	11,05
V. de acido fosfórico. (ml)	2,6	4,7	12
pH final	8,88	8,65	8,53
Segunda etapa: Oxidación de Cianatos a CO₂ y N₂ en medio alcalino (pH entre 8.5-9.0)			
pH inicial	8,88	8,65	8,53
Gramos de NaOH	0	0	0
Gramos de Cl ₂	4,4	8,8	17,556
Volumen de lodos (ml)	300	590	800
pH final	8,82	8,80	8,73
Precipitación en un tiempo de 20 minutos a 250 rpm			
V. muestra (ml)	4500	9000	13000
pH inicial	8,82	8,90	8,61
Gramos de NaOH	4,8	8,24	16
Volumen de lodos (ml)	30	60	100
pH final	11,50	11,51	11,53
Floculación en un tiempo de 3 minutos a 100 rpm			
Volumen de sulfato férrico (ml)	4,5	9	13
pH final	11,32	11,20	11,20

Consumo de NaOH

V: Volumen en Litros

- Ajuste de pH.

$$g. (NaOH) = 0.523V - 1.12$$

- Primera etapa de la oxidación

$$g. (NaOH) = 0,037V+0,3$$

Consumo de Cl₂

V: Volumen en Litros

- Primera etapa de la oxidación

$$g. (Cl_2) = 1,463V$$

Segunda etapa de oxidación

$$g. (Cl_2) = 0,876V + 0,025$$

Consumo de H_3PO_4

V: Volumen en Litros

- Ajuste de pH.

$$V. (H_3PO_4) = 0,641V - 1,05$$

Volumen de lodos generados

V: Volumen Litros

$$V \text{ Lodos} = 0.032V + 0.195$$

Para la precipitación

$$g. (NaOH) = 0,750V + 0,92$$

$$V \text{ Lodos} = 4.57E-3V + 0.01$$

ANEXO M. Caudales de los efluentes de la sección de galvanica de Fantaxias Ltda.

Tabla N° 1. Caudales de los diferentes puntos de vertimiento para diferentes días de muestreo.

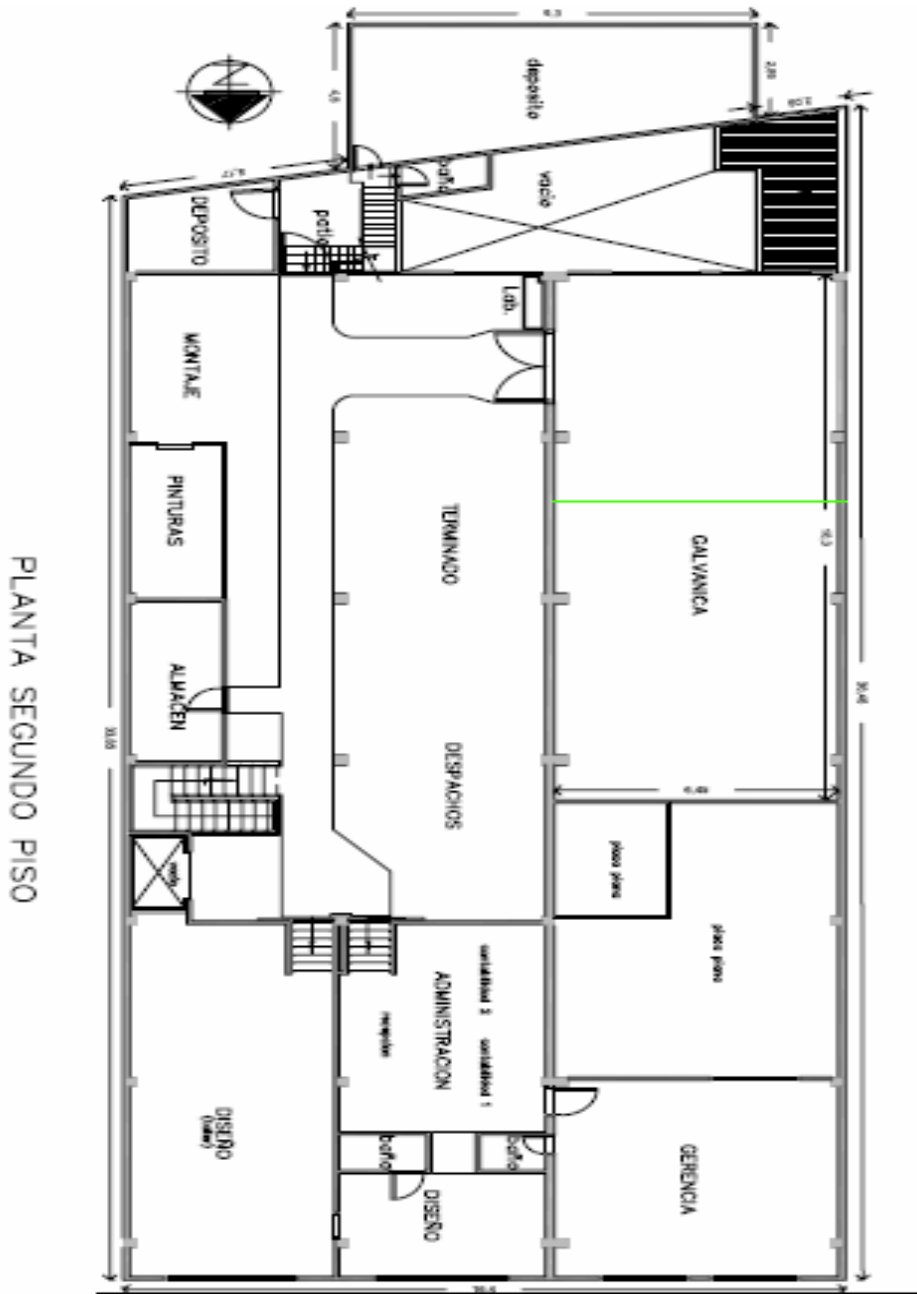
Punto de Muestra	14 de Julio	19 de Julio	22 de Julio	26 de Julio	1 de Agosto	3 de Agosto	22 de Agosto	24 de Agosto	Valores Promedio (ml/s)
	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	Promedio Caudales (ml/s)	
M1	320,82	285,15	300,67	264,74	290,87	311,20	280,22	265,48	290
M2	277,20	158,48	247,20	301,26	247,50	203,65	281,47	195,66	239
M3	182,15	201,27	163,56	180,62	207,03	190,84	185,25	173,92	185
M4	252,80	198,93	247,83	268,41	239,39	193,57	229,20	210,58	230
M5	327,42	342,88	253,14	273,48	302,95	286,14	271,92	353,80	300
M6	194,66	228,29	183,90	225,33	235,27	163,95	258,32	204,73	211
M7	252,00	311,32	289,36	277,45	282,74	210,35	299,28	244,09	270
M8	260,33	332,46	355,00	300,34	285,72	233,38	250,79	310,27	290
M9	265,89	240,56	235,53	200,14	156,40	220,45	250,32	227,46	224
M10	208,04	251,00	481,87	365,53	118,00	180,40	300,67	328,15	277
M11	328,67	247,49	273,28	335,48	368,27	221,00	286,92	410,00	308

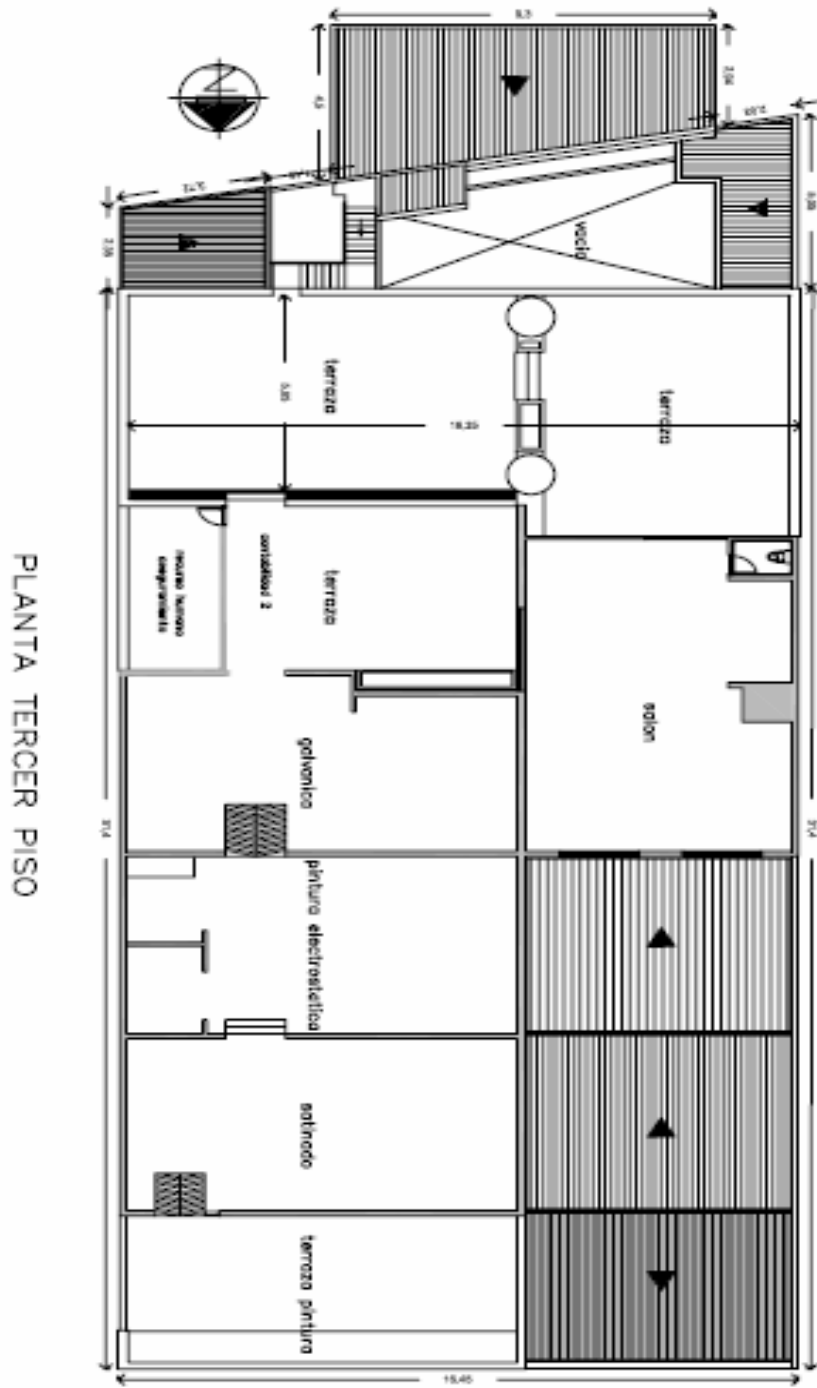
La empresa Fantaxias Ltda, realiza procesos de cobrizado, niquelado, latonado y dorado en la sección de galvanica. Durante el día se realizan 24 cochadas en promedio con 8 recorridos de cada proceso. El proceso de cobrizado tarda una hora con 30 minutos al igual que el niquelado. El proceso de latonado tarda 2 horas como máximo para efectuar todo el recorrido.

Tabla N° 2. Volumen de Efluentes de cada punto de vertimiento durante un día de trabajo.

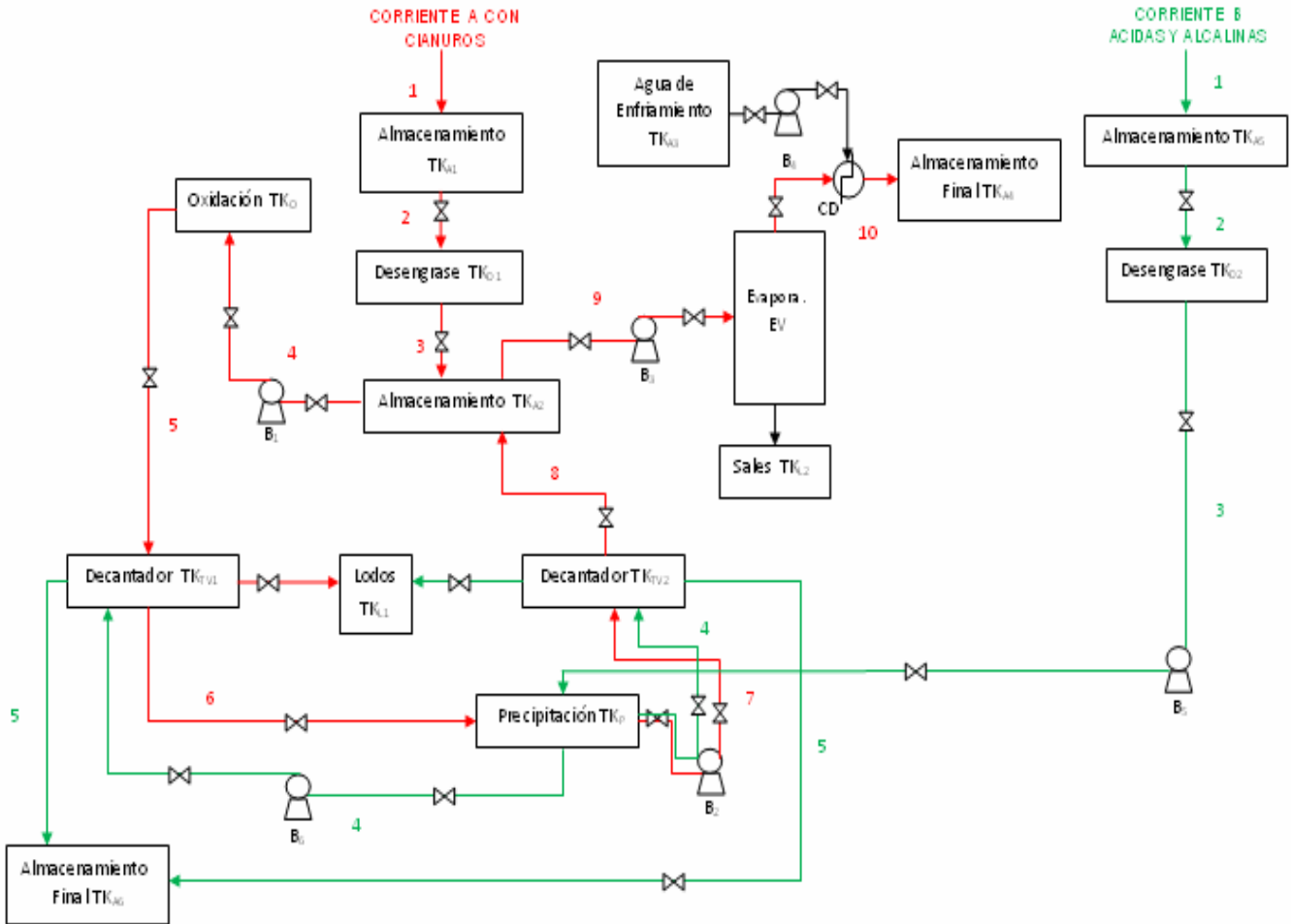
Punto de Vertimiento	Caudal (ml/s)	Tiempo (min)	Volumen (L)
M1	290	32	556.8
M2	239	32	459.1
M3	185	32	355.2
M4	230	32	441.6
M5	300	16	288.0
M6	211	16	202.5
M7	270	16	259.2
M8	290	16	278.4
M9	224	16	215.1
M10	277	16	265.9
M11	308	5	92.4

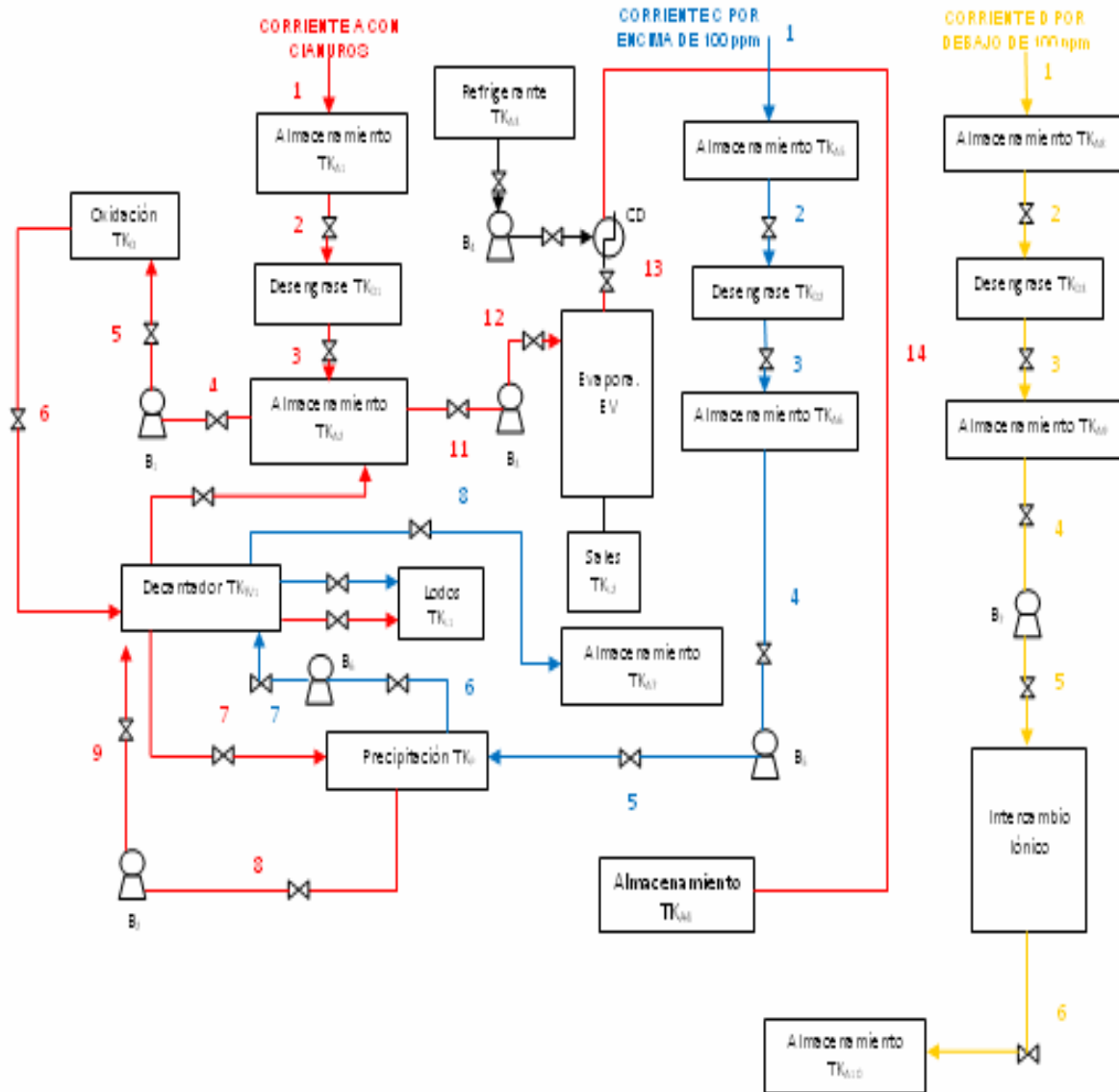
En total se vierten durante el día **3414.1 litros**





ANEXO O. Diagrama de flujo de las alternativas 1 y 3





ANEXO P. Diagramas de los diferentes equipos y tanques

Diagrama de tanques con sus respectivas dimensiones según el volumen a tratar

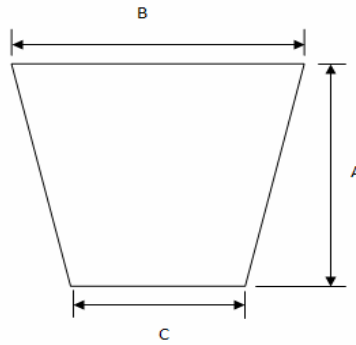


Figura Nº 1. Esquema general de los tanques plásticos

Tabla Nº 1. Dimensiones de tanques

Volumen (L)	Diámetro B (m)	Diámetro C (m)	Altura A (m)	Peso (Kg)
250	0.84	0.58	0.76	8
500	1.06	0.72	0.85	12.1
1000	1.30	0.96	1.06	22.8
1500	1.45	1.10	1.19	38.1
2000	1.58	1.25	1.41	46.4
3000	1.86	1.47	1.46	72.3

Las dimensiones de los tanques son los necesarios para llevar a cabo el tratamiento de las vertientes de Fantaxias Ltda.

Diagrama del tanque de desengrase con sus respectivas dimensiones según el volumen necesario a tratar.

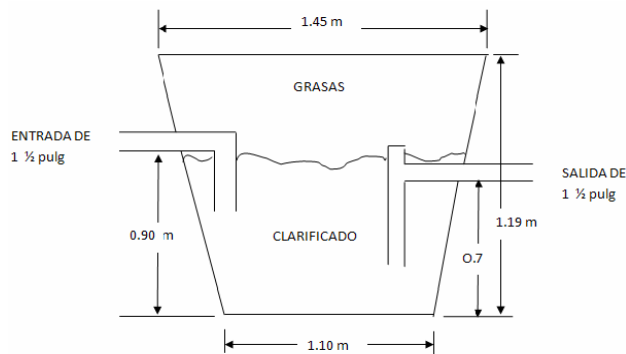


Figura Nº 2. Esquema trampa de grasas y aceites

Las trampas de grasas y aceites están fabricadas en fibra de vidrio con capacidad de tratamiento de 0.3 L/seg.

Diagrama del tanque decantador cuadrado con sus respectivas dimensiones según el volumen necesario a tratar.

Especificación de la tolva con soporte:

La Tolva esta fabricada en lamina de polipropileno de 16mm de espesor y pestaña de 8 cm, con refuerzos en ángulo de acero de 1 ½ pulg X ¼ pulg, y platina de 1 ½ pulg.

Dimensiones de la tolva decantadora:

1.10 m (largo) X 1.10 m (ancho) X 1,79 m (alto)

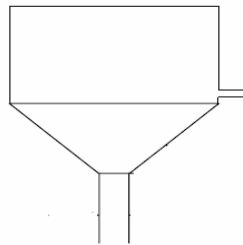


Figura N° 3. Esquema del tanque decantador

Como recomendación se sugiere la tolva suministrada por plastigalco.

Sistema de agitación

Sistema de agitación compuesto por un eje de diámetro de 1 pulg en fibra de vidrio, soporte para motorreductor y un par de aspas en polipropileno.

Especificación del motorreductor sin fin corona: 0.5 HP, relación 40/1 para agitador.

Dimensiones del aspa: 0.45 m (largo) X 5 pulg (ancho) X 16 mm (espesor)

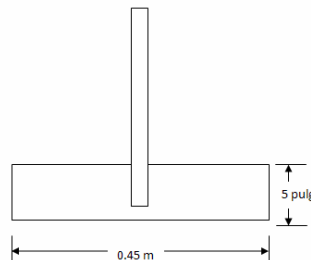


Figura N° 3. Esquema del agitador.

ANEXO Q. Diseño columna de intercambio iónico

Se diseñó una columna de intercambio iónico para un volumen de efluente de 12.72 m³ semanales.

Para encontrar los parámetros de diseño se realizó un balance de materiales para varias especies de la columna empacada. Asumiendo que los contenidos de iones en la capa cambian con el tiempo como resultado del flujo de la solución que pasa a través de ella, se puede calcular la cantidad total de iones que van a ser adsorbidos.

El diseño de la columna requiere de los siguientes parámetros:

$$R = \frac{M}{C}$$

$$Q = V * A$$

$$Z = \frac{R}{A}$$

R= Volumen de la resina (m³)

M= Cantidad total de iones adsorbidos (eq-g)

C= Capacidad de la resina (eq-g/L)

Q= Caudal (m³/s)

V= Velocidad lineal (m/s)

A= Área de la columna (m²)

Z= Altura del lecho (m)

❖ Pérdida de Carga, h

Esta pérdida de carga puede calcularse mediante la ecuación de Kozeny, que solo es aplicable para esferas con flujo laminar, el cual solo se presenta cuando el número de Reynolds es menor que 10.

$$h = 150 * (v/g) * L * [(1 - \epsilon_0)^2 / \epsilon_0^3] * V * (1/D)^2$$

Donde v = Viscosidad cinemática = 1×10^{-6} (pa*s*m³/Kg)

g = Gravedad= 9.81 (m/s)

L = Longitud del lecho (m)

ε_0 = Porosidad

V = Velocidad del flujo (m/s)

D = Diámetro de partícula (m)

Se utilizó la curva de ruptura para la combinación de metales cobre, níquel y zinc, teniendo en cuenta que la caracterización de los efluentes de la empresa Fantaxias, indicó la presencia de estos metales en todas sus corrientes. Se tomó como referencia los valores arrojados para níquel por ser el metal que tiene el mínimo valor de concentración permisible para aguas de descarga, se fijó como concentración máxima del efluente 2 ppm de níquel, encontrada en 36 BV.

Cálculos

$$M = 18,23 * 12,72 \text{ m}^3 = 231,88 \text{ eq de iones.}$$

Teniendo la cantidad total de iones adsorbidos, podemos calcular el volumen de resina

$$C = 2.8 \text{ eq/L}$$

$$R = 82.81 \text{ L} = 0.08282 \text{ m}^3$$

$$Q = 12.72 \text{ m}^3/\text{semanales} = 2.45 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 2.333 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Resolviendo se tiene que:

$$A = Q/V = 0.105 \text{ m}^2$$

$$\text{Por lo tanto el diámetro de la columna será: } D = (4 \cdot A / \pi)^{1/2} = 0.36 \text{ m}$$

Reemplazando estos valores la altura del lecho es: 0.78 m

❖ Cálculo de la pérdida de carga, h

Utilizando los siguientes parámetros:

$$D = 700 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\varepsilon_0 = 0.35$$

$$L = 0.711$$

$$V = 2.333 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Reemplazando

$$h = 0.055 \text{ m}$$

El lecho de resina será soportado por un material inerte (grava) con un diámetro de partícula de 2.18 mm y una altura de 15 cm más un fondo falso de 10 cm.

Para hallar la altura total de la columna, H_T se deben sumar la altura del lecho más la altura de la capa de grava, más el fondo falso y la altura de agua pro encima del lecho de resina que equivale a la pérdida de carga:

$$H_T = 0.78 \text{ m} + 0.15 \text{ m} + 0.10 \text{ m} + 0.055 \text{ m} = 1.085 \text{ m}$$

A continuación, se resumen las especificaciones para la columna de intercambio iónico:

- Diámetro de la columna: 0.36 m
- Altura de la columna: 1.085 m
- Altura del lecho: 0.78 m

ANEXO R. Fichas técnicas y de seguridad de reactivos

Sulfato de níquel

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(NiSO₄)**

Peso molecular: 149 g/mol

Aspecto: Sólido verde

Olor: Inodoro

Punto de fusión: 53.3 °C

Punto de ebullición: 280 °C

Solubilidad: 625g/L en agua a 20 °C

pH: 4.3-4.7

- **Primeros Auxilios**

Indicadores generales: En caso de pérdida de conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito

Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. Si persiste el malestar, acudir atención médica

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua; quitarse las ropas contaminadas

Ojos: Mantener con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos

Ingestión: Beber agua abundante, provocar el vómito y pedir atención médica

- **Protección personal**

Protección respiratoria: En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Usar ropa de trabajo adecuada, quitarse las ropas contaminadas, lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición

Cloruro de zinc

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(ZnCl₂)**

Peso molecular: 136.29 g/mol

Aspecto: Sólido cristalino blanco

Olor: Sin olor

Punto de fusión: 290 °C

Punto de ebullición: 732 °C

Solubilidad: 4.32Kg/L en agua a 25 °C

pH: 4.0

- **Primeros Auxilios**

Inhalación: Efecto corrosivo destructivo extremo de las membranas mucosas y en el tacto respiratorio superior, con quemaduras.

Contacto con la piel: Daño corrosivo, con severas irritaciones, quemaduras y ulceraciones

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos

Ingestión: Beber agua abundante, provocar el vómito y pedir atención médica

- **Protección personal**

Protección respiratoria: En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Usar ropa de trabajo adecuada, quitarse las ropas contaminadas, lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición

Cianuro de cobre

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(CuCN)**

Peso molecular: 89.56 g/mol

Aspecto: Polvo blanco grisáceo

Olor: Débil a almendras amargas

Punto de fusión: 474 °C

Solubilidad: Insoluble en agua

- **Primeros Auxilios**

Indicadores generales: El socorrista debe auto protegerse. En caso de parálisis respiratoria, proceder inmediatamente a la respiración artificial; no dar a beber ni provocar el vomito en caso de pérdida de conocimiento.

Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. Pedir de inmediato atención medica.

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos

Ingestión: Beber agua abundante, provocar el vómito y pedir atención médica

- **Protección personal**

Protección respiratoria: Usar equipo respiratorio adecuado

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Quitarse las ropas contaminadas, usar equipo de protección completo, lavarse las manos y cara la finalizar el trabajo.

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición

Cianuro de zinc

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(ZnCN₂)**

Peso molecular: 117.42 g/mol

Aspecto: Polvo blanco

Olor: Característico

Solubilidad: Insoluble en agua

- **Primeros Auxilios**

Indicadores generales: El socorrista debe auto protegerse; en caso de parálisis recurrir a la respiración artificial. En caso de pérdida de conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito

Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. Si persiste el malestar, acudir a atención médica

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua; quitarse las ropas contaminadas

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos

Ingestión: Beber agua abundante, provocar el vómito y pedir atención médica

- **Protección personal**

Protección respiratoria: Usar equipo respiratorio adecuado, evitar la formación de polvo

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Usar ropa de trabajo adecuada, quitarse las ropas contaminadas, lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición

Cianuro de sodio

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(NaCN)**

Peso molecular: 49.01 g/mol

Aspecto: Polvo blanco

Olor: Débil a almendras amargas

Punto de fusión: 563 °C

Punto de ebullición: 1496 °C

Solubilidad: 600g/L en agua a 20 °C

pH: 11

- **Primeros Auxilios**

Indicadores generales: En caso de pérdida de conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito

Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. Si persiste el malestar, acudir a atención médica

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua; quitarse las ropas contaminadas

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos

Ingestión: Beber agua abundante, provocar el vómito y pedir atención médica

- **Protección personal**

Protección respiratoria: En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Usar ropa de trabajo adecuada, quitarse las ropas contaminadas, lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición

Hidróxido de sodio

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(NaOH)**

Peso molecular: 40.01 g/mol

Aspecto: Sólido cristalino blanco

Olor: Sin olor

Punto de fusión: 318.4 °C

Punto de ebullición: 1388 °C

Solubilidad: Soluble en agua, alcoholes y glicerol; insoluble en acetona

pH de disoluciones acuosas

- **Primeros Auxilios**

Inhalación: Retirar del área de exposición hacia una bien ventilada. Si el accidentado se encuentra inconsciente, no dar a beber nada, dar respiración artificial y rehabilitación cardiopulmonar. Suministrar oxígeno si es necesario.

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua; quitarse las ropas contaminadas

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos hasta eliminación total del producto

Ingestión: No provocar vómito. Si esta consciente, dar a beber una cucharada de agua inmediatamente y después, cada 10 minutos.

EN TODOS LOS CASOS DE EXPOSICION, EL PACIENTE DEBE SER TRASPORATADO AL HOSPITAL TAN PRONTO SEA POSIBLE

- **Protección personal**

Para el manejo del NaOH es necesario el uso de lentes de seguridad, bata y guantes de neopreno, nitrilo o vinilo. Siempre debe manejarse en una campana y no debe utilizarse lentes de contacto al trabajar con este compuesto.

En el caso de trasvasar pequeñas cantidades de disoluciones de sosa con pipeta, utilizar una propipeta, nunca aspirar con la boca

Acido fosfórico

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: (H_3PO_4)

Peso molecular: 96 g/mol

Aspecto: Líquido incoloro

Olor: Fuerte irritante

Punto de fusión: 21 °C

Punto de ebullición: 158 °C

Solubilidad: Soluble en agua en todas proporciones

pH: 1

- **Primeros Auxilios**

Inhalación: En caso de síntomas por inhalación de vapores, alejar al afectado de la exposición y mantener en reposo y abrigado.

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua y jabón; cubrir la herida con material estéril

Ojos: Lavar con agua abundantemente manteniendo los párpados abiertos hasta eliminación total del producto. Requerir asistencia medica

Ingestión: Si se ha ingerido, dar a beber agua y no provocar el vómito; administrar suspensión de oxido de aluminio. Requerir asistencia medica inmediata

- **Protección personal**

Protección respiratoria: En caso de formación de vapores, usar mascara de protección

Protección de las manos: Guantes de material plástico

Protección de los ojos: Gafas protectoras herméticas cerradas

Protección cutánea: Ropa protectora resistente a los ácidos

Acido nítrico

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: (**HNO₃**)

Peso molecular: 63.02 g/mol

Aspecto: Liquido amarillento

Olor: Fuerte irritante

Punto de fusión: -42 °C

Punto de ebullición: 86 °C

Solubilidad: Soluble en agua en todas proporciones

pH: 2

- **Primeros Auxilios**

Debido a que este producto es extremadamente reactivo, debe tenerse mucho cuidado en su manejo. Las personas expuestas a este producto, deben ser trasportadas a un área bien ventilada y deben eliminarse las ropas contaminadas totalmente

Inhalación: Evaluar los signos vitales, pulso y velocidad de respiración; proporcionar rehabilitación cardiopulmonar si es necesario.

Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua y jabón; cubrir la herida con material estéril

Ojos: Lavar con agua tibia abundantemente manteniendo los párpados abiertos hasta eliminación total del reactivo. Requerir asistencia médica

Ingestión: Lavar la boca con agua corriente sin que sea ingerida. No inducir el vómito ni tratar de neutralizarlo

- **Protección personal**

Para el manejo del ácido es necesario el uso de lentes de seguridad, bata y guantes de neopreno, nitrilo o vinilo. Siempre debe manejarse en una campana y no debe utilizarse lentes de contacto al trabajar con este compuesto.

En el caso de trasvasar pequeñas cantidades de disoluciones de sosa con pipeta, utilizar una propipeta, nunca aspirar con la boca

Hipoclorito de sodio

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(NaClO)**

Peso molecular: 164.53 g/mol

Aspecto: Líquido amarillento

Olor: Fuerte irritante

Punto de fusión: 18 °C

Punto de ebullición: se descompone

Solubilidad: Soluble en agua en todas proporciones

pH: 10

- **Primeros Auxilios**

Inhalación: Las personas expuestas a este producto, deben ser transportadas a un área bien ventilada y deben eliminarse las ropas contaminadas totalmente. Proporcionar respiración artificial

Contacto con la piel: Eliminar la ropa contaminada, lavar abundantemente con agua y jabón; cubrir la herida con material estéril

Ojos: Lavar con agua corriente abundantemente manteniendo los párpados abiertos hasta eliminación total del reactivo. Requerir asistencia médica

Ingestión: Si se encuentra consciente dar a beber una taza de agua cada 10 minutos. No inducir al vómito

Protección personal

Para el manejo del ácido es necesario el uso de lentes de seguridad, bata y guantes de neopreno, nitrilo o vinilo. Siempre debe manejarse en una campana y no debe utilizarse lentes de contacto al trabajar con este compuesto.

En el caso de trasvasar pequeñas cantidades de disoluciones de sosa con pipeta, utilizar una propipeta, nunca aspirar con la boca

Sulfato férrico

- **Propiedades fisicoquímicas**

Formula química: **(Fe₂(SO₄)₃)**

Peso molecular: 402 g/mol

Aspecto: Café oscuro

Olor: Sin olor

Punto de fusión: 263 °C

Punto de ebullición: se descompone

Solubilidad: Soluble en agua

pH: 2.5

- **Primeros Auxilios**

Inhalación: La exposición al polvo en altas concentraciones puede tener efectos de irritación en la nariz, garganta y vías respiratorias

Contacto con la piel: El material puede provocar irritación. Lave la piel con agua y jabón

Ojos: Puede provocar irritación temporal. Lavar con abundante agua

Ingestión: Una dosis grande puede tener efectos de diarrea, náusea, vómito. Beber de 1 a 3 vasos de agua para diluir lo ingerido

Protección personal

Protección respiratoria: En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado

Protección de las manos: Usar guantes apropiados

Protección de los ojos: Usar gafas adecuadas

Medidas de higiene particulares: Usar ropa de trabajo adecuada, quitarse las ropas contaminadas, lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo

Controles de la exposición del medio ambiente: El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y la duración según la exposición.