

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Facultad de Química –Farmacia.

Departamento de Ingeniería Química.



Trabajo de Diploma.

Título: Propuesta de una tecnología para el tratamiento de residuales líquidos de la Tenería “Patricio Lumumba”.

Autor: Daviel Gómez Acosta

Tutora: Dra. C. Inés de la C. Alomá Vicente.

Curso: 2015-2016.

Pensamiento

“No es la especie más fuerte la que sobrevive, ni la más inteligente, sino la que responde mejor al cambio”.

Charles Darwin

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo, con todo el amor que se merecen:

A todos mis seres queridos que me han apoyado durante todos estos años, especialmente a mi papá y a mi mamá que me han guiado hasta este momento.

A toda mi familia, especialmente a mi hermana, mi abuela Alicia, mi abuelo Aurelio, mi tía María y a mis primas Leyinys y Lina, porque han sabido ser una fuente de inspiración para mí y un modelo a seguir siempre.

Gracias a todos ustedes hoy puedo sentirme orgulloso de quien soy.

Por su entrega constante, por su ayuda incondicional, GRACIAS.

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos quiero darlos a:

A toda mi familia, especialmente a mis padres y hermana porque gracias a sus consejos, palabras de aliento, tesón y dedicación para conmigo he logrado convertirme en lo que soy.

A todos mis vecinos y amigos por ser un sostén en los momentos difíciles, por tener siempre una palabra de aliento, un consejo, simplemente, por estar ahí.

A mi tutora Dra. Inés Alomá Vicente por su esfuerzo y por haberme ayudado desinteresadamente en un momento tan crucial.

A todos los profesores de la carrera por haberme formado como profesional y como persona.

A mis compañeros de aula por estos cinco años maravillosos junto a ellos.

A mis compañeros de cuarto, amistades de segundo y a Yosdany (El Negro) por los momentos inolvidables que he vivido junto a ellos.

A todo el personal de la tenería "Patricio Lumumba" por su ayuda incondicional en todo momento.

A todo el personal del CQA por su apoyo.

*A todas las personas que siempre han estado a mi lado, que me han sostenido, aconsejado, guiado y querido incondicionalmente, **GRACIAS.***

Resumen

Uno de los problemas que han venido abordando las industrias del curtido de cuero es el alto contenido de contaminantes presentes en sus efluentes líquidos los cuales requieren de tratamientos adecuados a fin de cumplir con las normativas ambientales antes de su descarga al medio ambiente. El impacto ambiental ocasionado por los vertidos industriales en general, ha traído como consecuencia que las leyes ambientales nacionales e internacionales se tornen cada vez más rigurosas.

Las empresas de tenería de cuero emplean reactivos químicos muy agresivos durante el proceso de curtiembre. En el presente trabajo se exponen los resultados de la caracterización en el laboratorio de muestras de residuales líquidos vertidos en los procesos de pelambre, curtido y teñido de la tenería "Patricio Lumumba" en Caibarién por la elevada carga contaminante que presentan, evidenciado por la alta DQO, contenido de cromo trivalente y compuestos de carácter orgánicos e inorgánicos portadores de color respectivamente. Se logró la reducción de estos contaminantes a los niveles admisibles por los estándares ambientales a través de alternativas consistentes en la oxidación de sulfuros, remoción del cromo trivalente por precipitación química así como la decoloración con hipoclorito de sodio, tratamiento aplicado a cada una de los procesos objeto de estudio. Se proponen las tecnologías para cada residual y su escalado a nivel piloto cuya inversión se recupera en 4 años para la planta de tratamiento del residual del curtido, 4,5 años para la del residual del pelambre y 11 años para la del residual de teñido

PALABRAS CLAVES: efluentes, tenerías, oxidación de sulfuros, precipitación, cromo trivalente, decoloración.

Abstract

One of the problems of the tanning factories' is the high pollutants content from waste waters spilled over the environmental, then require adequate treatment to get the compliment of the standard spilled regulations. The environmental impact caused by factories discharges has resulted in the national and international environmental laws from becoming increasingly stringent.

The tannery factories have a high consumption of aggressive chemicals reagents used during the tanning process. In this work the results of characterization are carried out at the laboratory scale of wastewaters samples from liming, tanning and dyeing from "Patricio Lumumba" tannery as a focus of contamination at Caibarién bay', as evidenced by the high COD content of trivalent chromium, organic and inorganic compounds and colored substances respectively. It was achieve to decrease these pollutants compounds concentrations close to standard spilled rules through the oxidation of sulfides, removal of trivalent chromium by chemical precipitation and bleaching with sodium hypochlorite treatment applied to each of the processes studied in this work. It was proposed the scale process pilot at pilot plant to each technology to remove the pollutant contents. The investment recovery period is 4 years for the wastewater treatment plant of tanning, 4,5 years for the wastewater treatment plant of liming and 11 years for dyeing wastewater treatment plant.

KEYWORDS: effluents, tanneries, sulfide oxidation, precipitation, trivalent chromium, discoloration.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.....	3
1.1. Impactos ambientales de los residuos líquidos.....	3
1.2. Proceso de producción de cuero.....	5
1.2.1. Ribera.....	5
1.2.2. Curtido al cromo.....	5
1.2.3. Recurtido- Teñido – Engrase.....	5
1.2.4. Acabado.....	5
1.3. Residuales generados en el proceso de curtido.....	5
1.3.1. Proteínas y diferentes clases de sustancias orgánicas e inorgánicas.....	7
1.4. Tecnologías que generan residuales con Cromo. (SEMARNAP, 1999).....	8
1.4.1. Procesos de curtición.....	8
1.4.2. Procesos galvánicos.....	8
1.4.3. Otras tecnologías.....	9
1.5. Toxicidad del cromo.....	10
1.6. Impacto del cromo en los seres vivos.....	11
1.7. Contaminación con sulfuros.....	13
1.7.1. Impacto de los sulfuros a la salud de los seres vivos.....	14
1.8. Estructura y clasificación de los colorantes.....	15
1.8.1. Impacto que provocan los colorantes al ecosistema.....	17
1.9. Tratamientos convencionales de residuales de una tenería.....	18
1.9.1. Homogeneización-Neutralización.....	18
1.9.2. Coagulación-floculación.....	18
1.9.3. Decantación.....	19
1.10. Alternativas para el tratamiento de residuales con sulfuro.....	19
1.10.1. Precipitación e insolubilización de los sulfuros por formación de FeS.....	20
1.10.2. Oxidación química.....	20
1.11. Tecnologías de recuperación de las sales de cromo.....	20
1.12. Escalado de reactores químicos.....	21
1.12.1. Criterios frecuentes de escalado.....	24

Capítulo 2: Caracterización del sistema de tratamiento de los residuales líquidos de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.	26
2.1. Descripción del sistema de tratamiento de residuales líquidos de la tenería.	26
2.2. Caracterización de los residuales que se generan en los procesos de pelambre, curtido y teñido de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.	27
2.3. Estudios experimentales para evaluar el funcionamiento de las etapas de pelambre, curtido y teñido en la tenería “Patricio Lumumba”. Caibarién.	28
2.3.1. Evaluación experimental a escala de laboratorio de las aguas residuales del proceso de pelambre.	28
2.3.1.1. Balance de masa a escala de laboratorio aplicado a la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de pelambre.	31
2.3.1.2. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio aplicado a la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de pelambre.	31
2.3.1.3. Caracterización del residual del proceso de pelambre tratado antes de ser vertido.	32
2.3.2. Estudio de la precipitación de cromo del residual de curtido empleando hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a escala de laboratorio.	33
2.3.2.1. Balance de masa a escala de laboratorio de la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de curtido.	34
2.3.2.2. Cálculo de la velocidad de sedimentación $\text{Cr}(\text{OH})_3$	35
2.3.2.3. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio.	36
2.3.2.4. Caracterización del sobrenadante obtenido del tratamiento propuesto al residual de la etapa de curtido antes de ser vertido.	36
2.3.3. Evaluación experimental a escala de laboratorio del Residual de Teñido.	37
2.3.3.1. Balance de masa a escala de laboratorio.	39
2.3.3.2. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio.	39
2.3.3.3. Caracterización final del residual antes de ser vertido.	39
Capítulo 3: Escalado a nivel de planta piloto y evaluación económica de la tecnología de tratamiento de residual líquido en la tenería “Patricio Lumumba” de Caibarién.	41
3.1. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.	41
3.1.1. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos del proceso de pelambre.	41
3.1.1.1. Planta de Oxidación de Sulfuros.	41

3.1.2. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento al residual líquido del proceso de curtido.	44
3.1.3. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento al residual líquido del proceso de teñido.	47
3.2. Análisis económico de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos de los procesos de pelambre, curtición y teñido de la tenería "Patricio Lumumba" en Caibarién.	50
3.2.1. Costo de adquisición del equipamiento.	51
3.2.2. Cálculo del Costo Total de Inversión.	53
3.2.3. Cálculo del Costo Total de Tratamiento.	54
3.2.4. Ingresos por venta de hidroxido de cromo (III) generado en la planta de tratamiento al residual del proceso de curtido.	55
3.2.5. Evaluación de las externalidades.	56
3.2.6. Evaluación de los Indicadores dinámicos VAN, TIR, PRD.	58
Conclusiones.	59
Recomendaciones.	60
Referencias bibliográficas.	61
Anexos	66

Introducción.

El curtido de cueros es una de las profesiones más antiguas del mundo y tiene que ver con el procesamiento de pieles de animales para utilizarlas en numerosos productos tales como zapatos, ropa, muebles y asientos para automóviles. Las curtiembres producen diferentes tipos de productos de cuero dependiendo de las necesidades del consumidor y de sus necesidades como empresa.

El sector industrial tiene un papel fundamental en el desarrollo sostenible de los recursos que emplea. A pesar de ello, como consecuencia de la expansión de la producción industrial debida al aumento del consumo por parte de la población, se ha producido un aumento de las emisiones industriales de todo tipo. Concretamente, en el ámbito industrial la contaminación de las aguas residuales es uno de los mayores problemas tanto económicos como medioambientales.

A nivel industrial, las aguas residuales generadas por la industria de curtidos se encuentran entre las más problemáticas por el elevado consumo de agua que se necesita y por las características que presentan estas aguas, principalmente elevada carga orgánica y presencia de metales pesado (cromo) por lo que requieren de tratamiento antes de su vertido.

El costo del tratamiento aumenta en función del grado de contaminación de las aguas residuales, que deben ser depuradas cumpliendo los límites legales que fijan las autoridades. Por esto en muchos casos se requiere una elevada inversión y el costo para el tratamiento de estas aguas afectan al precio del producto influyendo por tanto en la competitividad de la empresa. Por tanto se debe llegar a una solución de compromiso entre los costos debidos al tratamiento de las aguas y el cumplimiento de los estándares ambientales. Además las exigencias legislativas, la demanda del mercado y la necesidad de rentabilizar las inversiones, contribuyen en gran medida a la generación de avances tecnológicos y consecuentemente nuevas vías de desarrollo para la industria. Todo ello conduce a plantearse posibles mejoras o introducir nuevos procesos que ayuden a cumplir con las leyes que satisfagan simultáneamente la exigencia de beneficios que supone el buen funcionamiento de una empresa.

Durante muchos años se han estudiado e introducido diversos métodos que incorporan mejoras al proceso de depuración de aguas residuales, aunque ciertos métodos de

probada eficacia sobre determinados efluentes resultan ser del todo inapropiados e insuficientes sobre otros de origen diferente. En la actualidad, el tratamiento de las aguas residuales de la industria tenera es un problema aún no resuelto, debido a que las elevadas concentraciones de materia orgánica y sales dificultan considerablemente el proceso.

Problema.

No se ha establecido una tecnología para el tratamiento de los residuales líquidos de la tenería Patricio Lumumba capaz de reducir en ellos la carga contaminante a los niveles establecidos por las normas de vertimiento.

Hipótesis.

Si se diseña una tecnología para el tratamiento de los residuales líquidos generados en la tenería Patricio Lumumba en Caibarién, se reducirían los contenidos de contaminantes en los residuales líquidos a niveles permitidos por las normas de vertimiento antes de su disposición al cuerpo receptor.

Objetivo General.

Establecer una tecnología para el tratamiento de los residuales líquidos en la Tenería Patricio Lumumba. Caibarién y su escalado a nivel de planta piloto.

Objetivos Específicos.

- ✚ Realizar una revisión bibliográfica acerca del estado de los residuales líquidos vertidos en el proceso de curtición de pieles y el impacto que causa el vertimiento al ecosistema.
- ✚ Caracterizar los residuales líquidos vertido en el proceso de pelambre, curtido y teñido en la tenería.
- ✚ Proponer la tecnología requerida para el tratamiento de los residuales líquidos generados en el pelambre, curtido y teñido, así como su escalado a nivel de planta piloto.
- ✚ Realizar el análisis económico a las alternativas propuestas.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

En los últimos años se constata un aumento de la preocupación a nivel mundial por la generación industrial de desechos peligrosos, así mismo ha crecido el interés con respecto a la deposición de dichos residuales. **(Seoanez Calvo, 2000)**

Los efectos a largo plazo de dichos residuales al ser vertidos a los cuerpos receptores aledaños son alarmantes, debido a la carente biodegradabilidad de estos residuos peligrosos que en ocasiones tienen alto grado de toxicidad.

Los residuales líquidos o aguas residuales constituyen la combinación de agua y residuos procedentes de residencias, instituciones públicas y establecimientos industriales, agropecuarios y comerciales, a los que pueden agregarse de forma eventual determinados volúmenes de aguas subterráneas, superficiales y pluviales. Son esencialmente aquellas aguas de abasto cuya calidad se ha degradado por diferentes usos. **(www.medioambiente.cu)**

1.1. Impactos ambientales de los residuos líquidos.

Los impactos ambientales de los principales constituyentes de los residuales líquidos se resumen a continuación:

- Los altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno en las aguas naturales, como resultado de las descargas de residuales ricos en materia orgánica, llevan al decrecimiento del oxígeno disuelto y al desarrollo de condiciones sépticas, frecuentemente causa la muerte de la biota acuática.
- Las grasas y aceites causan problemas en el funcionamiento de las redes de alcantarillado y plantas de tratamiento. Cuando flotan en la superficie de las aguas receptoras interfieren con la aireación natural, pueden ser tóxicas a ciertas especies de peces y de vida acuática, crean peligro de fuego cuando están en suficiente cantidad en el agua, destruyen la vegetación a lo largo de las orillas de los cuerpos receptores y reducen los usos recreativos.

- La temperatura tiene gran influencia en los procesos químicos y biológicos en las aguas superficiales, especialmente en los niveles de oxígeno, fotosíntesis y producción de algas, así como en la biota acuática, particularmente en los peces.
- La acidez del agua, medida como pH, afecta el balance químico y ecológico de los cuerpos receptores y es un factor limitante para ciertos usos del agua.
- El exceso de nutrientes puede causar eutrofización en las aguas naturales.
- Altas concentraciones de nitratos en el agua para consumo son tóxicas para los niños menores de 6 meses de edad.
- Las descargas de residuales líquidos provenientes de asentamientos humanos e instalaciones pecuarias transportan una variedad de organismos patógenos como bacterias, virus, helmintos y protozoos, que son causa de numerosas enfermedades y muertes en los países en desarrollo.
- Los efluentes con altas concentraciones de sólidos disueltos crean problemas de incrustación y corrosión en los sistemas de conducción y causan importantes afectaciones si se descargan al alcantarillado público o se reúsan.
- Los sólidos suspendidos pueden afectar significativamente el uso del agua, estos limitan la penetración de la luz y la vida útil del reservorio, dañan el hábitat de los bentos al generar condiciones anaerobias en el fondo de los lagos, ríos y mares y afectan la vida acuática, desde el fitoplancton hasta los peces.
- Los compuestos orgánicos volátiles liberados a la atmósfera pueden implicar riesgos para la salud pública, conducen a la formación de oxidantes fotoquímicos y pueden afectar la salud de los trabajadores de los sistemas de alcantarillado y de las plantas de tratamiento de residuales líquidos.
- El impacto de los residuales industriales, en específicos aquellos que contienen metales pesados y sustancias químicas orgánicas, es particularmente severo, debido a la persistencia de estos contaminantes, a sus efectos dañinos a bajas concentraciones y a su capacidad para entrar en la cadena alimentaria. (**www.medioambiente.cu**)

1.2. Proceso de producción de cuero.

La industrialización de las pieles que se utilizan en la elaboración de diversos objetos de piel con valor comercial, en forma genérica se conoce como *Proceso de Curtido*. El proceso completo se puede clasificar, básicamente en cuatro etapas; Ribera, Curtido, Recurtido- Teñido – Engrase y Acabado. **(Midha, 2008)**

1.2.1. Ribera.

El objetivo de la etapa consiste en acondicionar la piel para la etapa de curtición. Es la etapa que presenta el mayor consumo de agua y su efluente presenta un elevado pH.

1.2.2. Curtido al cromo.

La piel que procede de la etapa de ribera, apta para curtir se introducen en los bombos de curtición, con el propósito de que el cromo trivalente se penetre en el colágeno del cuero.

1.2.3. Recurtido- Teñido – Engrase.

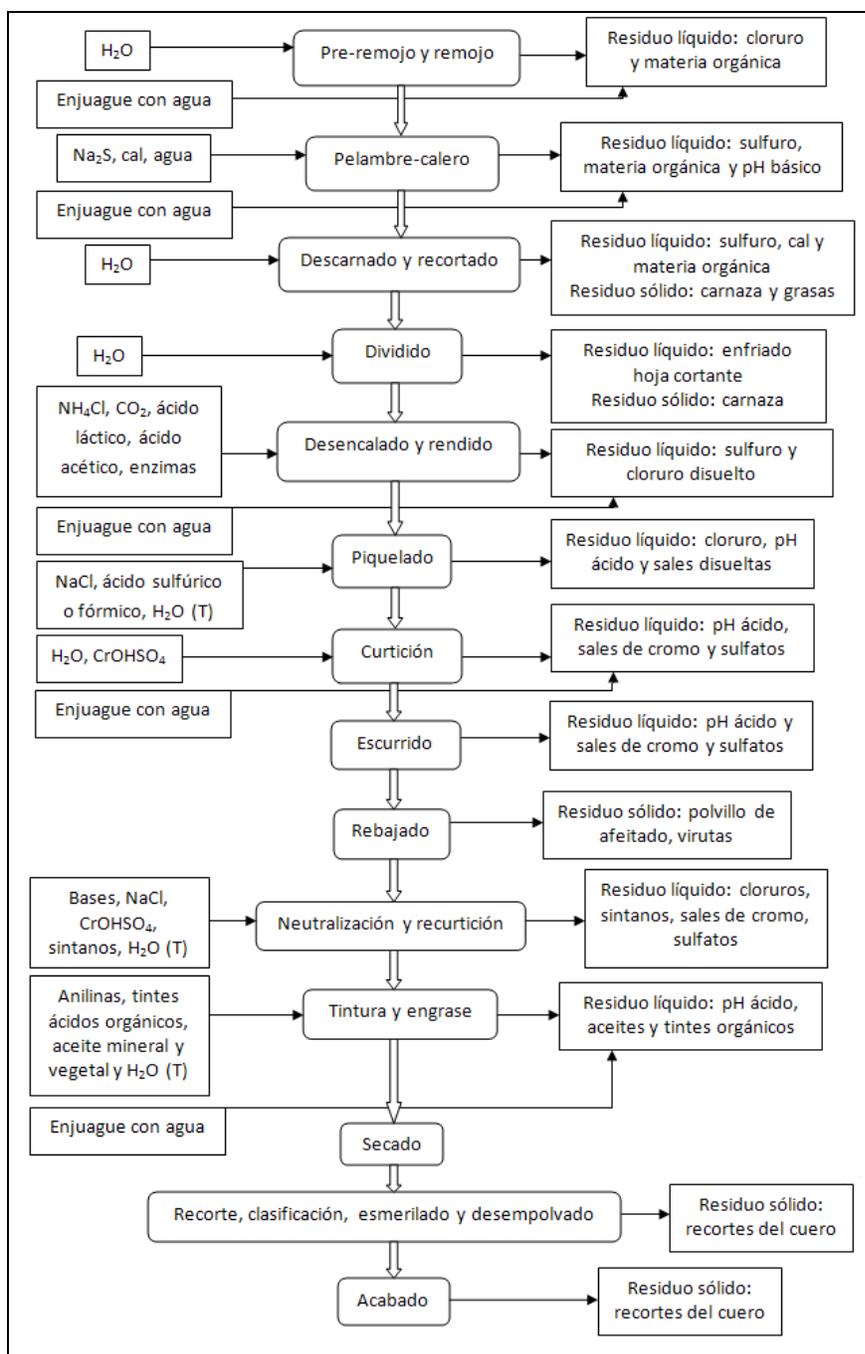
Esta etapa consiste en la adición de curtientes, similares o iguales a los que se utilizan en la curtición con el fin de dotar a la piel curtida de las características requeridas para definir un artículo determinado. Se lleva a cabo en los bombos de tintura y engrase. Las aguas residuales procedentes de esta etapa presentan un pH de 4,4.

1.2.4. Acabado.

Los procesos de acabado suelen tratarse de la aplicación de productos sobre la flor para conseguir el aspecto final requerido para la piel según su uso final, modas o exigencias del cliente.

1.3. Residuales generados en el proceso de curtido.

En el proceso de curtido de cueros al cromo se generan residuales sólidos, líquidos y gaseosos, de impacto ambiental significativo. En la Figura 1.1 se describen los residuales vertidos durante las etapas del proceso de curtición **(SEMARNAP, 1999)**.



Fuente: (Balaguer, Arnandis, 2006)

Figura 1.1. Residuales vertidos en las etapas del proceso de curtición de cuero. Según plantea (Gómez, J., Etcheverry, A., 2010) las aguas residuales del proceso de curtición son vertidas a los cuerpos receptores con cargas de proteínas solubles liberadas por los cueros y con remanentes químicos de los productos utilizados. La

mayoría de estos residuales presentan un impacto negativo al medioambiente y a la salud humana, de ahí la importancia de su tratamiento antes de ser vertidos.

Los residuales líquidos de mayor impacto son generados en los procesos de pelambre, curtición y teñido; dada la cantidad en el vertido y su gran toxicidad, según se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Aportación de cada proceso a la contaminación total en una tenería.

PARÁMETROS	PROCESO					
	Remojo (%)	Pelambre (%)	Desencalado Rendido (%)	Piquelado Curtición (%)	Resto (%)	Total (%)
DBO5	10	70	3	2	15	100
DQO	15	55	3	2	25	100
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	5	55			40	100
SALINIDAD	60	-	8	25	7	100
TOXICIDAD	-	76	-	24	-	100

Fuente: (Salmerón, J., 1995)

1.3.1. Proteínas y diferentes clases de sustancias orgánicas e inorgánicas.

Entre las sustancias contaminantes presentes en el residual de la tenería se encuentran las sustancias orgánicas que consumen oxígeno del medio a donde se descargan. Esta contaminación orgánica es expresada como demanda química/bioquímica de oxígeno, en términos de DBO y DQO. De ser muy elevada, puede resultar en un daño a la fauna del medio receptor. (Salmerón, J., 1995)

El cromo, utilizado en el proceso de curtido de pieles, presenta como problema principal la posibilidad de transformación del cromo (III) en cromo hexavalente por oxidación, este último resulta ser más móvil y más tóxico. El cromo trivalente, que es utilizado en curtiembres se convierte en hidróxidos insolubles en el agua y estas sales envejecen y se vuelven cada vez menos solubles, permaneciendo solo una pequeñísima parte en solución. Además solo una pequeña parte de sales de cromo trivalentes puede ser absorbida por las plantas, por lo que el cromo no puede acumularse en la cadena alimentaria. La inquietud principal es que si bien se conocen los efectos del cromo a

corto plazo, es muy difícil prever las consecuencias en un mediano y largo plazo. **(www.cueronet.com)**

Productos químicos relativamente inofensivos, como los cloruros y sulfatos, se están volviéndose cada vez más problemáticos para las curtiembres porque las cantidades que se descargan en el medio y el hecho de que es extremadamente costosa su remoción causan serios problemas en la forma de salinización de aguas superficiales.

Los recortes de cuero crudo son un riesgo desde el punto de vista ecológico para las curtiembres ya que constituye un elemento que entra rápidamente en putrefacción y que no puede ser procesado ni aprovechado por la curtiembre.

Los residuos sólidos cromados, provenientes de recortes y rebajaduras de cuero curtido. La mayor parte de los residuos sólidos tienen un contenido de cromo tan elevado que son considerados tóxicos y deben descargarse únicamente en sitios especialmente destinados a tales efectos. **(Gil, J., 2012)**

1.4. Tecnologías que generan residuales con Cromo. (SEMARNAP, 1999)

1.4.1. Procesos de curtición.

El proceso de curtido de la piel, en el cual se utilizan diferentes agentes curtientes que penetran la estructura para estabilizar las fibras de colágeno. Se pueden usar agentes curtientes minerales o vegetales, aunque la producción mundial de cuero utiliza mayoritariamente las sales minerales a base de cromo (sulfato de cromo $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$, sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$ u óxido de cromo Cr_2O_3) que hidrolizan en medio acuoso para producir diversas especies dependiendo del pH. Gracias a la estabilización del colágeno, las fibras ya no se adhieren tan estrechamente entre sí con lo que la piel adquiere flexibilidad y mayor suavidad. Asimismo, se vuelve capaz de resistir temperaturas mayores a 80°C sin gelatinizarse o descomponerse. **(Rey de Castro, A.C., 2013)**

1.4.2. Procesos galvánicos.

Más de la mitad de la producción total de cromo se destina a productos metálicos, y una tercera parte es empleada en refractantes. Principalmente se utiliza en la creación de

aleaciones de hierro, níquel o cobalto. Al añadir el cromo se consigue aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión de la aleación. En los aceros inoxidable, constituye el 10% de la composición final. Debido a su dureza, la aleación de cromo, cobalto y wolframio se emplea para herramientas de corte rápido de metales. Al depositarse electrolíticamente, el cromo proporciona un acabado brillante y resistente a la corrosión (cromado). Debido a ello se emplea a gran escala en el acabado de vehículos. El amplio uso de la cromita como refractante se debe a su alto punto de fusión, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura cristalina. **(Sardiñas, R., 2006)**

1.4.3. Otras tecnologías.

El cromo se utiliza como catalizador en la síntesis del amoníaco. Los complejos orgánicos encuentran aplicación como colorantes de revelado en la fotografía color, los compuestos inorgánicos del cromo se utilizan como pigmentos para pinturas. Las sales de cromo VI se utilizan ampliamente para la preservación de la madera. **(Gómez, S., 2008)**

Dentro de los intervalos de los potenciales redox y el pH que se encuentran comúnmente en los suelos, el cromo existe predominantemente como oxianiones de Cr (III) y Cr (VI). El Cr (VI) es un fuerte oxidante y solo existe en especies oxigenadas que son muy solubles y dependientes del pH. **(Azario, R., 2014).**

Como resultado del proceso de reducción, el Cr^{6+} se transforma a Cr^{3+} . Este catión, al pH del medio natural precipita como hidróxido, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, que suele formarse en estado coloidal, con lo que permanece en suspensión o bien se adhiere a otras partículas sólidas mayores, precipitando e incorporándose en el sedimento. No obstante, si el pH es menor a 5, el ion Cr^{3+} no precipita, manteniéndose en disolución. La oxidación del Cr^{3+} a Cr^{6+} es poco frecuente. De las dos especies, el Cr^{6+} es la más altamente tóxica. El Cr^{6+} es de naturaleza aniónica y no es fuertemente adsorbido por el sedimento o la materia particulada, por ello es más móvil que el Cr^{3+} y no es propenso a sedimentar. Tiene tendencia a reaccionar fuertemente con sustancias oxidables, moléculas orgánicas normalmente y formar Cr^{3+} . Si el agua contiene poco material orgánico, el Cr^{6+} puede permanecer disuelto en ella durante largos períodos de tiempo. **(Facetti, J., et al., 1998).**

1.5. Toxicidad del cromo.

Los seres humanos pueden exponerse al cromo al respirarlo, ingerirlo o por vía tópica. La principal vía de entrada de cromo al organismo humano es a través de los vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos. En concentraciones excesivas puede causar efectos perjudiciales a la salud tales como: lesiones cutáneo-mucosas, afección respiratoria, afecciones digestivas, acción cancerígena o bien efectos mutagénicos. **(Horton, R., et al., 2006).**

El cromo (III) constituye un nutriente necesario para el metabolismo de la glucosa, las proteínas y las grasas en los mamíferos. Las señales de deficiencia en el ser humano incluyen la pérdida de peso y la reducción de la capacidad del organismo para extraer la glucosa de la sangre. El cromo se encuentra primariamente en estado trivalente (III) o en el estado hexavalente (VI), el cual es un agente fuertemente oxidante. El cromo trivalente es un metal esencial necesario para la formación del factor de tolerancia a la glucosa y el metabolismo de la insulina. El cromo hexavalente es un irritante de piel y mucosas, con acción corrosiva en altas concentraciones. El cromo hexavalente también produce dermatitis alérgica de contacto. Estos compuestos hexavalentes son los de mayor toxicidad, se absorben bien por todas las vías, incluso la cutánea. El cromo hexavalente penetra en las glándulas sudoríparas y es reducido a cromo (III) que se liga a las proteínas y forma complejos antígeno-anticuerpo. Las sales de cromo trivalente (óxidos, sulfato) tienen un menor potencial de absorción, menor acción irritativa y la sensibilización es menos frecuente. **(Tomasina, F., et al., 2005).**

Aunque los efectos tóxicos del cromo trivalente son menores a los del cromo (VI), conocido cancerígeno, éste puede ocasionar manifestaciones agudas y crónicas en las personas que hayan estado en contacto directo. En relación con los efectos sobre el medio ambiente acuático, el cromo trivalente puede ser oxidado a la forma hexavalente a un pH entre 5.5 y 6, proceso que es favorecido por la presencia de óxido de manganeso. **(Sánchez, J., et al., 2001).**

Los residuos líquidos contaminados por cromo son uno de los más dañinos para el medio ambiente pues es un metal que al estar compactado es sumamente resistente. No se oxida ni al aire húmedo ni al aire seco y aún calentado con bastante intensidad se oxida sólo en pequeño grado. **(Pérez, Y., 2005).**

En vista de los efectos tóxicos del cromo, sus concentraciones son estrictamente controladas y reguladas por normativas gubernamentales en las industrias que lo utilizan, antes de su descarga final. Los tratamientos que se realizan en las industrias a los efluentes con cromo son la reducción química para transformar todo el cromo (VI) a cromo (III) o fijarlo a una resina de intercambio aniónico de tamaño industrial. **(Montauban, R., 2013).**

El cromo trivalente presente en los residuos de piel curtida puede sufrir modificaciones en sus propiedades químicas según el ambiente en que se encuentre. De hecho, cuando está en un medio básico o se combustiona en presencia de cal u otra sustancia alcalina tiende a transformarse a cromo hexavalente, forma mucho más tóxica de este metal. **(Pérez, Y., 2005).**

De acuerdo al análisis de toxicidad del cromo, es importante conocer los métodos de detección y las diferentes formas que existen para su eliminación pues constituye un metal pesado altamente contaminante.

1.6. Impacto del cromo en los seres vivos.

El Cromo es un nutriente esencial para los seres humanos, la falta de este puede provocar afectaciones al sistema cardiovascular, trastornos metabólicos y diabetes. **(Ortiz, N., 2013)** Mientras que una concentración excesiva puede causar efectos perjudiciales a la salud tales como:

1.6.1. Lesiones cutáneo-mucosas.

La lesión cutánea característica son las úlceras del cromo, esto ocurre especialmente cuando el cromo se deposita en una abrasión de la piel. **(www.medioambiente.cu)**

En el ámbito ocular se produce conjuntivitis con lagrimeo. En la córnea puede aparecer una coloración pardusca, debido a la formación de óxido de cromo.

1.6.2. Dermatitis ezematiforme.

Dentro de las lesiones cutáneas producidas por el cromo son mucho más frecuentes las dermatitis ezematiformes profesionales por contacto. En cuanto a la patogenia de estas lesiones: el cromo penetra en la piel a través de glándulas sudoríparas reduciéndose el

dicromato a cromo trivalente el que reacciona con las proteínas para formar el complejo antígeno-anticuerpo.

1.6.3. Afección respiratoria.

La inhalación de cromo, producen la irritación del aparato respiratorio con irritación faríngea, laringitis, rinitis crónica.

1.6.4. Afecciones digestivas.

Se presentan trastornos de tipo gastroenteritis; también erosión y decoloración de los dientes con coloración amarillenta, descenso del gusto, aumento de la incidencia de úlceras gástricas y gastritis hipertrófica.

1.6.5. Acción cancerígena.

La incidencia de cáncer bronco pulmonar es de mayor probabilidad; también existe la probabilidad de la incidencia de cáncer gástrico y de laringe.

1.6.6. Efectos Mutagénicos.

Según los estudios efectuados en trabajadores expuestos a cromo es probable el aumento de aberraciones cromo-somáticas en los linfocitos.

Las plantas solo absorben Cromo (III) y al igual que al organismo humano le es favorable en bajas concentraciones, cuando sobrepasa los límites permisibles se pueden constatar efectos negativos.

No se conoce que el Cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de este metal en cuerpos de agua provoca deformaciones en las branquias de aquellos que habitan cerca de las zonas de vertimiento. En otras formas de vida acuática el Cromo puede causar problemas respiratorios, defectos de nacimiento, infertilidad, formación de tumoraciones.(www.lenntech.com)

El cromo es un metal pesado que se acumula en el suelo. Los seres humanos y los animales están expuestos al cromo vía inhalación (en el aire o en el humo de tabaco), a través de la piel (exposición ocupacional) o por ingestión (generalmente de productos

agrícolas o en el agua). La toxicidad sistemática del cromo se debe especialmente a los derivados hexavalentes que, contrariamente a los trivalentes, pueden penetrar en el organismo por cualquier vía con mucha mayor facilidad. No obstante, también se han documentado riesgos importantes asociados al cromo trivalente. A pesar de necesitarse concentraciones mayores para producir los mismos efectos biológicos del cromo (III) al cromo (VI), principalmente porque no tiene tanta facilidad para penetrar en el organismo, existe poca evidencia para afirmar que el cromo (III) no tiene efectos genotóxicos *in vivo* en animales. Algunos de los riesgos más señalados se refieren a que la capacidad de los agentes curtientes para estabilizar el colágeno, que es precisamente la base del curtido, abre la posibilidad de que esos mismos agentes puedan interactuar con la estructura de doble hélice del ADN. Todas las formas de cromo, incluyendo cromo (III), causan cáncer a roedores, por lo que se consideran probables cancerígenos para seres humanos. Uno de los riesgos más manifestados son efectos sobre la piel por la exposición crónica. Los análisis de orina no constituyen un buen indicador de las concentraciones de cromo trivalente, sino que resulta necesario realizar análisis de sangre o del pelo. **(Covington, A., 1997, Dionisio, E., 2012, Gutierrez, D.S., 2007)**

El cromo trivalente presente en los residuos de piel curtida puede sufrir modificaciones en sus propiedades químicas según el ambiente en que se encuentre. De hecho, cuando se encuentra en un medio básico o se combustiona en presencia de cal u otra sustancia alcalina (frecuente al utilizar lechada de cal y similares para neutralizar las emisiones ácidas NO_x y SO₂ en una incineradora) tiende a transformarse a cromo hexavalente, forma mucho más tóxica de este metal.**(Tomasina, F., et al., 2005)**

1.7. Contaminación con sulfuros.

Sulfuro, anión altamente tóxico que debido a su carácter reductor en medio acuoso provoca una drástica disminución del oxígeno disuelto en el agua, lo que afecta a la vida acuática. Cuando a las soluciones acuosas que lo contienen se les baja el pH se desprende sulfuro de hidrógeno que, al ser inhalado en determinadas concentraciones, puede llegar a ser mortal.

El sulfuro y sulfuro ácido (H_2S) están presentes en la solución de pelambre, en menor o mayor cantidad, dependiendo del pH de la solución y de la concentración inicial del sulfuro de sodio. Las condiciones de basicidad o acidez harán que la reacción genere una mayor o menor concentración de estas especies. Mientras más alto sea el pH, existirá mayor concentración de sulfuro y menor de sulfuro ácido y viceversa. La presencia de sulfuro en la operación de pelambre explica que esta operación, por sí sola, sea responsable de la mayor parte de la toxicidad total del efluente, en la forma de sulfuro, dado que el pH en el agua de pelambre es de 13. **(Salas, C., 2005)**

1.7.1. Impacto de los sulfuros a la salud de los seres vivos.

Muchos sulfuros son significativamente tóxicos por inhalación o ingestión, especialmente si el ion metálico es tóxico. Por otro lado muchos sulfuros, cuando se exponen a la acción de un ácido mineral fuerte, liberan sulfuro de hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno, denominado ácido sulfhídrico en disolución acuosa (H_2S_{aq}), es un hidrácido de fórmula H_2S . La toxicidad del ácido sulfhídrico es semejante a la del ácido cianhídrico. La razón por la cual a pesar de la existencia más masificada de aquel compuesto causa relativamente pocos decesos es su mal olor. Sin embargo, a partir de 50 ppm, en las células receptoras del olfato provoca un efecto narcotizante, y las personas afectadas ya no perciben el hedor.

Después de 100 ppm puede ocurrir la muerte. Como la densidad del sulfhídrico es mayor que la del aire, suele acumularse en lugares bajos: pozos, etcétera, donde puede causar víctimas. A menudo suceden varios siniestros consecutivos: una primera persona cae inconsciente (luego víctima), después resultan afectados también todos los demás que, sin el equipo de protección necesario, acuden a su rescate. **(Facetti, J., et al., 1998, Gómez, S., 2008, Midha, V., 2008)**

El sulfhídrico parece actuar sobre todo en los centros metálicos de las enzimas: las bloquea y de este modo impide su funcionamiento. Para tratamiento se recomienda llevar al afectado lo más rápidamente posible al aire fresco y aplicar oxígeno puro.

Además el ion sulfuro (S^{2-}) se combina con la hemoglobina del mismo modo que el oxígeno, y acelera la asfixia del organismo.

La exposición a niveles bajos de ácido sulfhídrico puede producir irritación de ojos, nariz o garganta. También es factible que provoque dificultades respiratorias a personas asmáticas. Exposiciones breves a contenidos altos (mayores de 500 ppm) de ácido sulfhídrico pueden causar pérdida del conocimiento y posiblemente la muerte.

En la mayoría de los casos quienes pierden el conocimiento parecen recuperarse sin padecer otros efectos. Sin embargo algunas personas parecen sufrir efectos permanentes o a largo plazo, tales como dolor de cabeza, escasa capacidad de concentración, mala memoria y mala función motora.

No se han detectado efectos a la salud en personas expuestas al ácido sulfhídrico en los contenidos existentes típicamente en el ambiente (0,00011-0,00033 ppm). Los científicos no tienen información por la cual se demuestren fallecimientos de personas intoxicadas por ingerir ácido sulfhídrico. Cerdos que ingirieron alimentos que contenían H₂S sufrieron diarrea durante varios días y perdieron peso aun después de 105 días.

Los científicos poseen poca información acerca de qué sucede cuando la piel de una persona se expone al ácido sulfhídrico. Sin embargo se sabe que es necesario ser precavidos con el ácido sulfhídrico líquido comprimido, ya que puede causar quemaduras de la piel por congelación.

A pesar de la alta toxicidad del gas sulfhídrico en los mamíferos, muchos microorganismos toleran elevados contenidos de este gas, o incluso se alimentan de él. Hay teorías en las que se relaciona la metabolización del gas sulfhídrico como existe por ejemplo cerca de fuentes volcánicas subacuáticas con el desarrollo de la vida en la Tierra. (es.wikipedia.org)

1.8. Estructura y clasificación de los colorantes.

La estructura de los colorantes presenta dos componentes esenciales; el grupo cromóforo, responsable de producir el color, y el auxócromo, que además de complementar al grupo cromóforo, también puede aumentar la solubilidad de la molécula en el solvente y su afinidad hacia el material a teñir (**Gupta, V.K., 2009**). Generalmente, los cromóforos están representados por carbono, oxígeno, nitrógeno y sulfuro

(Pigmens.,D., 2010). Distintas configuraciones cromofóricas incluyen azo (-N=N-), carbonil (=C=O), carbono (=C=C=), carbono-nitrógeno (-H=N-), nitroso.

(-NO; N-OH), nitro (-NO₂ o =NO-OH) y sulfuro (C=S).

Los colorantes se caracterizan por absorber o emitir luz en el rango visible (400-700 nm) **(Zollinger, H., 2003)**. Si bien se desconoce con exactitud la cantidad de colorantes producidos a nivel mundial **(Forgacs, E.C., 2004)**, cerca de 40,000 colorantes y pigmentos han sido enumerados definiéndose 7.000 estructuras químicas diferentes; según su origen se pueden clasificar en naturales o artificiales. Los colorantes naturales, que son los obtenidos de fuentes animales o vegetales, se consideran en general como inócuos y consecuentemente las limitaciones específicas en su utilización son menores que las que afectan a los colorantes artificiales que tienen como desventaja notoria la complejidad con la que se encuentran en la naturaleza **(Domínguez, A., 2005)**.

Se pueden clasificar en base a distintos criterios: a) basado en su forma de ionizarse pueden ser ácidos, básico y neutros; b) de acuerdo con su aplicación: al rayón, tinados, de azufre, etc.; c) en función de su solubilidad en agua pueden ser colorantes solubles: con complejos metálicos, mordaz, directos, básicos y ácidos e insolubles: azoicos, azufrados y dispersos **(Gupta, V.K., 2009)**; d) en base a su estructura: colorantes azo, de antraquinona, de fenotiazida, etc. Este último criterio presenta como ventajas la facilidad para identificar a qué grupo determinado pertenece cada colorante y que cada grupo suele presentar propiedades químicas y físicas semejantes **(Gupta, V.K., 2009)**.

Según el modo de aplicación se pueden clasificar en:

Ácidos: compuestos solubles en el agua, en su mayoría contienen grupos ácido sulfónico o carboxilo. Pueden ser aplicados en lana y seda.

Básicos: son sales de ácidos minerales, contienen grupos básicos como los aminos y los dietil amino. Compuestos solubles en agua que forman especies catiónicas.

Directos: compuestos solubles en agua. Se aplican en presencia de electrólitos adicionales.

Dispersos: compuestos no iónicos insolubles en agua.

Reactivos: contienen grupos reactivos los cuales se combinan químicamente con la celulosa formando enlaces covalentes. Reaccionan en presencia de electrólitos.

Colorantes de tina: en su forma oxidada son insolubles en agua y al ser reducidos dan origen a una especie soluble usada para teñir.

Mordientes: compuestos que forman complejos con metales. **(Lankford, P., et al., 1990, Martínez, P., 2004, Molina, .C., 2013, Normalización, 2012)**

1.8.1. Impacto que provocan los colorantes al ecosistema.

Los colorantes son utilizados en industrias textiles, farmacéuticas, de alimentos, entre otras para dar color a sus productos finales, aunque una gran proporción de los que se vierten no es tóxica para los organismos vivos, trae efectos desfavorables debido a que la fuerte coloración presente en los cuerpos de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos. **(www.lenntech.com)**

La presencia de colorantes en efluentes es motivo de preocupación debido a sus efectos adversos en muchas formas de vida. Se estima que existen más de 100,000 colorantes disponibles en el mercado con una elevada producción anual **(Ravi, K., 2005).**

La percepción pública de la calidad del agua, está realmente influenciada por el color ya que es el primer contaminante en ser reconocido en las aguas residuales incluso a concentraciones menores a 1 mg g⁻¹ **(Robinson, T., 2002)**, la mayoría de las moléculas de colorantes son de origen sintético, con estructuras muy variadas y complejas. Algunas de las propiedades que presentan estas moléculas son: alta solubilidad en agua, alta resistencia a la acción de agentes químicos y son poco biodegradables **(Han, R., 2007.).**

Los colorantes son generalmente tóxicos o carcinogénicos, o derivan de carcinógenos conocidos, y su descarga en los cursos de agua como desechos industriales resulta en condiciones anóxicas para los ecosistemas acuáticos, debido a la reducción de la concentración de oxígeno disuelto **(Kahaled, C., 2009).**

Estos motivos determinan que el tratamiento y disposición de los residuales coloreados sea una obligación para la protección del medio ambiente y las futuras generaciones.

1.9. Tratamientos convencionales de residuales de una tenería.

En España, la industria de la curtición viene a verter aproximadamente el 80% de sus efluentes a la red de colectores y el 20% tiene vertido directo o indirecto a cauce superficial. Es importante tener en cuenta que el tipo de tratamiento a aplicar para cumplir con los límites que dicta la legislación dependerá del caudal de aguas residuales a tratar. De este modo, para caudales inferiores a 500 m³/día o comprendidos entre 500-1500 m³/día, se recomienda un tratamiento, que conste fundamentalmente de las etapas de homogeneización-floculación-decantación. Para aguas más complejas o que serán vertidas en ecosistemas acuáticos, se le añadiría un tratamiento biológico y además tratamiento terciario. **(Balaguer, Arnandis, 2006)**

1.9.1. Homogeneización-Neutralización

Con el objetivo de homogeneizar las propiedades del agua residual es necesaria una etapa de homogeneización. Se lleva a cabo en depósitos dotados de un agitador mecánico y difusores de aire para facilitar la homogeneización de las aguas alcalinas y ácidas.

Por otra parte, con ello se consigue ajustar el pH al óptimo para llevar a cabo la posterior etapa de coagulación-floculación. En caso de que fuera necesario se adiciona H₂SO₄ para reducir el pH o cal viva o hidratada o NaOH para aumentarlo. **(Lankford, P., et al., 1990, Molina, C., 2013, Rey, A., 2013)**

1.9.2. Coagulación-floculación

Para eliminar las partículas en suspensión caracterizadas por su gran estabilidad (puesto que se repelen entre ellas por estar cargadas en general negativamente) y por tanto poca sedimentabilidad, se emplean procesos de coagulación-floculación haciendo que aumente la sedimentabilidad de estas partículas.

Mediante la coagulación se consigue neutralizar las cargas eléctricas de una suspensión coloidal, de forma que las partículas coloidales empiezan a agregarse. Los coagulantes más extendidos son FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃ y el Al₂(SO₄)₃. Durante la coagulación es necesario

mantener una cierta agitación para favorecer el contacto entre el coagulante y las partículas coloidales.

La floculación permite favorecer la agrupación de dichas partículas ya descargadas, formando agregados de mayor tamaño denominados flóculos acelerándose así la sedimentación. Para ello generalmente se adicionan polielectrolitos, compuestos por moléculas orgánicas poliméricas que forman puentes entre las partículas. En este caso la agitación debe ser mucho más moderada que en la coagulación para evitar las roturas de los flóculos.

Para implantar tanto esta etapa como la etapa de ajuste de pH es necesario llevar a cabo ensayos "Jar-Test" a escala de laboratorio, mediante los cuales se determinan tanto el pH de adición del coagulante, como las dosis óptimas tanto de coagulante como de floculante. **(Collivignarelli, C.B., 1984, Covington, A., 1997, Facetti, J., et al., 1998)**

1.9.3. Decantación

El objetivo de la decantación es la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual mediante sedimentación por acción de la gravedad. Se produce la sedimentación cuando la velocidad ascensional del agua es inferior a la velocidad de descenso de los sólidos.

Se lleva a cabo en un decantador, que puede ser de diversas geometrías y que además puede ser estático o dinámico, es decir dotado de una serie de elementos mecánicos para realizar la recogida de los flotantes y para conducir los fangos decantados hasta la zona de extracción. **(Abia, L., 2003b, Abia, L., 2003c, Abia, L., 2003a, Molina, C., 2013)**

1.10. Alternativas para el tratamiento de residuales con sulfuro.

Concretamente en el caso de las tenerías, antes de llevar a cabo la homogeneización de las aguas con el correspondiente ajuste de pH, se debe realizar la oxidación de los sulfuros generados en la fase de pelambre. Por tanto deben ser conducidas a un tanque agitado en el que se produce dicha oxidación a través de la inyección de aire mediante difusores. **(Salmerón, J., 1995)**

1.10.1. Precipitación e insolubilización de los sulfuros por formación de FeS.

Consiste en la separación y aislamiento de los sulfuros, hasta la formación de un lodo deshidratable mecánicamente con obtención de un residuo sólido. Dicho sólido exige una gestión adecuada, tal como la inertización y deposición controlada de vertederos de seguridad. Alternativamente permite plantear la aplicación de técnicas de recuperación. Éstas se basarían en «stripping» ácido y la posterior recogida del H₂S desprendido. (www.df.gob.mx) (www.neutralac.com)

1.10.2. Oxidación química.

Permite la eliminación de sulfuros por transformación a azufre elemental insoluble, que es separado de la fase líquida. Este azufre presenta menores riesgos medioambientales y tóxicos que los sulfuros y permite la valorización del residuo, recuperando el azufre mediante lavados químicos y deshidratación. (Collivignarelli, C., 1984)

1.11. Tecnologías de recuperación de las sales de cromo.

Son diversas las tecnologías para la recuperación de sales de cromo, las cuales describe (Rey de Castro, A. C., 2013) en la Tabla 1.3.

Tabla 1.2. Métodos de recuperación de cromo de los efluentes del proceso de curtido.

Tipo de método de recuperación	Agente principal en la recuperación de cromo	Eficiencia del proceso de recuperación	Ventajas	Desventajas
Adsorción ²⁴	Carbón activado	13,8 mg Cr/g de adsorbente		Se necesita gran cantidad de adsorbente para retirar el cromo y grandes volúmenes de disolvente y/o energía para la desorción.
	Aserín	4,44 mg Cr/g de adsorbente		
	Carbón de cáscara de arroz	21 mg Cr/g de adsorbente		
	Lodos activados	--		
Bioadsorción	Algas marrones <i>Sargassum wightii</i>	Max: 35 mg Cr/g de adsorbente	En función de la zona, estos adsorbentes pueden estar disponibles en grandes cantidades. Algunos son desperdicios sólidos de diversos procesos industriales, por lo que su precio suele ser extremadamente bajo. Una vez absorbido el Cr, pueden ser utilizados para preparar soluciones de Cr o directamente utilizados en variantes del proceso de curtiembre.	Se necesita gran cantidad de adsorbente para retirar el cromo y grandes volúmenes de disolvente y/o energía para la desorción.
	Residuos de piel animal tratados con hierro	Max: 51 mg Cr/g de adsorbente		
	Pulpa de caña de azúcar	17,2 mg Cr/g de adsorbente		
	Lana	9 mg Cr/g de adsorbente		
	Mazorca de maíz	13,8 mg Cr/g de adsorbente		
	Cáscara de coco			
Intercambio iónico ¹⁵	Resina catiónica	40 mg Cr/g de adsorbente		Los métodos necesitan reactivos adicionales y grandes volúmenes de solventes. Las resinas son extremadamente caras y algunas requieren un proceso de activación. No son económicamente viables.
	Alúmina activada			
	Zeolitas			
Precipitación ^{5,1}	NaOH al 25% (p/v)	99%	Método sumamente simple y con alta eficiencia	Necesita otros reactivos adicionales para regular el pH. Incrementa costos operacionales. Bastante caro.
	Ca(OH) ₂	97-99%		
	Úrea	98-99%		
	MgO	--		
Membranas ²⁵	Membranas poliméricas de diversa composición. Según la membrana pueden servir para micro, ultra y nanofiltraciones.	--		La materia orgánica (DBO) y proteínas presentes pueden taponar las membranas y quitar eficiencia al proceso. Esto puede ser temporal o permanente.
Bioremediación	Diferentes cepas de bacterias	--		Las bacterias son muy sensibles al pH, concentración inicial del metal, presencia de contaminantes, temperatura.

Fuente: (Rey de Castro, A.C., 2013)

1.12. Escalado de reactores químicos.

El escalado es una tarea indispensable en toda actividad industrial. Ninguna planta de producción puede ser construida sin cálculos, estudios previos y demostraciones en

condiciones diferentes a la escala comercial. Por esa razón, sobra recalcar la importancia de un buen proceso de escalado, especialmente en las industrias química y bioquímica. Esta tarea involucra actividades de diversas áreas del conocimiento como el mercadeo, el diseño de producto, la evaluación del producto, el diseño de la planta y la construcción de la misma. **(Ruíz, A., 2009).**

En **(Bisio, A., Kabel, R., 1985)** se define el escalado como la “operación y puesta en marcha de manera exitosa de una unidad de tamaño comercial cuyo diseño y procedimiento de operación se basan, en parte, en la experimentación y demostración a una escala más pequeña de operación”.

En la definición de **(Kossen, N., 1994)** se plantea que “El escalado es el diseño y construcción de una unidad o conjunto de unidades de procesamiento a gran escala, en la cual se toman como base los cálculos y experimentos a pequeña escala”.

De manera general, el escalado se entiende como la instalación y operación de un equipo a escala de tamaño industrial, cuyo diseño y condiciones de operación se basan en parte en la experimentación y demostración a una menor escala. A menudo, estas condiciones no pueden mantenerse o siquiera aproximarse cuando se realiza el proceso para producción industrial. Esta es una de las dificultades del escalado, pues el comportamiento del proceso no se debe a un solo factor sino a una serie de factores. La complejidad del sistema y el nivel de conocimiento del mismo suelen fijar el denominado factor de escala, que será mayor cuanto mayor sean la seguridad y la experiencia del proceso en estudio. En cualquier caso, debe entenderse que el escalado es un proceso intrínsecamente complicado debido a la combinación de múltiples factores. **(Ruíz, A., 2009, Curbelo, A., 1993).**

El escalado se fundamenta en el llamado principio de semejanza o similitud. Este principio se refiere a las relaciones entre sistemas físicos de tamaños diferentes y es esencial para el cambio de escala de procesos químicos y bioquímicos. De manera general, los objetos y sistemas físicos poseen tres características: tamaño, forma y composición. Estas son independientes, puesto que, para un proceso específico, puede cambiar el tamaño y mantenerse la forma y la composición. El principio de semejanza está ligado al concepto

de forma, pues supone que la forma es independiente del tamaño y la composición. **(Ruíz, A., 2009)**.

Dentro de las relaciones de proporción más comunes en el escalado de reactores se encuentran:

Tabla 1.3. Relaciones típicas de escalado.

Sistema	Escala de operación (kg/h)		Razón de escalado	
	Laboratorio	Planta piloto	Laboratorio a planta piloto	Planta piloto a comercial
Gaseoso(NH_3 , CH_3OH)	0,01-0,1	10-100	500-1000	200-1500
Reactantes gaseosos, Productos Líquidos o Sólidos (Clorinación del benceno)	0,01-0,2	1-30	100-500	100-500
Reactantes líquidos, Productos Sólidos o Líquidos viscosos, (Polimerizaciones)	0,005-0,2	1-20	20-200	20-200
Reactantes Sólidos, Productos Sólidos (H_3PO_4 , Cemento)	0,1-1,0	10-200	10-100	10-200

Fuente: **(Rodríguez.I and Blázquez.G, 2010)**.

Según plantea **(Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010)**, si la reacción a gran escala se realiza de forma discontinua y hay seguridad en que tanto la transferencia de calor como el mezclado son solubles, no debe haber problemas con el escalado y no es necesario que la cinética de la reacción y el mecanismo sean determinados.

Principios de similitud:

Similitud mecánica: Se requiere de las similitudes geométricas, cinemática y dinámica.

Similitud térmica: Cuando la transferencia de calor juega un papel importante, la relación altura de llenado del reactor (H) /diámetro del reactor (D_r) debe permanecer constante tanto en el modelo como en el prototipo (similitud geométrica).

Similitud química: Dada generalmente por grupos adimensionales que caracterizan los fenómenos del proceso y que permanecen constantes durante el escalado.

1.12.1. Criterios frecuentes de escalado.

Según plantea **(Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010)**, existen varios criterios para el escalado de reactores.

Potencia del agitador/volumen (P/V) constante:

Este criterio es apropiado cuando la tarea fundamental es el mezclado del líquido. Se considera como uno de los criterios más usados **(Carpenter, K., 1986), (Smith, G., 1990)** sobre todo en procesos controlados por carga. El número de Reynolds se incrementa con el volumen acorde a P/V constante.

Coeficiente de transferencia de calor constante:

Este criterio es apropiado cuando el problema fundamental en el reactor es la eliminación del calor generado por la reacción. Este criterio se fundamenta en igualar las ecuaciones del coeficiente de transferencia de calor para ambos sistemas. Para arribar al mismo coeficiente de transferencia de calor, las facilidades de eliminación de calor deben incrementarse debido a que la generación de calor es proporcional a V_L/V_s , mientras que el incremento del área superficial de transferencia de calor solo se incrementa en $(V_L/V_s)^{2/3}$. En algunos casos el uso de un serpentín u otro dispositivo, adicional al reactor, contribuye a esto.

Velocidad de cizallamiento constante:

Este criterio mantiene constante la velocidad en los extremos de los agitadores. Muy usado en sistemas gas-líquido.

Número de Reynolds constante:

El mismo trae como consecuencia una disminución drástica de casi todos los elementos que componen el sistema de agitación, por tanto deberán calcularse las consecuencias en el escalado, por haberse adoptado ese criterio.

Tabla 1.4. Reglas y relaciones de escalado para reactores discontinuos.

<i>Reglas de escalado</i>	h'/h	<i>Observaciones</i>
<i>Similitud Dinámica (Re=constante)</i>	D/D'	Poco usado
<i>Tipo de agitador y velocidad de agitación constante</i>	$(D'/D)^{1-a}$	a = 0,67
<i>Coficiente constante</i>	1	$N'/N = (D/D')^{2-(1/a)}$
<i>Flujo calor/Volumen constante</i>	D'/D	$N'/N = (D/D')^{(2a-2)/a}$
<i>Potencia/volumen constante P/V=constante</i>	$(D'/D)^{1,33a-1}$	Poco cambio en h a=0,67

Fuente: (Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010),

Capítulo 2: Caracterización del sistema de tratamiento de los residuales líquidos de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.

La Empresa TENEVIC tiene su origen como Empresa en el año 1976, formada a partir de establecimientos independientes al Triunfo de la Revolución, agrupados en una Empresa Consolidada, que como productora de materia prima centró sus producciones en surtidos como: cueros vulcanizables, cueros engrasados, cueros laqueados, cuero a plena flor y rebajos. (Colectivo Autores, 2000).

2.1. Descripción del sistema de tratamiento de residuales líquidos de la tenería.

La tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién no cuenta con un sistema de tratamiento para los residuales líquidos, sólidos y gaseosos que se generan. Los residuales líquidos que se emiten en las etapas del proceso de curtición drenan a través de rejillas y alcantarillas de forma separada, estos residuales tienen naturaleza ácida y alcalina, posteriormente se unen a varios metros de la fábrica y son vertidos al mar. (Figura 2.1). (Archivos\EFLU.HTM, 2016, Choi, H., et al., 2005)

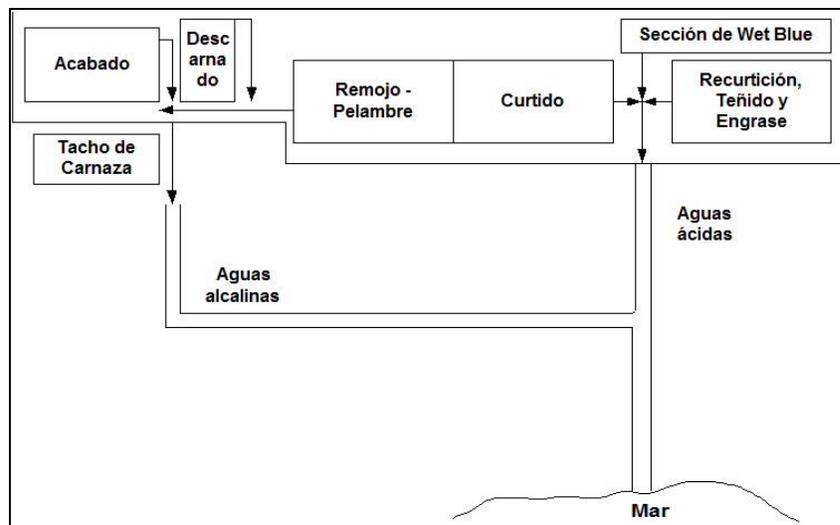


Figura 2.1: Diagrama representativo del vertido de los residuales líquidos de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.

2.2. Caracterización de los residuales que se generan en los procesos de pelambre, curtido y teñido de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.

El proceso de curtido de pieles en la tenería Patricio Lumumba consta de cuatro etapas fundamentales, tal y como se describen en el Epígrafe 1.2.

Las etapas objeto de estudio en el presente trabajo, pelambre, curtido y teñido requieren de reactivos químicos que una vez concluida la etapa sus componente forman parte de los residuales líquidos vertidos al cuerpo receptor sin previo tratamiento, tal y como se planteó en el Epígrafe anterior.

La etapa de pelambre, tiene como propósito retirar los pelos de la piel para obtener una superficie lisa y homogénea, para esta operación se utiliza sulfuro de sodio (Na_2S). Se requiere pH 12, el cual se ajusta con hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (agente encalante) que garantiza la fácil remoción de pelo.

Durante el proceso de curtido, se puede utilizar curtientes de naturaleza vegetal o mineral, en la fábrica objeto de estudio se utiliza preferentemente el sulfato de cromo, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ que penetra la estructura de la piel para estabilizar las fibras de colágeno.

Finalmente, en las etapas de recurtido, teñido y engrase se dan los últimos retoques al cuero ya curtido, para obtener el color deseado y humectarlo.

Una vez que concluyen las etapas antes descritas, se drenan los residuales líquidos al cuerpo receptor. Para el cálculo de los volúmenes de agua vertidos en las etapas se aplicó balance de masa en cada sección, durante un ciclo de curtición (un día de operación) (Anexo 1).

Los volúmenes de vertido se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Volúmenes de agua residual vertido en un ciclo de curtición.

<i>Residual vertido</i>	<i>Pelambre</i>	<i>Curtido</i>	<i>Teñido</i>
<i>Residual por bombo (m^3)</i>	2,2	3,8	2
<i>Residual diario (m^3)</i>	13,2	22,6	6

Las características promedio del residual se determinaron aplicando la metodología propuesta por (APHA et al., 2005) tomando una muestra compuesta durante 5 días en puntos de muestreos previamente establecidos. Los resultados del estudio se muestran en la Figura 2.2.

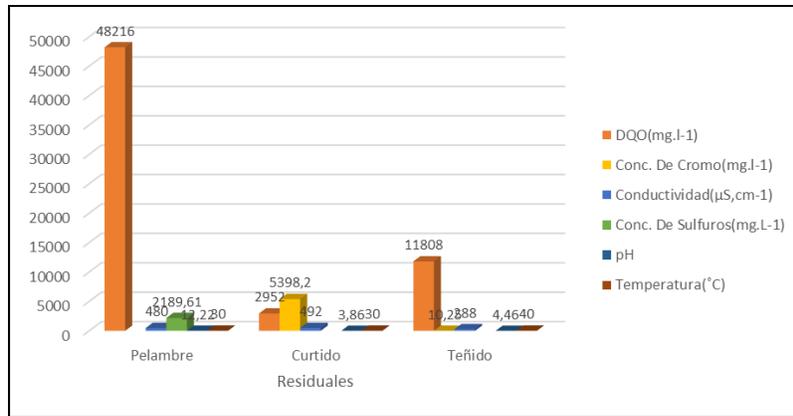


Figura 2.2. Caracterización de los efluentes líquidos que se generan en las etapas de pelambre, curtido y teñido de la tenería “Patricio Lumumba”. Caibarién.

En la Figura 2.2, se observa que la DQO es el parámetro de mayor incidencia en el residual proveniente de la etapa de pelambre, siguiéndole en orden decreciente en la etapa de teñido y en el curtido, lo que se atribuye a la presencia de materia orgánica degradable y biodegradables en estos residuales. Por su parte la concentración de cromo total supera a lo establecido por los estándares ambientales en las etapas de curtido y teñido, siendo superior en la etapa de curtido (5 398,2 mg/L). La concentración de sulfuro es considerable en la etapa de pelambre dado el uso de sulfuro de sodio para facilitar la preparación de la piel para el proceso de curtido. Con relación al pH, este indicador incumple con la NC 27:2012. La cuantificación de los resultados se reportan en la Tabla 3, Anexo 2.

2.3. Estudios experimentales para evaluar el funcionamiento de las etapas de pelambre, curtido y teñido en la tenería “Patricio Lumumba”. Caibarién.

2.3.1. Evaluación experimental a escala de laboratorio de las aguas residuales del proceso de pelambre.

Para realizar el estudio a escala de laboratorio de las aguas residuales del proceso de pelambre, se realizó la toma de muestras directamente del bombo una vez concluida la operación.

Se tomó en cuenta para el análisis la metodología propuesta por (Salas, C., 2005), aplicando un tratamiento con oxidación por aireación usando catalizador de sulfato de

manganeso. La reacción que tiene lugar se modela en la Ecuación 2.1. que se muestra a continuación.



Al ser el oxígeno un gas relativamente poco soluble en agua, es necesario reponerlo a medida que se consume para que su concentración en la disolución sea permanente y adecuada. Para ello es necesario incrementar la velocidad de disolución del oxígeno, lo que se logra aumentando la superficie y el tiempo de contacto de las burbujas de aire con la disolución, mediante la producción de burbujas de aire cuyo tamaño sea lo más pequeño posible.

Para oxidar el sulfuro a sulfato la cantidad teórica de oxígeno requerida es de 2 g O₂/g S²⁻, de acuerdo a la estequiometría de la reacción de oxidación antes modelada, lo que implica que se requiere que la cantidad de oxígeno sea el doble de la correspondiente a la cantidad de sulfuro presente en el residual objeto de estudio.

Sin embargo, en la práctica, la dosis de oxígeno necesaria es mucho mayor, dado que depende de varios factores, como la concentración del sulfuro, la temperatura y la eficiencia del sistema de aeración (tamaño de las burbujas y tiempo de contacto). Éste último, en el mejor de los casos, puede variar entre 25-30%. Por este motivo los sistemas de aeración deben ser los más eficientes posibles para reducir los tiempos, uso de insumos y facilitar la oxidación. El tiempo de reacción puede reducirse considerablemente agregando un catalizador. La cantidad óptima del catalizador debe obtenerse a través de pruebas en el laboratorio.

Teniendo en cuenta los argumentos anteriores se procedió a realizar los experimentos requeridos para llevar a cabo la oxidación de sulfuros. Inicialmente se definen las condiciones de trabajo a temperatura ambiente y una agitación de 400 rpm, lo cual va a permitir un mayor contacto del residual y el oxígeno que contiene el aire (no se cuenta con un compresor para suministrárselo), variando entonces la masa de catalizador y el tiempo de oxidación requerido para oxidar prácticamente todo el sulfuro. De esta forma se pueden identificar las condiciones óptimas para obtener la menor concentración de sulfuros posible.

Para determinar las variables independientes y su influencia sobre la variable respuesta (% remoción de sulfuro) se realizó un diseño factorial 2^k usando el software STATGRAPHICS Plus v 5.0. Las variables de entrada ($k = 2$) fueron, tiempo de oxidación (min) y masa de catalizador (mg) tomándose un punto central. (Tabla 2.2) (Tabla 4, Anexo 3).

Tabla 2.2. Valores de los niveles de las variables de entrada empleadas en el diseño de experimento en el proceso de pelambre.

Factores	Variables	Mínimo(-1)	Medio(0)	Máximo(1)
X_1	Tiempo de oxidación (h)	4	5	6
X_2	Masa de Catalizador (mg)	60	90	120

La muestra de residual tomada del bombo se hace pasar por una malla de 3mm de diámetro de orificio y luego se deja sedimentar durante 10 min, separando el sobrenadante en 10 vaso de precipitado con 150 ml de residual cada uno; se procedió a cumplir con las especificaciones del diseño experimental, para ello se utilizó tres agitadores de paleta, un cronómetro y $MnSO_4$ como catalizador.

El análisis de varianza para la remoción de sulfuros reportó un coeficiente de correlación ajustado de 81,61 %. Todas las variables, tienen una influencia directa sobre la respuesta para un 86,84 % de confianza. El efecto combinado de $X_1X_1X_2X_2$ tiene alto nivel de significación sobre la variable respuesta (Figura 1, Anexo 3). Se obtuvo como valores óptimos para llevar a cabo la operación: tiempo de reacción 6h y masa de catalizador 76,32 mg.

La cuantificación de la concentración de sulfuros totales se realizó aplicando el Método yodo métrico, propuesto por (APHA et al., 2005) los resultados se reportan en el Anexo 3.

Para la realización del experimento se utilizaron vasos de precipitación de 400 mL y la formación de espumas prácticamente provocó el reboso de los mismo, por esta razón el tanque de oxidación de sulfuros ha de tener tres veces el volumen del residual a tratar para evitar derrame o también se puede utilizar agente antiespumante (silicona líquida) para evitar el reboso por espumaje, en este caso el volumen del tanque de oxidación será dos veces el volumen de residual.

2.3.1.1. Balance de masa a escala de laboratorio aplicado a la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de pelambre.

Para la cuantificación de las corrientes de la etapa, se tomó como base de cálculo 150 mL de residual de la etapa de pelambre.

Primeramente se le separó al residual los residuos de pelos en una malla de 3mm, después se sometió a un proceso de sedimentación para separar el material suspendido que pudiera quedar en la corriente líquida residual, para que no hayan interferencias en el proceso de oxidación de sulfuros.

Como resultado de la caracterización del proceso a través del balance de masa, reportado en el Anexo 4, se pudo determinar el consumo de materiales y las emisiones al medio ambiente que genera la producción de 192 g de efluente tratado que impactan negativamente al cuerpo receptor.

2.3.1.2. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio aplicado a la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de pelambre.

Para realizar el balance de energía se tomó como base de cálculo el empleo de 150 mL de residual de pelambre así como los datos de chapa de cada equipo y el tiempo de operación.

Los resultados del balance energético desarrollado se reportan en la Tabla 2.3, en la que se puede apreciar que para producir 192 g de efluente tratado se consumen 0,381 kWh de energía.

Tabla 2.3: Resultados del balance de energía en el proceso de recuperación de Cromo.

Etapa	N (kW)	t (h)	Energ. Cons(kWh)
Oxidación	0,0635	6	0,381

2.3.1.3. Caracterización del residual del proceso de pelambre tratado antes de ser vertido.

Al concluir el tratamiento al residual proveniente de pelambre se procedió a realizar la caracterización para verificar si cumplía la NC-27:2012 la cual establece los límites permisibles para su vertimiento. (Tabla 2.4)

Tabla 2.4: Características finales del residual de Pelambre.

Parámetro	Valor	Norma
Temperatura (°C)	30	< 50
pH	8	6-9
DQO(mg/L)	956	< 700
Concentración de Sulfuros(mg/L)	957,4	5
Conductividad (µS/cm)	420	< 4000

Como resultado del análisis se evidencia en la Tabla 2.5 que el residual tratado a escala de laboratorio no cumple con los estandares ambientales para su vertimiento al cuerpo receptor, dado que la concentración de sulfuro (957,4 mg/L) y la DQO (956 mg&L) son superiores a los niveles establecidos por la NC-27:2012.

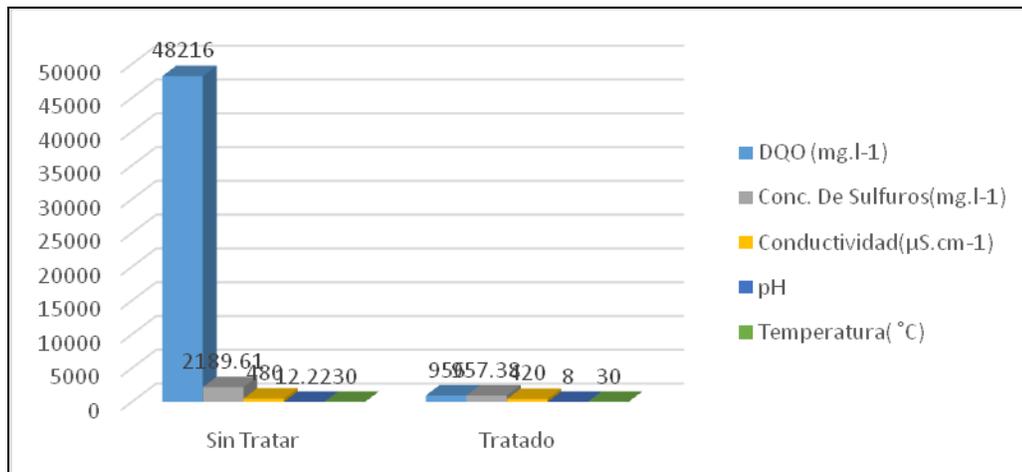


Figura 2.3. Comparación del residual del proceso de pelambre antes y posterior al tratamiento.

En la Figura 2.3, se aprecia con claridad que en la etapa oxidación de sulfuros, la DQO de 48 216 mg/L se redujo a 956 mg/L, es decir la remoción de contaminantes se comportó en un 56 %, pero no se considera suficiente pues no cumple con lo establecido por la norma de vertimiento (NC-27:2012) según se explicó en el Epígrafe anterior; este comportamiento se atribuye fundamentalmente a la ausencia de un compresor durante el experimento.

2.3.2. Estudio de la precipitación de cromo del residual de curtido empleando hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) a escala de laboratorio.

Las muestras de agua residual de la etapa de curtición se tomaron en forma directa del tambor de curtido luego de haber concluido el tiempo de operación y se procedió a hacer un análisis para determinar cuál de los métodos propuestos es el más económico y eficiente para remover el cromo presente en esta agua, siguiendo la metodología propuesta por **(Rey de Castro, A.C., 2013)**. En el estudio se evidencia que resulta favorable recuperar el cromo de los efluentes de curtido mediante el método de precipitación. Las recuperaciones tuvieron eficiencias en un rango de 95,6 – 98,8% cuando se utilizaron agentes precipitantes de laboratorio y de 81,9 – 84,4% con agentes precipitantes industriales, este último debido a que los reactivos industriales no tienen la misma pureza que los de grado de laboratorio.

Es favorable usar Ca(OH)_2 en la precipitación de cromo en lugar que hidróxido de sodio (NaOH), debido a que este último tiene alto poder de alcalinidad, es costoso y al reaccionar con ácidos, forma sales de sodio, las cuales al pasar al medio contaminan al ecosistema, incrementan la salinidad del suelo por lo que no es recomendable su uso.

El hidróxido de calcio Ca(OH)_2 : se caracteriza por tener baja alcalinidad, su solubilidad no muy elevada, bajo costo, forma sales de calcio no contaminantes por ser uno de los componentes del suelo.**(Alomá, Inés de la C., 2008)**. Además para lograr la separación del Cr(OH)_3 producido, es mejor precipitarlo con Ca(OH)_2 (o cal) pues el precipitado tiene buena velocidad de sedimentación y se logra buena compactación.

Teniendo en cuenta los argumentos anteriores se seleccionó el Ca(OH)_2 y se procedió a realizar un diseño de experimento 2^k para determinar las mejores condiciones para llevar a cabo la precipitación del Cr(OH)_3 , el algoritmo del método se describe en el Anexo 5.

Las variables de entrada ($k = 3$) seleccionadas fueron, tiempo de agitación (min); velocidad de agitación (rpm) y masa de hidróxido de calcio (g), sus niveles se reportan en la Tabla 2.6. Para estudiar la influencia de estas variables sobre la variable respuesta seleccionada (% de Remoción de cromo) empleamos el software STATGRAPHICS Plus v 5.0 y la matriz de los resultados obtenidos se reportan en el Anexo 6. La temperatura se fijó a temperatura ambiente (30°C) a criterio de los maestros de curtiembre de la tenería.

Tabla 2.5. Valores de los niveles de las variables de entrada empleadas en el diseño de experimento.

Factores	Variables	Mínimo(-1)	Máximo(1)
X ₁	Tiempo de agitación (min)	15	30
X ₂	Veloc. de agitación (rpm)	70	190
X ₃	Masa de Ca(OH) ₂ (g)	5	10

El análisis de varianza para la remoción de cromo reportó un coeficiente de correlación ajustado de 87,047 %. Las variables X₁ y X₃ tienen una influencia directa sobre la respuesta para un 92,2% de confianza, excepto la variable X₂. El efecto combinado de X₁X₃ tiene un alto nivel de significación sobre la variable respuesta (Figura 2, Anexo 6). A continuación se muestra la Ecuación 2.2 correspondiente al modelo matemático del proceso para la variable respuesta % de Remoción de cromo:

$$\% \text{ Remoción Cromo} = 0,996344 + 0,000319483 \cdot X_3 + 0,0000906667 \cdot X_1 + 0,000007525 \cdot X_2 - 0,00000710667 \cdot X_3 \cdot X_1 - 4,28333E-7 \cdot X_3 \cdot X_2 - 1,46667E-7 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad R^2 = 87,047 \% \quad (2.2)$$

Se obtuvo como valores óptimos para llevar a cabo el proceso: masa de hidróxido de calcio 10 g, velocidad de agitación 70 rpm y tiempo de agitación 30 min.

2.3.2.1. Balance de masa a escala de laboratorio de la propuesta de tratamiento de los residuales del proceso de curtido.

Para cuantificar las corrientes involucradas en cada etapa del procedimiento a escala de laboratorio, se tomó como base de cálculo 150 mL de efluente.

Para evaluar la etapa de remoción de hidróxido de cromo (III) empleando como agente clarificante el hidróxido de calcio, se toman 148 mL de residual del curtido previamente cribado y se le añade 10 g de hidróxido de calcio en disolución.

Como resultado del balance de masa se pudo determinar que se vierten 125 mL de residual líquido tratado, se generan 9,6 g de $\text{Cr}(\text{OH})_3$ como precipitado, que de no eliminarse salen en la corriente residual, impactando negativamente al ecosistema. Los balances se describen en el Anexo 8.

2.3.2.2. Cálculo de la velocidad de sedimentación $\text{Cr}(\text{OH})_3$.

La mezcla residual/ $\text{Ca}(\text{OH})_3$, se agita y se trasvasa a una probeta graduada durante 38 minutos, tiempo en el cual se le fue midiendo la altura de la interface en el tiempo

Con los datos de la (Tabla 6, Anexo 8), se obtuvo la curva de sedimentación que se indica en la Figura 2.4, a través de la misma se determinó la velocidad de sedimentación de las partículas.

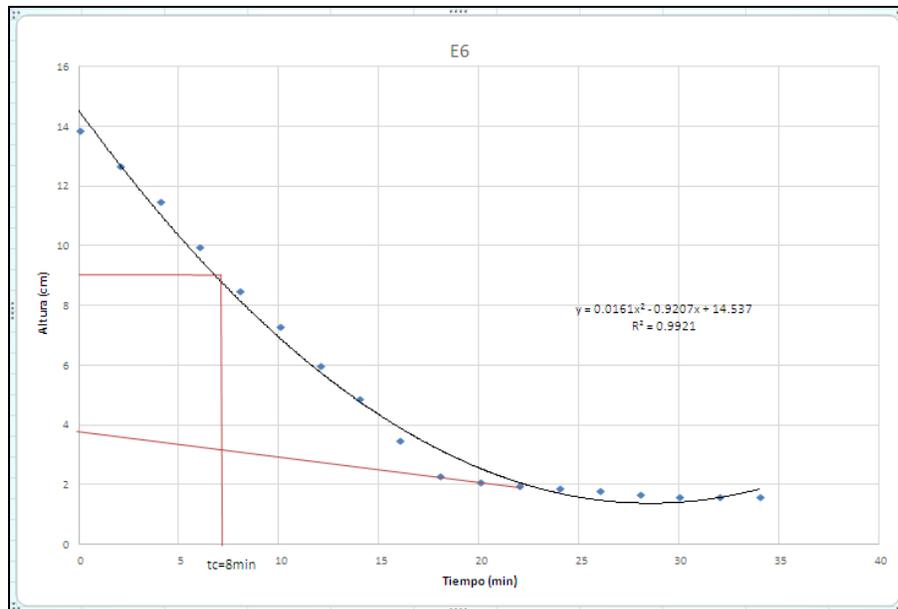


Figura 2.4. Curva de sedimentación de hidróxido de cromo (III).

Según la metodología descrita en (Rosabal, J., Garcell, L., 2006) se obtuvo que la velocidad de sedimentación libre de las partículas es de 0,7 cm/min.

2.3.2.3. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio.

Para realizar el balance de energía se tomó como base de cálculo el empleo de 150 mL de residual de curtido así como los datos de chapa de cada equipo y el tiempo de operación. Para el cálculo se aplicó la Ecuación 2.3.

$$E_{\text{cons}} = N(\text{kW}) \cdot \frac{1 \text{ kJ s}^{-1}}{1 \text{ kW}} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = (\text{kW.h}) \quad (2.3)$$

Los resultados del balance energético desarrollado se reportan en la Tabla 2.6, en la que se puede apreciar que para separar 17,82 g de Cr(OH)₃ se consumen 0,032 kWh de energía.

Tabla 2.6. Resultados del balance de energía en el proceso de recuperación de cromo.

Etapa	N (kW)	t (h)	Energ. Cons(kWh)
Precipitación Total	0,0635	0,5	0,032

2.3.2.4. Caracterización del sobrenadante obtenido del tratamiento propuesto al residual de la etapa de curtido antes de ser vertido.

El residual sometido a tratamiento se caracterizó para verificar si cumplía con la norma NC-27:2012. La cuantificación de los resultados se reporta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Características finales del residual de Curtido.

Parámetro	Valor	NC-27:2012
Temperatura(°C)	30	< 50
pH	6,9	6-9
DQO(mg/L)	313,6	< 700
Concentración de Cr _{total} (mg/L)	0,13	< 2
Conductividad(μS/cm)	332	< 4000

Como resultado del análisis se evidencia que el residual tratado a escala de laboratorio cumple con los estándares ambientales para su vertimiento al cuerpo receptor.

Se realiza la comparación entre el residual del curtido en estudio previo al tratamiento y después de tratado.

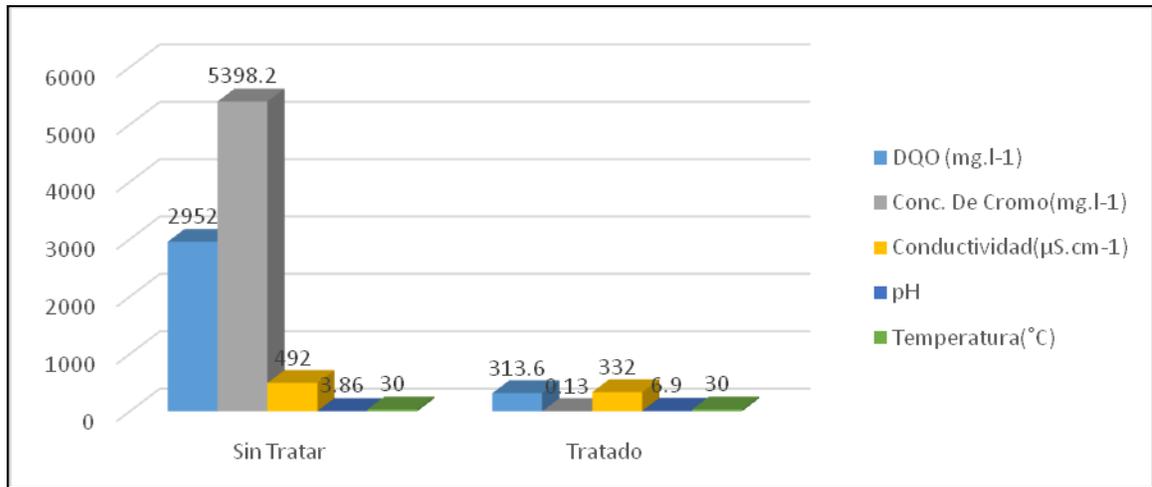


Figura 2.5. Comparación de los resultados de la caracterización del residual antes y posterior al tratamiento.

En la Figura 2.5 se observa que el tratamiento con hidróxido de calcio Ca(OH)_2 es eficiente, ya que removió el 99% del cromo presente en el residual, disminuyó la DQO de 2 952 a 313,6 mg/L y la conductividad eléctrica decreció de 492 a 332 $\mu\text{S/cm}$, debido a la disminución de la concentración de sustancias disueltas y de sulfatos; por su parte el pH aumenta hasta 6,9 cumpliéndose con la NC 27:2012.

2.3.3. Evaluación experimental a escala de laboratorio del Residual de Teñido.

Se tomaron muestras en forma directa del tambor de teñido y engrase luego de concluido el tiempo de operación para realizar los experimentos que permitirán obtener un residual cuya composición se corresponda con lo establecido por las normas de vertimiento, (remoción de cromo y remoción de color del efluente). Para ello se utilizó Ca(OH)_2 para garantizar la remoción de trazas de cromo e hipoclorito de sodio para eliminar color.

La muestra de residual tomada del tambor se hace pasar por una malla de 1mm de diámetro de orificio y luego se separa en 10 vaso de precipitado de 150 mL cada uno y se procede a la eliminación de cromo, para ello se le añade a cada uno 4,4 mg de Ca(OH)_2 , a 70 rpm durante 30 minutos (Anexo 9).

Una vez terminada la operación anterior se procede a separar el $\text{Cr}(\text{OH})_3$ formado, para ello se utiliza papel de filtro. Con el filtrado se preparan 10 vasos de precipitado con diferentes relaciones volumétricas hipoclorito de sodio/ por parte en volumen del residual según se muestra en la Tabla 2.8. En este experimento se analizó la incidencia del hipoclorito en la remoción de color del residual, para la determinación de color se aplicó la técnica colorimétrica, empleando un Espectrofotómetro UVV, marca Rayling.

Tabla 2.8. Reporte de la remoción de color en el agua residual de la etapa de teñido para diferentes relaciones de combinación volumétrica de hipoclorito de sodio/agua residual.

Experimento	Relación en volumen	Volumen de Hipoclorito(mL)	Volumen de Residual(mL)	Absorbancia	pH	% Rem
E ₁	1/1	50	50	0,12	8,4	0,97260274
E ₂	1/2	34	66	0,301	6,57	0,93127854
E ₃	1/3	25	75	0,263	6,4	0,93995434
E ₄	1/4	20	80	0,315	6,04	0,92808219
E ₅	1/5	17	83	0,303	5,45	0,93082192
E ₆	1/6	14,3	85,7	0,449	5,16	0,89748858
E ₇	1/7	12,5	87,5	0,651	4,95	0,85136986
E ₈	1/8	11,1	88,9	0,7	4,88	0,84018265
E ₉	1/9	10	90	0,81	4,81	0,81506849
E ₁₀	1/10	9,1	90,9	1,03	4,78	0,76484018
Total		203	797			

Los resultados de la experimentación reportados en la Tabla 2.9, indican que el Experimento 1 es el que mejor remoción de color reporta (97,3%), sin embargo seleccionamos como mejor variante el Experimento 7 que logra 85% de remoción. Esto se fundamenta por el consumo de hipoclorito que se requiere en el Experimento 1 (50%) y con un menor consumo de este reactivo en el Experimento 7 se logra un buen nivel de decoloración en el efluente. Al final del proceso se debe ajustar el pH del efluente a 7 empleando sosa cáustica (NaOH).

2.3.3.1. Balance de masa a escala de laboratorio.

Para la evaluación de la etapa de teñido a escala de laboratorio se tomó en consideración 150 mL de agua residual. Se aplicaron las ecuaciones de balance de masa en cada una de las etapas, (Anexo 10 a).

Como resultado del balance de masa, se pudo determinar el consumo de materiales y las emisiones al medio ambiente generados por 163 mL de efluente tratado y que pueden impactar negativamente al ecosistema, dado fundamentalmente por emisiones de materia inorgánica.

2.3.3.2. Balance de energía del proceso a escala de laboratorio.

Para realizar el balance de energía se tomó como base de cálculo 150 mL de residual de teñido así como los datos de chapa de cada equipo y el tiempo de operación.

Los resultados del balance energético desarrollado se reportan en la Tabla 2.9, en la que se puede apreciar que para producir 163 mL de efluente tratado se consumen 0,044 kWh de energía. Para los cálculos se utilizó la Ecuación (2.3).

Tabla 2.9: Resultados del balance de energía en el proceso teñido.

Etapa	N (Kw)	t (h)	Energ. Cons(Kwh)
Precipitación	0,0635	0,5	0,032
Homogenización	0,0635	0,17	0,012
Total			0,044

2.3.3.3. Caracterización final del residual antes de ser vertido.

Al concluir el tratamiento se procedió a realizar la caracterización al residual proveniente del proceso de teñido para verificar si cumplía con los estándares de vertimiento (Normalización, 2012).

Tabla 2.10: Características finales del residual de Teñido.

Parámetro	Valor	Norma
Temperatura(°C)	30	< 50
pH	7	6-9
DQO(mg/L)	685	< 700
Concentración de Cr _{total} (mg/L)	1,6	< 2
Conductividad(μS/cm)	210	< 4000
Absorbancia	0,651	

Según el reporte de la Tabla 2.10, se puede observar que el residual una vez tratado, cumple con lo establecido por la NC-27:2012 y por tanto está en condiciones de ser vertido al cuerpo receptor.

Se realiza la comparación entre el residual del curtido en estudio previo al tratamiento y después de tratado.

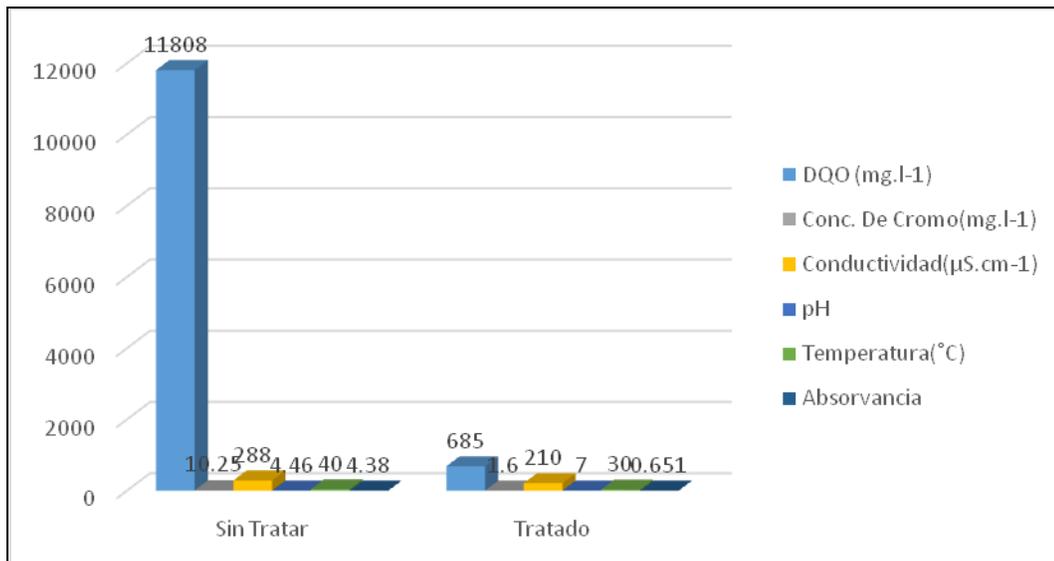


Figura 2.6. Comparación de los resultados de la caracterización del residual del proceso de teñido antes y posterior al tratamiento.

Capítulo 3: Escalado a nivel de planta piloto y evaluación económica de la tecnología de tratamiento de residual líquido en la tenería “Patricio Lumumba” de Caibarién.

Para llevar a cabo el tratamiento de mayores volúmenes de efluentes generados en procesos industriales se hace necesario realizar el escalado a planta piloto y luego a escala industrial.

Para la realización del escalado de la planta de recuperación de cromo; oxidación de sulfuros y decoloración, se tomó en consideración los resultados de los estudios de laboratorio, presentados en el Capítulo II del presente trabajo.

3.1. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos de la tenería “Patricio Lumumba” en Caibarién.

Realizados los cálculos referidos en el Epígrafe 2.3, se procede a determinar las capacidades de los equipos requeridos en cada una de las instalaciones para el tratamiento de los residuales provenientes de las etapas de pelambre, curtido y teñido; para posteriormente proceder a la selección, diseño y escalado del equipamiento a escala piloto de la planta objeto de estudio.

3.1.1. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos del proceso de pelambre.

La piel debidamente hidratada y limpia pasa a las operaciones de apelambrado, cuya doble misión radica en eliminar el corium, la epidermis con el pelo y producir un aflojamiento de la estructura fibrosa del colágeno con el fin de prepararla para el proceso de curtición. En esta etapa se generan 13,2 m³ diario de residual líquido, cuya carga contaminante excede los estándares ambientales (Tabla 3, Anexo 2), quedando demostrado en la Figura 2.3, que el proceso de oxidación de sulfuros es favorable para mitigar los contaminantes previa disposición final al cuerpo receptor.

3.1.1.1. Planta de Oxidación de Sulfuros.

Para oxidar los sulfuros contenidos en 100 L de agua residual proveniente del proceso de pelambre, se propone realizar el escalado a nivel de planta piloto, seleccionando los equipos necesarios apoyados en el balance de masa (Anexo 4) y la metodología propuesta por (Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010).

Selección de la Criba:

Según **(Bisio, A., Kabel, R., 1985)**, la cantidad de pelo representa de un 3-5 % de la piel salada recortada. Por tanto el pelo representa el 4,6 % de la masa de residual. Por lo que según la Metodología descrita en el (Anexo 11 a), tomando como base de cálculo el procesamiento de 0,1 m³ de residual se empleará una criba de acero al carbono, con malla fina de 3 mm de diámetro, de limpieza manual.

Tanque de compensación:

Se requiere almacenar 0,1 m³ de agua residual proveniente de la etapa de pelambre, con pH de 11 a 12, se propone tanque con altura y diámetro de 0,52 m construido con acero al carbono, capaz de almacenar 0,112 m³ de residual. (Anexo 11 b)

Decantador:

Para diseñar el sedimentador que se requiere para procesar un volumen de 0,1 m³ de residual del pelambre, se emplea una combinación de los métodos descritos por **(Pavlov, K.F., 1981)** y **(Rosabal, J.M., 2006)** aplicado a los resultados obtenidos a escala de laboratorio. La metodología se explica en el Anexo 11c.

El sedimentador tendrá las siguientes características técnicas: área de sedimentación de 1,21 m²; altura de la zona de espesamiento 0,012 m, por criterio de diseño se establece que la altura de la alimentación, la altura de la zona del cono y la altura de la zona de almacenamiento sea de 0,3 m.

El resultado del cálculo, reporta que la altura de sedimento es de 1 m.

Atendiendo a los pequeños volúmenes de lodos que se generan en esta etapa, este será descargado de forma manual cada dos semanas.

Tanque de oxidación de sulfuros con aire comprimido:

Se requiere tratar un volumen de 0,1 m³ de agua residual proveniente de la etapa de pelambre con adición de 3,06 m³ de aire comprimido, durante 6 horas. El suministro de aire se hará usando un compresor, según el estudio reportado en el (Anexo 11 d).

Las características técnicas del tanque se describen en la Tabla 8, Anexo 11.

Secadero:

Se requiere secar 0,2 m³ de lodo usando un lecho de secado al sol, siguiendo las instrucciones de **(Allende, I.V., 2000)** efectuamos el dimensionamiento del secadero.

El secadero estará constituido de un piso de mortero con pendiente hacia el centro, donde se encuentra un tragante con rejilla, conectado a una tubería de PVC, de extracción manual, ancho: 2,0 m y largo de 3,34 m. Las líneas de conducción de lodo hacia los lechos deberán ser diseñadas para una velocidad de circulación de 0,75 m/s.

Selección de las bombas:

Para transportar el fluido se emplean 2 bombas sumergibles de achique, Modelo: KP 350 M 1.

La bomba L-110, para impulsar el residual desde el tanque de compensación al sedimentador y la Bomba L-111, para impulsar el residual desde el sedimentador al tanque oxidación de sulfuros.

Los parámetros se calcularon mediante balance de energía mecánica (Anexo 11 e y f) y su selección a través del software Drunfus.

Los datos técnicos de las bombas se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.1. Datos técnicos de las bombas. Modelo: KP 350 M 1.

<i>Parámetros</i>	<i>Bomba L-110</i>	<i>Bomba L-111</i>
<i>Flujo volumétrico (L/s)</i>	2,19	2,71
<i>Carga (m)</i>	5,8	4,6
<i>Potencia del motor (kW)</i>	0,61	0,649
<i>Consumo (kWh/año)</i>	164	14

La Figura 3.1, representa el esquema tecnológico de la planta de tratamiento al residual líquido proveniente de la etapa de pelambre.

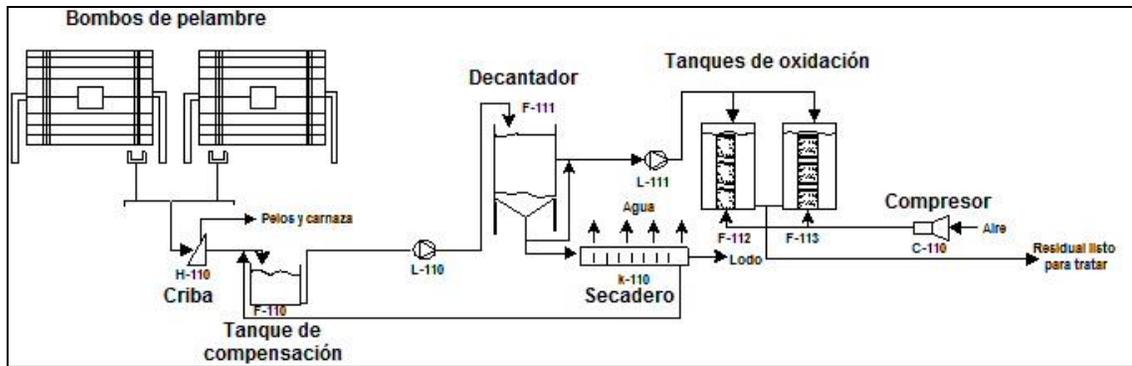


Figura. 3.1. Esquema de la tecnología de oxidación de sulfuro, aplicada al residual proveniente de la etapa de pelambre.

3.1.2. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento al residual líquido del proceso de curtido.

Las industrias de curtición de pieles utilizan sales de cromo en sus procesos generando grandes cantidades de efluentes líquidos con alto contenido de cromo trivalente (4000 a 10000 mg/L), el cual debe ser removido mediante tratamientos adecuados a fin de cumplir con las regulaciones ambientales, **(Normalización, 2012)**

Para la selección y dimensionamiento de los equipos empleados en esta planta se tuvieron en cuenta los resultados experimentales obtenidos a nivel de laboratorio y criterios de escalados.

Criba:

Se seleccionó el tamiz colador de arco, con tela metálica con aberturas de 1 mm. En este la suspensión libre de partículas de gran tamaño, pasa a través de los agujeros impulsada tanto por la fuerza centrífuga como por la gravedad.

En el balance de masa descrito en el (Anexo 8 a) se determinó que el promedio de la masa de residual que pasa por la criba y se queda retenida es 2,4%, por lo que el volumen de residual que continuará al proceso será de 0,986 m³.

Tanque de compensación:

Se requiere almacenar 0,986 m³ de agua residual proveniente de la etapa de curtido, con pH de 3 - 4, se propone tanque construido con acero inoxidable, con capacidad de 1,104 m³. (Anexo 12 a).

Las características técnicas del tanque se resumen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.2. Características del tanque de almacenamiento de residual.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Volumen de líquido (m³)</i>	0,986
<i>Altura del Líquido (m)</i>	1
<i>Volumen del tanque (m³)</i>	1,104
<i>Diámetro (m)</i>	1,12
<i>Altura (m)</i>	1,12

Tanque de precipitación química:

El tanque para la precipitación química se diseñó por el criterio de similitud geométrica entre las condiciones a escala de laboratorio y las condiciones determinadas por balances de masa a escala de planta piloto. Se propone que se instale un agitador de placas. La metodología de escalado se describe en el Anexo 12 b, los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.7.

Tabla 3.3. Características técnicas del tanque de precipitación química.

(Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica $n = 1800$ rpm).

<i>Escala</i>	<i>Reactor</i>					<i>Agitador de paletas</i>				
	<i>V (m³)</i>	<i>H_R (m)</i>	<i>D (m)</i>	<i>N (kW)</i>	<i>t_{mezclado} (min)</i>	<i>n (rpm)</i>	<i>d (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>b (m)</i>	<i>h (m)</i>
<i>Laboratorio</i>	0,000148	0,11	0,07	0,0635	30	70	0,03	0,049	0,035	0,02
<i>Piloto</i>	1	1,57	1	0,09	30	15,6	0,43	1,27	0,5	0,2

Tanque de sedimentación de Cr (OH)₃.

Se procede a diseñar el sedimentador mediante el método de **(Pavlov, K.F., 1981)** para el tratamiento de 1 m³ de residual del curtido siguiendo la metodología descrita en el Anexo 12 c.

El sedimentador tendrá las siguientes características técnicas: área de sedimentación de 6,96 m²; altura de la zona de espesamiento 0,11 m, por criterio de diseño. Por igual criterio la altura de la zona de alimentación, la altura del cono y la altura de almacenaje sera de 0,3 m; la altura de compactación de lodo sera de 1,1 m.

Secador solar.

Para el secado de 0,76 m³ de lodo crómico, (Cr(OH)₃), se propone el método descrito por **(Allende, I.V., 2000)**. Las características del secadero son: extracción manual, ancho: 2,0 m y largo de 10,0 m. Las líneas de conducción de lodo hacia los lechos deberán ser diseñadas para una velocidad de circulación de 0,75 m/s.

Selección de las bombas:

Para transportar el fluido se emplean 2 bombas sumergibles de achique.

La bomba L-112, Modelo: KP 350 M 1 para impulsar el residual desde el tanque de compensación al tanque de precipitación química y la Bomba L-113, Modelo KP 250M 3, para impulsar el residual desde el tanque de precipitación química al sedimentador.

Los parámetros para el sistema de bombeo se calcularon mediante balance de energía mecánica (Anexo 12 d) y la selección de las bombas a través del software Drunfus.

Los datos técnicos de las bombas se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.4. Datos técnicos de las bombas. Modelo: KP 350 M 3.

<i>Parámetros</i>	<i>Bomba L-112 (KP 350 M 1)</i>	<i>Bomba L-113 (KP 250 M 3)</i>
<i>Flujo volumétrico (L/s)</i>	1,97	2,71
<i>Carga (m)</i>	6,17	3,1
<i>Potencia del motor (kW)</i>	0,592	0,48
<i>Consumo (kWh/año)</i>	18	118

La Figura 3.2, representa el esquema tecnológico de la planta de remoción de cromo trivalente contenido en el residual líquido proveniente de la etapa de curtido.

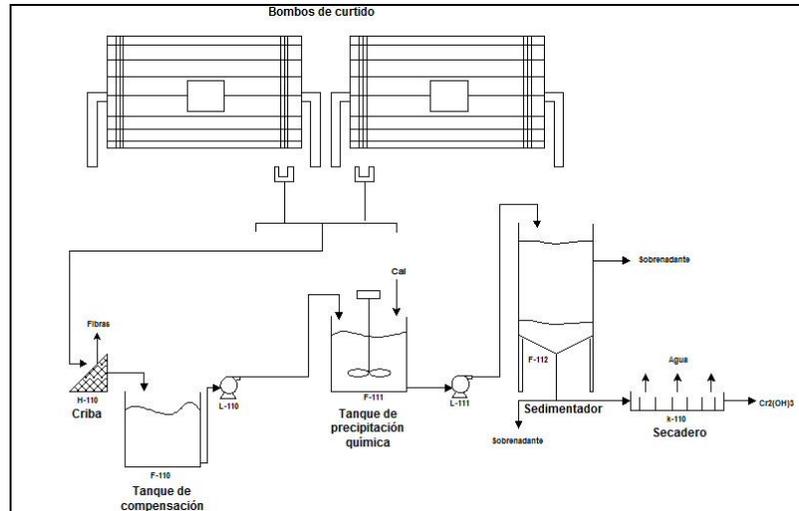


Figura. 3.2. Esquema de la tecnología de tratamiento al residual proveniente de la etapa de curtido.

3.1.3. Selección, diseño y escalado del equipamiento de la tecnología de tratamiento al residual líquido del proceso de teñido.

El residual líquido proveniente del proceso de teñido, se lleva a través de un sistema de canales a una criba estática de limpieza manual, donde se separa cualquier materia extraña que interfiera en el proceso subsiguiente. Posteriormente pasa a un tanque de retención del cual es impulsado por una bomba hasta un tanque con agitación donde se añade hidróxido de calcio para eliminar las trazas de cromo que pudiera arrastrar y que es separado por precipitación en forma de hidróxido de cromo (III), que se lleva al secadero de lodos. El efluente libre de cromo de color oscuro pasa a un tanque de homogenización donde se añade hipoclorito de sodio que se encarga de decolorar el residual.

Se procede a la selección del equipamiento para el tratamiento a $0,1 \text{ m}^3$ de residual de teñido.

Selección de la criba:

Se seleccionó criba de malla fina, confeccionado con plancha de acero, aberturas de orificios de 1 mm de diámetro.

En el balance de masa descrito en el (Anexo 10 a) se determinó que el promedio de la masa de residual que pasa por la criba y se queda retenida es 5,7 %, por lo que el volumen de residual que continuará al proceso será de $0,986 \text{ m}^3$.

Tanque de compensación:

Se requiere almacenar 0,986 m³ de agua residual proveniente de la etapa de teñido, con pH de 4-5, se propone tanque construido con acero inoxidable. (Anexo 13 b).

Las características técnicas del tanque se resumen en la Tabla 3.9.

Tabla 3.5. Características del tanque de almacenamiento de residual.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Volumen de líquido (m³)</i>	0,986
<i>Altura del Líquido (m)</i>	0,47
<i>Volumen del tanque (m³)</i>	0,112
<i>Diámetro (m)</i>	0,52
<i>Altura (m)</i>	0,52

Tanque de precipitación química:

El tanque con agitación para la precipitación química se diseñó por el criterio de similitud geométrica entre las condiciones a escala de laboratorio y las condiciones determinadas por balances de masa a escala de planta piloto. La metodología se describe en el Anexo 13 c. Las características técnicas del reactor con agitación se resumen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.6. Características técnicas del tanque de precipitación química.

(Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica n = 1800 rpm).

<i>Escala</i>	<i>Reactor</i>					<i>Agitador de paletas</i>				
	<i>V (m³)</i>	<i>H_R (m)</i>	<i>D (m)</i>	<i>N (kW)</i>	<i>t_{mezclado} (min)</i>	<i>n (rpm)</i>	<i>d (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>b (m)</i>	<i>h (m)</i>
<i>Laboratorio</i>	0,00015	0,11	0,07	0,0635	30	70	0,03	0,04	0,03	0,014
<i>Piloto</i>	0,1	0,71	0,45	0,000084	30	25,8	0,2	0,63	0,225	0,09

Colador de arco:

Se seleccionó el tamiz colador de arco, con tela metálica con aberturas de 0,5 mm. En este la suspensión libre de partículas grandes pasa a través de los agujeros impulsada tanto por la fuerza centrífuga como por la gravedad.

Tanque colector:

Se requiere almacenar 0,1 m³ de agua residual proveniente de la etapa de teñido. (Anexo 12 d). Las características del tanque se resumen en la Tabla 3.11.

Las características técnicas del tanque se resumen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.7. Características del tanque colector de residual.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Volumen de líquido (m³)</i>	0,1
<i>Altura del Líquido (m)</i>	0,47
<i>Volumen del tanque (m³)</i>	0,112
<i>Diámetro (m)</i>	0,52
<i>Altura (m)</i>	0,52

Tanque homogenizador.

Se requiere almacenar 0,1 m³ de agua residual proveniente de la etapa de teñido. (Anexo 13 e). Las características del tanque se resumen en la Tabla 3.12.

Tabla 3.8. Características técnicas del tanque de compensación de residual.

(Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica n = 1800 rpm).

<i>Escala</i>	<i>Reactor</i>					<i>Agitador de paletas</i>				
	<i>V (m³)</i>	<i>H_R (m)</i>	<i>D (m)</i>	<i>N (Kw)</i>	<i>t_{mezclado} (min)</i>	<i>n (rpm)</i>	<i>D (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>B (m)</i>	<i>H (m)</i>
<i>Laboratorio</i>	0,00015	0,11	0,07	0,0635	15	80	0,03	0,039	0,035	0,014
<i>Piloto</i>	0,1	0,71	0,45	0,000171	15	30	0,2	0,63	0,225	0,09

Selección de las bombas:

Para transportar el fluido se emplean 3 bombas sumergibles de achique, Modelo: KP 350 M 1 y KP 250 M 3.

La Bomba L-114, para impulsar el residual desde el tanque de compensación al tanque de presipitación, la Bomba L-115 desde el tanque de presipitación al colador de arco y la Bomba L-116, desde el tanque colector al homogenizador.

Los parámetros se calcularon mediante balance de energía mecánica (Anexo 13 g) y su selección a través del software Drunfus.

Los datos técnicos de las bombas se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Datos técnicos de las bombas. Modelo: KP 350 M 1 y Modelo: KP 250 M 3.

Parámetros	Bomba L-114	Bomba L-115	Bomba L-116
Flujo volumétrico (L/s)	1,97	2,62	2,56
Carga (m)	6,17	2,4	2,6
Potencia del motor (kW)	0,592	0,48	0,48
Consumo (kWh/año)	18	108	11

La Figura 3.3, representa el esquema tecnológico de la planta de remoción de cromo trivalente y color contenido en el residual líquido proveniente de la etapa de teñido.

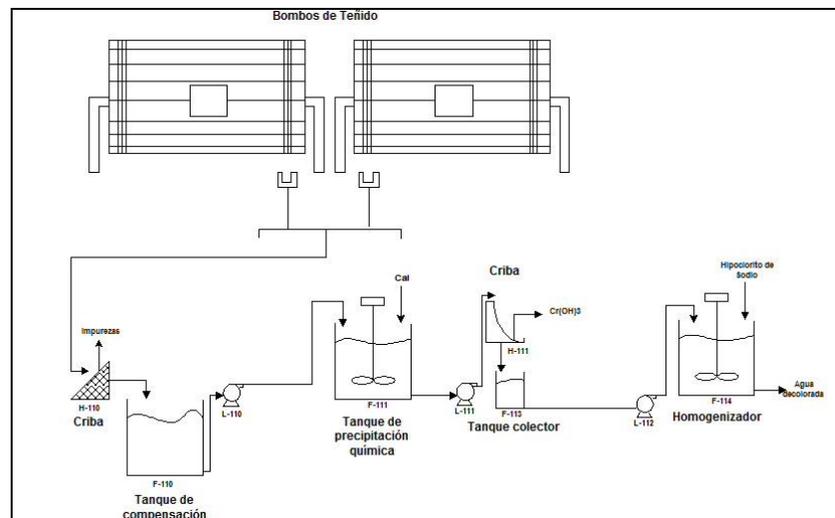


Figura. 3.3. Esquema de la tecnología de tratamiento al residual proveniente de la etapa de teñido.

3.2. Análisis económico de la tecnología de tratamiento a residuales líquidos de los procesos de pelambre, curtición y teñido de la tenería "Patricio Lumumba" en Caibarién.

El análisis técnico-económico de una actividad es un estudio complejo de cada uno de los eslabones que constituyen y contribuyen a la actividad económico-productiva, siendo una de las funciones de la organización y dirección científica de la producción; el mismo permite determinar si la inversión proyectada es capaz de satisfacer los requerimientos

que la han originado y si es económicamente factible, valorando objetivamente los resultados **(Alomá, Ines de la C., 2006, González, E., 1987)**.

Para el desarrollo de este epígrafe se tuvo en consideración que la planta piloto procese 0,1 m³ de residual líquido proveniente del proceso de pelambre 1 m³ del proceso de curtido y 0,1 m³ de residual líquido del proceso de teñido.

La planta de residuales en su conjunto operaría 8 horas al día durante 25 días hábiles en el mes, para 12 meses en el año. Durante este período se procesan 30 m³ de residual del proceso de pelambre; 300 m³ de residual del proceso de curtido y 30 m³ de residual proveniente del proceso de teñido.

Para el tratamiento del residual del pelambre, se consumen 3 toneladas de silicona y 0,0162 toneladas de sulfato de manganeso. El tratamiento del residual del proceso de curtido requiere de 19,980 toneladas de hidróxido de calcio y para el tratamiento del residual proveniente del proceso de teñido se requiere de 4,16 toneladas de hipoclorito de sodio y de 6,3 toneladas de hidróxido de sodio para el ajuste de pH.

Además se tomaron en cuenta elementos de costos externos determinados por muestreo directo de los casos por enfermedad consistentes en: evitarse contaminación por sulfuros (lesiones en los ojos y afecciones respiratorias) que ascienden a 38 476,72 \$; evitarse la contaminación por cromo (lesiones en la piel y afecciones respiratorias) que aporta el residual del curtido ascendentes a \$ 40 482,23 y de \$ 24 679,31 aportada por el residual del teñido.

3.2.1. Costo de adquisición del equipamiento.

El cálculo del costo total del equipamiento se realizó siguiendo la metodología propuesta por **(Peters M., Timmerhauss, K., 2003)**.

El equipamiento requerido para las plantas de tratamiento para los residuales objeto de estudio se resumen en las Tablas 3.10; 3.11 Y 3.12.

Tabla 3.10. Costo del equipamiento de la planta piloto para el tratamiento de residual proveniente del proceso de pelambre.

<i>Equipos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo original (\$)</i>	<i>Costo actual (\$)</i>	<i>Referencias</i>
<i>Criba</i>	1	5 277,2	8 389,39487	Fig. 15.42. (Peters.M et al., 1991)
<i>Tanque de compensación</i>	1	2 200	3 497,4359	Fig. 14.56. . (Peters.M et al., 1991)
<i>Decantador</i>	1	2 200	3 497,4359	Fig. 14.56. . (Peters.M et al., 1991)
<i>Tanque de oxidación con aire</i>	1	2 200	3 497,4359	Fig. 14.56. . (Peters.M et al., 1991)
<i>Compresor</i>	1	1 300	2 066,66667	Fig. 14.47. . (Peters.M et al., 1991)
<i>Bombas</i>	2	1 750	2 782,05128	Fig. 14.40. . (Peters.M et al., 1991)
<i>Secadero</i>	1	-	502,6	(Tabla 19 Anexo 15)
Total			24 233,0205	

Tabla 3.11. Costo del equipamiento de la planta piloto para el tratamiento de residual proveniente del proceso de curtido.

<i>Equipos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo original (\$)</i>	<i>Costo actual (\$)</i>	<i>Referencias</i>
<i>Criba</i>	1	5 277,2	8 389,39487	Fig. 15.42. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque de compensación</i>	1	4 000	6 358,97436	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque de precipitación química con agitador</i>	1	8 500	1 3512,8205	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Sedimentador</i>	1	2 800	4 451,28205	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Bombas</i>	2	1 720	2 734,35897	Fig. 14.40. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Secadero</i>	1	-	1 049,6	(Tabla 18 Anexo 15)
Total			36 496,4308	

Tabla 3.12. Costo del equipamiento de la planta piloto para el tratamiento de residual proveniente del proceso de teñido.

<i>Equipos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo original (\$)</i>	<i>Costo actual (\$)</i>	<i>Referencias</i>
<i>Criba</i>	2	10 554,4	16 778,7897	Fig. 15.42. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque de compensación</i>	1	2 200	3 497,4359	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque de precipitación química con agitador</i>	1	5 000	7 948,71795	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque colector</i>		1 600	2 543,58974	Fig. 14.56. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Tanque homogenizador</i>	1	5 000	7 948,71795	Fig. 14.47. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
<i>Bombas</i>	3	2 580	4 101,54	Fig. 14.40. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E., 1991
Total			42 818,7897	

3.2.2. Cálculo del Costo Total de Inversión.

El Costo Total de Inversión (CTI) se puede determinar, a partir de la Ecuación 3.1,

$$CTI = CFI + 0,15 \cdot CFI \quad (3.1)$$

El Capital Fijo de Inversión, se calcula, según la expresión:

$$CFI = CD + CI \quad (3.2)$$

Los Costos Totales Directos e Indirectos se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$CD = \text{Costo de instalación} + \text{Instrumentación y Control} + \text{Tuberías y accesorios}$$

$$\text{Sistema eléctrico} \quad (3.3)$$

$$CI = \text{Ing y Supervisión} + \text{Construcc y Mantenimiento} + \text{Gastos Legales} \quad (3.4)$$

Cálculo del costo de adquisición:

El costo actual de los equipos se estimó según la expresión:

$$C_a = \frac{ICA}{ICO} \cdot C_o \quad (3.5)$$

Donde, CTI: Costo total de inversión (\$); CFI: Capital fijo de inversión (\$); CD: Costos directos (\$); CI: Costos indirectos (\$); C_a: Costo actualizado (\$), C_o: Costo original (\$), ICO: Índice de costo original, ICA: Índice de costo actual.

Tomando como referencia la Tabla 6-9 (Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., 2003), se estiman en función de los costos de adquisición, cada uno de los restantes componentes de los costos directos, costos indirectos, capital fijo de inversión y el costo total de inversión.

El resultado de los costos se resume en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Resumen de la estimación y cálculo del costo total de inversión.

(a). Planta de tratamiento residual del pelambre; (b) Planta de tratamiento residual del curtido; (c) Planta de tratamiento residual del teñido.

	<i>Valor (\$)</i>		
	(a)	(b)	(c)
Costos directos (CD)	44 346,573	87 128,679	78 358,3856
Costos indirectos (CI)	6 058,275	11 902,825	10 704,69743
Capital fijo de inversión (CFI)	50 404,848	99 031,504	89 063,08258
Costo total de inversión (CTI)	57 965,5752	120 456,589	102 422,545

3.2.3. Cálculo del Costo Total de Tratamiento.

Para el cálculo del costo total de tratamiento (CTP) se utiliza la Ecuación 3.6, que equivale al costo total de producción, que se muestra a continuación:

$$CTP = C_{Fab} + GG \quad (3.6)$$

Los Costos de Fabricación, Costos directos de producción y cargos fijos se calculan por las siguientes expresiones:

$$C_{Fab} = CDP + CF \quad (3.7)$$

$$CDP = MP + U + MO + S + M + Sm + GL \quad (3.8)$$

$$CF = \text{Depreciación} + \text{Seguros e Impuestos} \quad (3.9)$$

Siendo,

C Fab: Costo de Fabricación (\$/ año); GG: Gastos Generales (\$/ año); MP: Materias primas (\$/ año); U: Utilidades (\$/ año); MO: Mano de obra (\$/ año); S: Supervisión (\$/ año); M: Mantenimiento (\$/ año); Sm: Suministros \$/ año); GL: Gastos de laboratorio \$/ año); CF: Cargos fijos (\$/ año).

La Tabla 3.14, muestra el resumen de los cálculos para el costo total de tratamiento, los que están directamente relacionados con cada uno de los procesos de tratamiento objeto de este estudio. (Anexo 14).

Tabla 3.14. Resumen de la estimación y cálculo del costo total tratamiento.

(a). Planta de tratamiento residual del pelambre; (b) Planta de tratamiento residual del curtido; (c) Planta de tratamiento residual del teñido.

<i>Componente del costo de operación.</i>	<i>Valor (\$/año)</i>		
	(a)	(b)	(c)
<i>Costos variables</i>	20 395,2	44 081,1	7 379,6
<i>Cargos fijos</i>	2 898,28	4 364,97	5 121,13
<i>Costo de fabricación</i>	23 293,47876	48 449,325	12 500,73
<i>Costo total de tratamiento</i>	23 293,47876	48 449,325	12,500,73

3.2.4. Ingresos por venta de hidróxido de cromo (III) generado en la planta de tratamiento al residual del proceso de curtido.

En el tratamiento propuesto para los residuales líquidos del proceso de curtido, se genera un lodo con contenido de hidróxido de cromo (III), este se somete a secado al sol y se valoriza, reportando un ingreso ascendente a 31 623,1 \$/año, según se muestra en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Ingresos por venta de hidróxido de cromo (III)

<i>Producto</i>	<i>Cantidad recuperada (kg)</i>	<i>Precio (\$/kg)</i>	<i>Ingreso monetario(\$)</i>	<i>Ingreso (\$/año)</i>
$Cr(OH)_3$	63,885	1,65	105,41	31 623,1

Fuente: (www.cu.all.biz)

Este lodo se puede destinar a la producción de cemento romano y a la producción de puzolana, según reporta **(Cortés, M., 2006)**

3.2.5. Evaluación de las externalidades.

Se realizó una evaluación de externalidades debido al impacto que sobre la salud de los seres vivos tiene la exposición a sulfuros contenidos en el residual del pelambre y de cromo contenido en el residual del curtido.

Para la evaluación de externalidades pueden ser utilizados dos métodos: 1). basado en el costo directo de la enfermedad, 2). basado en los costos del tiempo perdido o pérdida de productividad.

Para realizar este estudio de externalidades se analizaron los elementos referidos a los costos externos por muestreo directo de los casos por enfermedad.

Fueron muestreadas 80 personas durante 1 año, en las edades comprendidas entre 23-56 años. El salario promedio del personal muestreado es de 15,00 \$/día. Estos datos así como las Ecuaciones 3.10- 3.13, permitieron obtener los resultados de la Tabla 3.16.

$$\text{Costo de enfermedad} = \text{Pérdidas de productividad} = \text{Días de trabajo perdidos} * \text{Salario diario} \quad (3.10)$$

$$\text{Costos directo de enfermedad} = \text{Costo de enfermedad} + \text{Costo de un tratamiento} \quad (3.11)$$

$$\text{Costo de un tratamiento} = \frac{1,15 * \text{Costo directo de enfermedad}}{\text{Número de casos}} \quad (3.12)$$

$$\text{Gastos evitados} = \text{Costo del tratamiento} + \text{Pérdida de productividad} \quad (3.13)$$

Tabla 3.16. Evaluación de externalidades de las tecnologías de tratamiento propuestas.

(a). Residual líquido del proceso de pelambre; (b). Residual líquido del proceso de curtido; (c). Residual líquido del proceso de teñido.

(a).	No.casos	Días perdidos	Salario/día	Costo de trat(\$)	CDe (\$)	Pérdidas de productividad (\$)	Gastos evit.(ingresos) (\$)
Lesiones en los ojos.	8	10	15	798,54	948,54	150	7 588,32
Afecciones respiratorias.	31	14	15	786,4	996,4	210	30 888,4
Total (\$)							38 476,72

(b).	No.casos	Días perdidos	Salario/día	Costo de trat(\$)	CDe (\$)	Pérdidas de productividad (\$)	Gastos evit.(ingresos) (\$)
Lesiones en la piel.	18	20	15	848,63	1 148,63	300	20 675,34
Afecciones respiratorias.	21	12	15	763,09	943,09	180	19 804,89
Total (\$)							40 480,23

(c).	No. casos	Días perdidos	Salario/día	Costo de trat(\$)	CDe (\$)	Pérdidas de productividad (\$)	Gastos evit.(ingresos) (\$)
Lesiones en la piel.	6	14	15	848,63	1058,63	210	6351,78
Afecciones respiratorias.	17	21	15	763,09	1078,09	315	18327,53
Total (\$)							24679,31

El estudio de externalidades demostró que el tratamiento a los residuales del proceso de pelambre, ahorra 38 476,72 \$/año, por su parte el tratamiento a residuales del proceso de curtido, permite ahorrar 40 480,23 \$/año y al aplicar tratamiento a los residuales provenientes de la etapa de teñido, se logra un ahorro de 24679,31 \$/año, por concepto de daños evitados al implementar un sistema de tratamiento a los residuales provenientes de estas etapas.

3.2.6. Evaluación de los Indicadores dinámicos VAN, TIR, PRD.

Una valoración de la factibilidad de la inversión se realizó sobre la base del cálculo de los indicadores dinámicos VAN (valor actual neto), TIR (tasa de rendimiento interna) y el PRD (período de recuperación al descontado), tomando una tasa de interés del 12 %. Las Ecuaciones utilizadas para los cálculos se muestran a continuación.

$$VAN = \left(\sum_{i=1}^k \frac{F \text{ de cajas}}{(1+i)^n} \right) - Inv \quad (3.14)$$

$$PRD = \text{año anterior a la recuperación} + \frac{\text{cantidad no recuperada en el próximo año}}{\text{flujo de caja en ese año}} \quad (3.15)$$

Siendo,

n, número de Años; i, tasa de Interés.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Valores de los indicadores de factibilidad de los tratamientos en estudio.

Indicadores	Valor		
	(a)	(b)	(c)
<i>Valor actual neto. VAN (\$)</i>	68 833,32	108 938,33	23 925,59
<i>Tasa de Rendimiento Interna. TIR (%)</i>	31	32	16
<i>Plazo de recuperación al descontado. PRD (años)</i>	4,5	4	11

Los valores reflejados en la Tabla 3.16 indican la factibilidad de las tecnologías propuesta por ser el VAN mayor que cero y la recuperación efectuarse en un periodo de 4 y de 4,5 años para los tratamientos de residuales del curtido y pelambre, respectivamente; en el caso de la planta de tratamiento a residual del teñido, la recuperación es en 11 años. (Figura 1 Anexo 15).

Conclusiones.

Conclusiones.

1. El proceso de curtido de pieles en tenerías, requiere de gran cantidad de reactivos químicos que generan residuales tóxicos que impactan negativamente al ecosistema y la salud de los seres vivos, se destacan entre ellos los drenados en el proceso de curtido, pelambre y teñido.
2. El estudio realizado a escala de laboratorio, permitió reducir la carga contaminante de los residuales líquidos del proceso de pelambre, curtido y teñido a niveles establecidos por la NC 27:2012, excepto en la DQO de 956 mg/L y concentración de sulfuros 957,4 mg/L.
3. El análisis económico demostró la factibilidad económica de las propuestas tecnológicas para el tratamiento a los residuales líquidos vertidos en las etapas de pelambre, curtido y teñido a escala piloto, con un plazo de recuperación al descontado de 4,5; 4 y 11 años respectivamente.

Recomendaciones.

1. Continuar los estudios de caracterización de residuales vertidos por la tenería y la propuesta de métodos de tratamiento para reducir el impacto ambiental que generan.
2. Desarrollar estudios de remoción de contaminantes en aguas residuales de la tenería, aplicando procesos biológicos.
3. Que se implementen las propuestas tecnológicas para los residuales líquidos del proceso de pelambre, curtido y teñido, en la tenería Patricio Lumumba.

Referencias bibliográficas.

1. ABIA AGUILA, L. 2003a. *Química e Industria*.
2. ABIA AGUILA, L. 2003b. *Revista de Ingeniería*.
3. ABIA AGUILA, L. 2003c. *Residuos*. 72 ed.
4. ALOMÁ, I. D. L. C. 2006. *Evaluación de la operación de adsorción de metales pesados empleando columnas rellenas con bagazo de caña químicamente modificado y propuesta de escalado a nivel de planta piloto*. Tesis en opción al grado Master en Ingeniería en Saneamiento Ambiental. , Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
5. ALOMÁ, I. D. L. C., RODRÍGUEZ, I., CURBELO, A., SARDIÑAS, R., CORTÉS, M., 2008. Remoción de cromo y níquel de soluciones acuosas utilizando bagazo de caña de azúcar como biosorbente. *Revista Centro Azúcar*
6. ALLENDE, I. V. 2000. *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento para aguas residuales*.
7. APHA, AWWA & WEF 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA*.
8. ARCHIVOS\EFLU.HTM, H. W. T. D. L. E. P. L. B. D. C. P. M. D. E. 2016. Available: <http://www>. Tratamiento de los efluentes procedentes los baños de cromado por medio de electrodiálisis. Archivos\EFLU.HTM [Accessed 23 de enero 2016].
9. AZARIO.R. 2014. *Análisis de la toxicidad de metales contaminantes sobre el crecimiento de Eschericia Coli: efecto del cromo, plomo y cadmio en solución*. . Universidad Tecnológica Nacional de Uruguay.
10. BALAGUER ARNANDIS, E. 2006. *Estudio de la influencia del tiempo de retención hidráulico en un reactor biológico secuencial (SBR) de depuración de aguas residuales procedentes de una tenería y optimización de la fase de sedimentación*.
11. BISIO.A & KABEL.R 1985. Scale-up of chemical processes.
12. BLOCH, C.
13. CARPENTER.K 1986. Fluid processing in agitated vessels. . Vol.64.
14. COLLIVIGNARELLI, C. B., G. 1984. *Journal of international solid wastes and public cleansin association.*, 3.
15. COVINGTON.A 1997. Modern tanning chemistry. *Chemical Society Reviews.*, 111-126.
16. CURBELO.A 1993. *Estudio preliminar para el escalado de la reacción de G- O*. , Villa Clara, Santa Clara, UCLV.
17. CHOI.H, ZHANG.K, DIONYSION.D, OERTHER.D & SORIAL.G 2005. Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment. *Separation and purification technology*. p.68-78.

18. DIONISIO.E. 2012. *Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción*. . Tesis doctoral., Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Química.
19. DOMÍNGUEZ, A., RODRÍGUEZ COUTO, S., SANROMÁN. 2005. Dye decolourization by *Trametes hirsuta* immobilized into alginate beads. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 21, 405–409.
20. ES.WIKIPEDIA.ORG. 2016. Available: <https://es.wikipedia.org> [Accessed].
21. FACETTI.J, DEKOV.V & GRIEKEN.R 1998. Heavy metals in sediments from the Paraguay River: a preliminary study, *Science of the Total Environment.*, P.79-86.
22. FORGACS, E. C., T.; OROS, G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International.*, 30, 953– 971.
23. GIL.J. 2012. *Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca*. . Universidad del Valle Facultad de Ingeniería Santiago de Cali.
24. GÓMEZ, S. A., D; MALDONADO, C; MARTÍNEZ, M; QUEVEDO,B; SOTO, A Y PEDROZA, A. 2008. Evaluación de TRES HONGOS LIGNOLÍTICOS Y DE *Aspergillus niger* COMO
25. ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
26. CURTIDO DE PIELES. *Rev. Int. Contam. Ambient.*
27. GÓMEZ.J & ETCHEVERRY.A. 2010. *Análisis técnico y económico en la recirculación de aguas residuales de pelambre y curtido en una curtiembre*. Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ciencias ambientales. .
28. GONZÁLEZ, E., GONZÁLEZ, V., TECH LOTHAR, SCH. 1987. *Aspectos técnico-económicos en la proyección de plantas química*.
29. GRUNDFOS, W. V.-. 2006. Selección de bombas.
30. GUPTA, V. K., CARROTT, P.J., RIBEIRO, M.M., SUHAS, 2009. Low-cost adsorbents: growing approach to wastewater treatment—A review,. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39, 783-842.
31. GUTIERRES, D. S. 2007. *Plan de gestión integral de residuos peligrosos y programa de educación ambiental.*, Universidad tecnológica de Pereira.
32. HAN, R., ZOU, W., YU, W., CHENG, S., WANG, Y., SHI, J., 2007. Biosorption of methylene blue from aqueous solution by fallen phoenix tree's leaves. *Journal of Hazardous Materials* . 141, 156-162.
33. HORTON.R, W, A., THOMPSON.V & SHERIDAN.P 2006. Low temperature reduction of hexavalent chromium by a microbial enrichment consortium and a novel strain of *Arthrobacter aurescens*. . *Revista BMC Microbiology.*, 1-8.
34. [HTTP://WWW.DF.GOB.MX](http://www.df.gob.mx). 2016. Available: <http://www.df.gob.mx> [Accessed].
35. [HTTP://WWW.NEUTRALAC.COM](http://www.neutralac.com). 2016. Available: <http://www.neutralac.com>2016 [Accessed].

36. KAHALED 2009. Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon.
37. KOSSEN.N 1994. Scale-Up. *Advances in Bioprocesses engineering.*, p.53-65.
38. LANKFORD.P, ECKENFELDER.W & 1990. Toxicity reduction in industrial effluents. . *Van Nostrand Reinhold.*
39. MARTÍNEZ.P. 2004. *Alternativas tecnológicas que permitan alcanzar producciones más limpias en el Establecimiento 101, Tenerife "Patricio Lumumba" del Municipio Caibarién.* . Tesis presentada en opción al grado científico de master en Ingeniería en Saneamiento Ambiental.
40. MIDHA, V. Y. D., A 2008. BIOLOGICAL TREATMENT OF TANNERY WASTEWATER FOR SULFIDE REMOVAL. *Int. J. Chem. Sci.*
41. MOLINA.C. 2013. *Validación de las técnicas para determinación de molibdeno y cromo en agua residual, tratada, cruda y de níquel en agua residual mediante espectrometría de absorción atómica por llama directa para el laboratorio de análisis de aguas y alimentos UTP.* . Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología. Escuela de Química Pereira.
42. MONTAUBAN.R. 2013. *Determinación de cromo (III) y cromo (VI) mediante técnicas electroquímicas de análisis.* . Tesis de grado. Licenciatura en Bioquímica. .
43. NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2012. Vertimiento de las Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado-Especificaciones.
44. ORTIZ.N. 2013. *Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante un proceso sostenible y viable tecnológicamente.* . Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente., Universidad de Manizales. .
45. PAVLOV, K. F., ROMANKOV, P.G., NOSKOV, A.A. 1981. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química.*, Moscú.
46. PÉREZ.Y. 2005. *Estudios preliminares para la remoción de Cr³⁺ en columnas rellenas con bagazo modificado químicamente.* . Tesis de Diploma. .
47. PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K.D., WEST, R.E. 2003. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers.*, New York.
48. PETERS.M, TIMMERHAUS.K & WEST.R 1991. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers.*, Editorial Advisory Board.
49. PIGMENS., D. 2010. *What make dyes colored?* [Online]. [Accessed].
50. RAVI, K., DEEBIKA, B., BALU, K., 2005. Decolourization of aqueous dye solutions by a novel adsorbent: application of statistical designs and surface plots for the optimization and regression analysis. *Journal of Hazardous Materials.*, 122, 75-83.
51. REY DE CASTRO, A. C. 2013. *Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo.*, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

52. REY.A. 2013. *Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo*. Tesis en opción al título de Licenciado en Química.
53. ROBINSON, T. 2002. Effect of pretreatments of three waste residues,
54. wheat straw, corncobs and barley husks on dye adsorption. *Bioresource Technology*.
55. RODRÍGUEZ.I & BLÁZQUEZ.G 2010. *Escalado de reactores químicos y biológicos*. .
56. ROSABAL, J. V., M. 2006. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*., La Habana.
57. ROSABAL.J & GARCELL.L 2006. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. .
58. RUÍZ.A. 2009. *Factores de escala para la producción biotecnológica de etanol carburante*. . Tesis para optar por el título de doctorado en ingeniería. , Universidad Nacional de Colombia. Sede de Medellín. Facultad de minas. Escuela de procesos y energía. .
59. SALAS C, G. 2005. ELIMINACIÓN DE SULFUROS POR OXIDACIÓN EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE UNA CURTIEMBRE. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím*.
60. SALMERÓN, J. 1995. *Generación y tratamiento de residuos en la industria del curtido de Valencia*.
61. SÁNCHEZ.J, LUJANO.E, BARICELLI.P, ROMERO.C, BOLÍVAR.C & PARDEY.A 2001. Desarrollo de un proceso para la remoción y recuperación de iones Cr (III) en efluentes de tenerías. *ABES: Associacao Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
62. SARDIÑAS RIVAS, R. 2006. *EVALUACION DE LA TECNOLOGIA UTILIZADA PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUAL GALVANICO DE LA PLANTA PROGAR DE LA EMPRESA INPUD 1RO DE MAYO Y DISPOSICION DEL EFLUENTE SÓLIDO OBTENIDO*.
63. SEMARNAP 1999. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de curtidería.: México.
64. SEOANEZ CALVO, M. 2000. *Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos*.
65. SMITH.G 1990. Turbulent flow in stirred tanks: scale up computation for vessel hydrodynamics. Vol.93.
66. TOMASINA.F, LABORDE.A, GÓMEZ.F, SPONTÓN, F., CHAVES.E & ALÉ.S 2005. Dermatitis laboral x Cromo: a propósito de un caso. .
67. WWW.CUERONET.COM. 2016. Available: <http://www.cueronet.com/tecnica/residuos.htm> [Accessed].
68. WWW.LENNTECH.COM 2016.
69. WWW.MEDIOAMBIENTE.CU. Available: <http://www.medioambiente.cu> [Accessed].

70. ZOLLINGER, H. 2003. *Color Chemistry. Syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments.*, Wiley VCH.

Anexos.

Anexo 1.

Residual de pelambre:

Características del proceso:

- Volumen de agua para el proceso: 50,74 m³/día.
- La descarga de los efluentes representa el mayor aporte de carga orgánica (presencia de proteínas degradadas, superan el 50% del total de la carga contaminante; sulfuro y cal; pequeñas cantidades de grasa, elevado contenido de restos de pelo y proteínas (principalmente queratina).
- El pH del efluente es de 11 a 12.

Equipamiento:

Cantidad de bombos: 12.

Capacidad de los bombos: 3500 kg de piel.

Ciclo de descarga:

Se descargan diariamente 6 bombos.

Volumen de residual de pelambre en la descarga: 2,2 m³

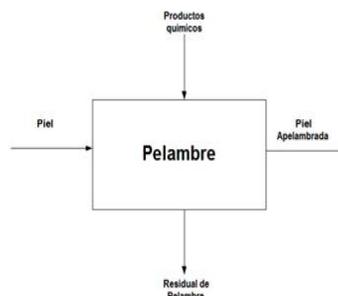


Tabla 1. Consumo de agua en la etapa de Pelambre para un bombo

Fases del proceso tecnológico	Bombo5	Bombo5	Bombo11	Promedio
Específico(mm)	2,	1,6-1,8	1,8-2,0	1,6-1,8
Agua añadida al comenzar(L)	1750	2500	2300	2183
Agua utilizada para el lavado(L)	44067,5	51750	49852	48557
Subtotal del proceso(L)	45817,5	54250	52152	50740

(Fuente: Reporte de la UEB y Empresa).

Residual de Curtido:

Equipamiento:

Cantidad de bombos: 6.

Capacidad de los bombos: 3 500 kg de piel.

Ciclo de descarga:

Se descargan diariamente.

Volumen de residual de curtido en la descarga: 23 m³/día.

(Las cantidades generadas del propio proceso de curtición y las disoluciones de los ácidos es de 3 713 L/bombo).

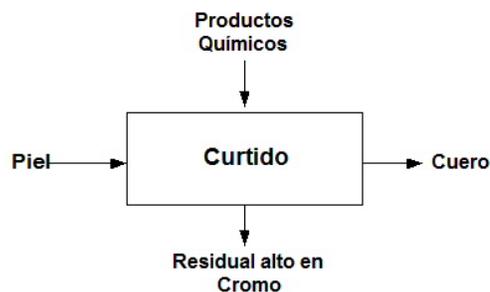


Tabla 2. Consumo de agua en el la etapa de Curtido para un bombo.

Fases del proceso tecnológico	Bombo5	Bombo5	Bombo11	Promedio
Específico(mm)	2,0	1,6-1,8	1,8-2,0	1,6-1,8
Agua empleada en el piquelado(L)	5000	2750	2625	3458
Agua empleada en la disolución del ácido fórmico y sulfúrico. (L)	165	300	300	255
Agua empleada en el lavado final(L)	1250	2500	2250	2000
Subtotal del proceso. (L)	6415	5550	5175	5713

(Fuente: Reporte de la UEB y Empresa).

Residual del teñido:**Equipamiento:**

Cantidad de bombos: 6.

Capacidad de los bombos: 1500 kg de piel.

Ciclo de descarga:

Se descargan diariamente 3 bombos.

Volumen de residual de teñido en la descarga: 6 m³/día**Anexo 2.***Tabla 3. Características generales promedio de los residuales líquidos de las etapas de pelambre, curtido y teñido de la tenería "Patricio Lumumba" en Caibarién.*

Características	Pelambre	Curtido	Teñido	Equipo
Temperatura (°C)	30	30	40	
pH	12,22	3,86	4,46	pH-metro (HANNA Instruments, HI-22).
DQO (mg/L)	48 216	2 952	11 808	
Concentración de sulfuros (mg/L)	2 189,61	-	-	
Concentración de cromo total (mg/L)	-	5 398,2	10,25	Espectrofotómetro de absorción atómica. (Spectrophotometer PG 990).
Conductividad (µS/cm)	480	492	288	Conductímetro (DDSJ- 308 ^a)
Absorbancia	-	-	4,38	

Anexo 3.*Tabla 4. Matriz del diseño experimental del tratamiento de Remoción de sulfuros y valor de la variable respuesta de cada corrida del diseño factorial 2^k punto central.*

Experimentos	Bloque	X ₁	X ₂	% Remoc Sulfuro
E ₁	1	1	-1	0,40564827
E ₂	1	0	0	0,51767583
E ₃	1	1	1	0,44111576
E ₄	1	-1	1	0,56276073
E ₅	1	-1	-1	0,44286438
E ₆	2	1	-1	0,34395147
E ₇	2	0	0	0,53341342
E ₈	2	1	1	0,39253362
E ₉	2	-1	1	0,55751487
E ₁₀	2	-1	-1	0,50893273
E ₁₁	3	1	-1	0,30955633

E ₁₂	3	0	0	0,54487847
E ₁₃	3	1	1	0,42692876
E ₁₄	3	-1	1	0,54604982
E ₁₅	3	-1	-1	0,55479292

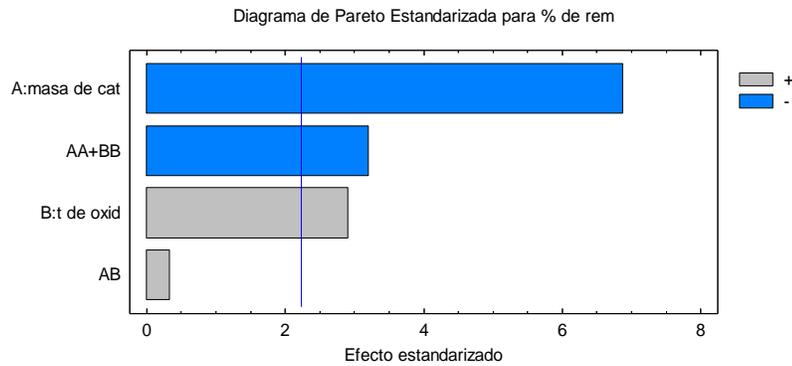


Figura 1. Diagrama de Pareto estandarizado para la Remoción de sulfuros

R-cuadrada = 86,8644 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 81,6101 porciento

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar % de rem

Valor óptimo = 0,577479

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
masa de cat	60,0	120,0	76,3178
t de oxid	4,0	6,0	6,0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza % de rem sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

Anexo 4.**Balance de masa en la remoción de sulfuros a escala de laboratorio.**

- **Cribado:**

(Se utiliza una malla de 3mm para separar los residuos de pelos contenidos en un volumen de 150 mL de agua residual) $X = Y + Z$

Entrada	Salida
Res. de pelambre: X=150 mL ($\rho = 1042 \text{ Kg/m}^3$)	Res. cribado: Y=147 mL (m=149,1g) ($\rho = 1014 \text{ Kg/m}^3$) , Rechazo: Z=7,2 g

- **Sedimentación:**

(Se utiliza probeta calibrada, tiempo de operación; 6 min, decanta el pelo y el lodo crómico que pudo quedar en el residual).

Entrada	Salida
Res. cribado: 149,1 g	Sobrenadante: 142 mL (m=143,3 g) ($\rho = 1009 \text{ Kg/m}^3$) Lodo: 5,8 g

- **Oxidación de sulfuro:**

(Se utiliza vaso de precipitado, velocidad de agitación 400 rpm; se le añade catalizador de MnSO_4).

Entrada	Salida
Sobrenadante: 142 mL, (m=143,3 g) MnSO_4 : 0,54 mg/ mL de residual	Efluente final: 192 g

- **Secado:**

(Se utiliza secado en bandeja al sol, durante 24 h. Se incorpora el lixiviado al proceso).

$$X = Y + Z$$

Entrada	Salida
Lodo: X=5,8 g	Z=Lodo:3,6 g
Secado al sol	Y=Lixiviado: 1,4 g

Anexo 5

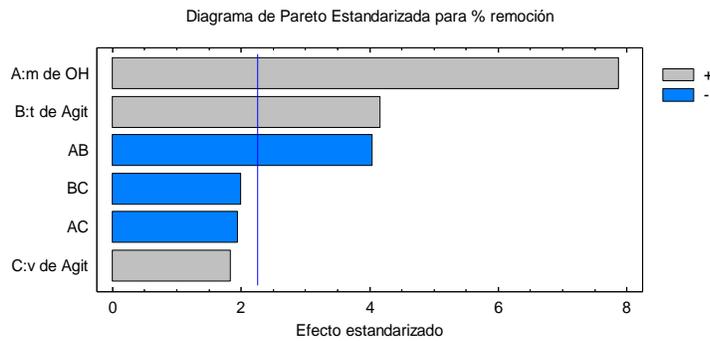
Método para determinar las mejores condiciones para llevar a cabo la precipitación del $\text{Cr}(\text{OH})_3$,

1. Se filtró la muestra de residual tomada del bombo para eliminar las impurezas y las fibras de cuero que pudieran haber quedado de etapas anteriores.
2. Se prepararon 16 vasos de precipitado con 150 mL de residual (base de cálculo) en cada uno y se procedió a cumplir con las especificaciones del diseño experimental.
3. Se añadió 5 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para elevar el pH a 7 y 10 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para elevarlo a 9.
4. Una vez terminados los experimentos se filtraron las muestras y se cuantificó la concentración de cromo en el líquido filtrado, usando el espectrofotómetro de absorción atómica, **Modelo PG-990, Marca Pye UNICAM.**

Anexo 6

Tabla 4. Matriz del diseño experimental del tratamiento químico y valor de la variable respuesta de cada corrida del diseño factorial 2^3 .

Experimentos	Bloque	X_1	X_2	X_3	Conc de cromo (mg/L)	Remoción de cromo
E_1	1	1	1	-1	1,16	0,999785114
E_2	1	1	-1	1	0,13	0,999975918
E_3	1	1	-1	-1	1,25	0,999768441
E_4	1	1	1	1	0,22	0,999959246
E_5	1	-1	-1	-1	4,74	0,99912193
E_6	1	-1	1	1	0,189	0,999964988
E_7	1	-1	1	-1	2,98	0,999447964
E_8	1	-1	-1	1	0,18	0,999966656
E_9	2	1	1	-1	1,89	0,999649883
E_{10}	2	1	-1	1	0,075	0,999986106
E_{11}	2	1	-1	-1	1,67	0,999690638
E_{12}	2	1	1	1	0,08	0,99998518
E_{13}	2	-1	-1	-1	6,85	0,998731059
E_{14}	2	-1	1	1	0,176	0,999967397
E_{15}	2	-1	1	-1	3,08	0,999429439
E_{16}	2	-1	-1	1	0,137	0,999974621



5.

6. Figura 2. Diagrama de Pareto estandarizado para la Remoción de cromo.

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar % remoción

Valor óptimo = 1,00005

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
m de OH	5,0	10,0	10,0
t de Agit	15,0	30,0	30,0
v de Agit	70,0	190,0	70,0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza % remoción sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

Anexo 8.

(a). Balance de masa a la remoción de hidróxido de cromo (III) a escala de laboratorio en el proceso de curtición.

- **Cribado:**

(Se utiliza una malla con orificios de $D_{p_{sup}} = 1 \text{ mm}$)

Expresión para el balance total: $X = Y + Z$

<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
Res. de curtido: X =194 g ($\rho = 1\,293\text{ Kg/m}^3$, V=150 mL)	Res. cribado: Y =189,4 g ($\rho = 1280\text{ Kg/m}^3$, V=148 mL) Rechazo: Z=4,605 g (representa el 2,4% de la masa del residual)

- **Precipitación:**

(Reactor con agitación de 0,0635 kW, n= 70 rpm, tiempo de agitación t = 30 min).

Expresión para el balance total: X+Y=Z

<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
Res filtrado: X =189,4g Y =Ca(OH) ₂ : 10 g	Res. Tratado: Z = 191,7 g

- **Sedimentación (prueba en probeta):**

<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
Res. Tratado: X = 191,7 g ($\rho = 1291\text{ Kg/m}^3$)	Sobrenadante: 125mL ($\rho = 1\,070\text{ Kg/m}^3$), m=133,75 g Cr(OH) ₃ Húmedo: 39,5 g

- **Secado:**

(En bandeja al sol durante 24 h)

Expresión para el balance total: X = Y + Z

<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
Cr(OH) ₃ Húmedo: X = 39,5 g	Cr(OH) ₃ : Y = 9,6 g Agua: Z = 29,9 g

Tabla 6. Resultados del comportamiento Z vs t, de la prueba de sedimentación en probeta.

Tiempo (min)	Z(cm)
0	13,9
2	12,7
4	11,5
6	10
8	8,5
10	7,3
12	6
14	4,9
16	3,5

18	2,3
20	2,1
22	2
24	1,9
26	1,8
28	1,7
30	1,6
32	1,6
34	1,6

Anexo 9.

Balance de masa para el cálculo de los rangos de masa de hidróxido de calcio a añadir, en el residual del proceso de teñido.

Sustancia	Masa molar (g/mol)
$Ca(OH)_2$	74
Cr^{3+}	52

Fuente: (Sardiñas, R., 2006))

$$R.C \left(\frac{Ca(OH)_2}{Cr} \right) = \frac{74}{52} = 1,423$$

$$m(Ca(OH)_2) = 1,423 * V_o * C(Cr)$$

$$m(Ca(OH)_2) = 1,423 * 0,000150 \text{ m}^3 * 10,25 \text{ ppm}$$

$$(Ca(OH)_2) = 0,0022 \text{ g}^2: \text{ para garantizar la reacción .}$$

$$(Ca(OH)_2) = 0,0044 \text{ g}$$

Anexo 10.**(a). Balance de masa a escala de laboratorio en el proceso de teñido.****Cribado.**

(Se utiliza una malla de 1mm de diámetro de orificio) $X = Y + Z$

Entrada	Salida
Res. de teñido: $X=150 \text{ mL}$ ($m=148,4 \text{ g}$) ($\rho = 989 \text{ Kg/m}^3$)	Res. cribado: $Y=145 \text{ mL}$ ($m=140 \text{ g}$) ($\rho=964 \text{ Kg/m}^3$) Rechazo: $Z=8,4 \text{ g}$ (representa el 5,7% de la masa del residual)

Precipitación.

(Se utiliza beaker con agitación; $N: 0,0635 \text{ kW}$; $n= 70 \text{ rpm}$. Se añade hidróxido de calcio)

Entrada	Salida
Res cribado: 140 g $\text{Ca(OH)}_2: 4,4 \text{ mg}$	Res. Tratado: $142,1 \text{ g}$, $\rho=978,7$ Kg/m^3

Filtración $X = Y + Z$

Entrada	Salida
Res. Tratado: $X=145,2 \text{ mL}$ ($m=142,1 \text{ g}$)	Filtrado: $Y =143 \text{ mL}$, $m=142,09 \text{ g}$ ($\rho=1006,4 \text{ Kg/m}^3$) $\text{Cr(OH)}_3 \text{ Húmedo}: Z=8,2 \text{ mg}$ (a secadero al sol)

Homogenización

(En un beaker con agitador de potencia $0,0635 \text{ kW}$), velocidad de agitación 80 rpm se añade hipoclorito de sodio en relación 1/7)

$$X + Y = Z$$

Entrada	Salida
Filtrado: $X=143 \text{ mL}$ Hipoclorito de sodio: $Y=20 \text{ mL}$	Residual final: $Z =163 \text{ mL}$

Anexo 11.***Selección, diseño y escalado del equipamiento de la planta de oxidación de sulfuros al residual del proceso de pelambre.*****(a). Criba:**

La cantidad de pelo representa de un 3-5 % de la piel salada recortada, según el reporte de (Facetti.J et al., 1998). Por tanto la cantidad de pelo contenido en 2,21 m³.

$$m_{\text{pelo}}=0,03*3\ 500$$

$$m_{\text{pelo}}=105\ \text{kg}$$

$$V_{\text{bombo}}= 2,21\ \text{m}^3$$

Densidad del residuo: 6^oBe = 1042 kg/m³(por datos del laboratorio)

$$m_{\text{residual}}=2\ 292,4\ \text{Kg}$$

El pelo representa el 4,6 % de la masa de residual.

Por lo que para una base de cálculo de 0,1 m³ de residual la planta piloto va a requerir las siguientes dimensiones.

$m_{\text{de residual}} = 104,2\ \text{Kg}$ (de ello se va a retener aproximadamente el 60% del pelo en la criba, lo cual equivale a 2,88 Kg de pelo).

$$m_{\text{cribada}}= 101,32\ \text{Kg}$$

Criba de mallas finas de limpieza manual.

Planchas de acero con orificios de 3 mm de diámetro

(b). Tanque de compensación:

Se requieren almacenar 0,0999 m³ de residual, aproximadamente 0,1 m³.

$$V_R = 0,1*1,12; \text{ considerando un 12 \% de sobre diseño.}$$

$$V_R = 0,112\ \text{m}^3$$

Teniendo en cuenta que el residual que se va a coleccionar proviene de la operación de pelambre, se conoce por el capítulo 2 que el pH es 11-12, por lo que se va a requerir que el tanque sea de acero recubierto con PVC.

La relación de $\frac{H}{D} = 1$.

Tabla 7. Características técnicas del tanque de almacenamiento de residual.

Parámetro	Valor
Volumen de líquido (m ³)	0,1
Altura del Líquido (m)	0,47
Volumen del tanque (m ³)	0,112
Diámetro (m)	0,52
Altura (m)	0,52

(c). Decantador:

Para un volumen a sedimentar de 0,1 m³.

Se procedió a diseñar el sedimentador por el método de (PAVLOV, 1981).

$$F_{sed} = \frac{Qv}{v'_{sed}} \quad v'_{sed} = 0,5 v_{sed} \quad v'_{sed} = 0,5 * 0,05$$

$$v'_{sed} = 0,025 \text{ cm/s} = 0,00025 \frac{m}{s}$$

$$Qv = \frac{0,1 m^3}{330 s} = 0,000303 \frac{m^3}{s} \quad F_{sed} = 1,21 m^2$$

$$Vd = \frac{Qv \cdot C^o}{\rho p} (tf - tc) + \frac{Qv \cdot C^o}{\rho \cdot X} (tf - tc) \quad \text{Ec 6.23 (ROSABAL, 2006)}$$

$$Vd = 0,0143 m^3$$

$$C^o = 12,89 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{calculado experimentalmente})$$

$$tf = 330 s \quad (\text{calculado experimentalmente})$$

$$tc = 180 s \quad (\text{calculado experimentalmente})$$

$$X = \frac{x}{1-x} = 0,042 \quad \text{Ec 5,2 (Rosabal, J.M., 2006)}$$

$$h d = \frac{Vd}{F_{sed}} \quad \text{Ec 6.27 (Rosabal, J.M., 2006)}$$

$$h d = 0,012 m$$

$$h_{sed} = h_{alim} + h_{cono} + h_{alm} + h d \quad \text{Ec 6.28 (Rosabal, J.M., 2006)}$$

$$h_{alim} = h_{cono} = h_{alm} = 0,3 m \quad h_{sed} = 0,912 m = 1 m$$

Datos.

Fracción peso de sólidos en suspensión(x): 4 % (experimentalmente)

$$\rho = 1009 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{calculado experimentalmente})$$

$$\rho_s = 1014 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{calculado experimentalmente})$$

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{x}{\rho_p} + \frac{1-x}{\rho} \quad (\text{Rosabal, J.M., 2006})$$

Despejando ρ_p :

$$\rho_p = 1156,1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

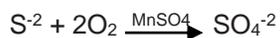
Conociendo el Área de sedimentación se puede determinar las dimensiones del sedimentador.

$$D_{sed} = 1,24 \text{ m y } h_{sed} = 1 \text{ m}$$

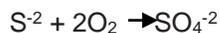
El lodo del sedimentador se puede descargar cada dos semanas, ya que este no representa un volumen significativo en el sedimentador.

(d). Tanque de oxidación de sulfuro con aire:

La reacción total:



Para oxidar el sulfuro a sulfato la cantidad estequiométrica (teórica) de oxígeno requerida es de 2 g $\text{O}_2/\text{g S}^{-2}$, de acuerdo a la siguiente reacción:



$$32 \text{ g/mol} + 2 \times 32 \text{ g/mol} = 96 \text{ g/mol}$$

$$V_m = 22,4 \frac{\text{L}}{\text{mol}}: \text{Volumen molar de cada gas.}$$

Como 2 mol $\text{O}_2/\text{mol S}^{-2}$:

$$n_{teo} * V_m = 44,8 \text{ L. Volumen de } \text{O}_2 \text{ teórico.}$$

Sin embargo, en la práctica, la dosis de oxígeno necesaria es mucho mayor, dado que depende de varios factores, como la concentración del sulfuro, la temperatura y la eficiencia del sistema de aeración (tamaño de las burbujas y tiempo de contacto). Éste último, en el mejor de los casos, puede variar entre 25-30%. Por este motivo los sistemas de aeración deben ser los más eficientes posibles para reducir los tiempos, uso de insumos y facilitar la oxidación.

Se suministra el doble del oxígeno teórico requerido:

$$\text{Relación } VO_2 \text{ real} = \frac{89,6 \text{ L}}{\text{mol } S^{-2}}$$

$$V \text{ efluente} = 100 \text{ L con una Concentración } 2189,61 \frac{\text{mg } S^{-2}}{\text{L}}$$

$$m \text{ } S^{-2} = 218,961 \text{ g}$$

$$M (S^{-2}) = 32,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$n(S^{-2}) = \frac{m \text{ } S^{-2}}{M(S^{-2})} = 6,82 \text{ mol } S^{-2}$$

$$VO_2 \text{ real} = \frac{611,1 \text{ L de } O_2}{100 \text{ L efluente}}$$

Cálculo del volumen de aire necesario teniendo como referencia que el O_2 representa el 20% del aire.

$$\frac{20 \text{ L de } O_2}{100 \text{ L aire}} = \frac{611,1 \text{ L de } O_2}{\text{Vol de aire}}$$

$\text{Vol de aire} = 3055,55 \text{ L de aire}$: durante 6 h que es el tiempo que se demora el proceso de oxidación.

$$Q \text{ aire} = 8,49 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 0,3 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

Dimensiones del tanque:

Se requieren tratar aproximadamente $0,1 \text{ m}^3$ de residual.

$V_R = 0,1 * 2,12$; considerando un 12 % de sobre diseño y que el tanque debe contar con el doble de su capacidad para evitar que se rebose.

$$V_R = 0,212 \text{ m}^3$$

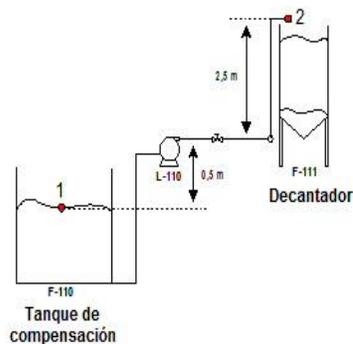
La relación de $\frac{H}{D} = 2$

Tabla 8. Características técnicas del tanque de oxidación.

Parámetro	Valor
Volumen de líquido (m ³)	0,1
Altura del Líquido (m)	0,49
Volumen del tanque (m ³)	0,212
Diámetro (m)	0,51
Altura (m)	1,02
Tubería acoplada desde el compresor al fondo del tanque con placa orificio de 0,5 mm de diámetro.	

(e). Bombas para impulsar el fluido desde el tanque de compensación al sedimentador:

Balance de energía mecánica:



Datos:

$$\Delta Z = 3$$

$v = 1,5 \text{ m/s}$ (líquidos en tuberías a presión).

Tabla 1-1 (Pavlov, K.F., 1981)

$$D_N = 1 \frac{1}{2}'' = 0,0483 \text{ m}$$

$$d_i = 0,0409 \text{ m}$$

$$A = 0,001313 \text{ m}^2$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$L = 15 \text{ m}$$

$$\rho = 1014 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,0011 \text{ Kg/m.s}$$

$e = 0,0002 \text{ m}$ (Tubos de acero sin costura y tubos soldados no corroidos) Tabla 9 del Rosabal.

Tabla 9. Cálculo de los accesorios.

Parámetro	K
Entrada	0,5
Salida	1
5 codos de 90°	3,75
1 válvulas de globo	6
Σk	11,25

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_p$$

Cálculo del flujo:

$$Q_v = A \times v$$

$$Q_v = 1,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del número de Reynold:

$$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.27}) \quad (\text{PAVLOV, 1981})$$

$$Re = 56553,5 > 4000 : \text{Régimen turbulento}$$

Cálculo de la diferencia de velocidad:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0,1148 \text{ m}$$

Cálculo de las pérdidas totales:

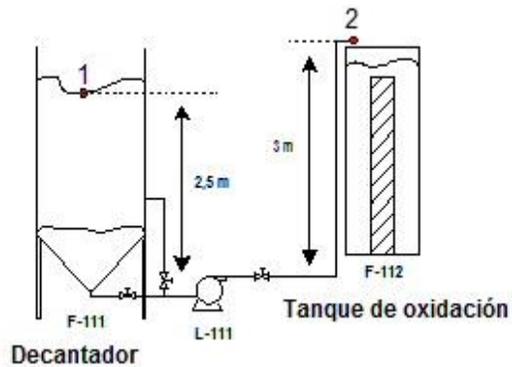
$f = 0,032$ (determinado gráficamente, Fig 3.9 del Rosabal).

$$h_{pt} = \left(\frac{f \times L}{d} + \sum K \right) \times \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{pt} = 2,64 \text{ m}$$

$$H = 5,76 \text{ m}$$

Bomba L-110: Modelo KP 350 M 1 que tiene una potencia de 0,61 kW y consume 164 kWh/año para una carga de 5,8 m y un flujo volumétrico de 2,19 L/s. (**Bloch**).

(f) Bombas para impulsar el fluido desde el sedimentador al tanque oxidación de sulfuros:**Datos:**

$$\Delta Z = 0,5 \text{ m}$$

$v = 1,5 \text{ m/s}$ (líquidos en tuberías a presión). **Tabla 1-1 (PAVLOV, 1981)**

$$D_N = 1'' = 0,0335 \text{ m}$$

$$d_f = 0,02664 \text{ m}$$

$$A = 0,000557 \text{ m}^2$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$L = 8 \text{ m}$$

$$\rho = 1009 \text{ Kg/m}^3$$

Tabla 10. Cálculo de los acces

Parámetro	K
Entrada	0,5
Salida	1
4 codos de 90°	3
3 válvulas de globo	18
1 Te	1
$\sum k$	23,5

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_p$$

Cálculo del flujo:

$$Q_v = A \times v$$

$$Q_v = 0,84 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del número de Reynold:

$$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.27}) \quad (\text{PAVLOV, 1981})$$

$$Re = 36654,22 > 4000 : \text{ Régimen turbulento}$$

Cálculo de la diferencia de velocidad:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0,1148 \text{ m}$$

Cálculo de las pérdidas totales:

$f = 0,038$ (determinado gráficamente, Fig 3.9 del Rosabal).

$$h_{pt} = \left(\frac{f * L}{d} + \sum K \right) * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{pt} = 4 \text{ m}$$

$$H = 4,62 \text{ m}$$

Bomba L-111: Modelo: KP 350 M 1 que tiene una potencia de 0,649 kW y consume 14 kWh/año para una carga de 4,6 m y un flujo volumétrico de 2,71 L/s. (GRUNDFOS, 2006)



Bomba L-110



Bomba L-111

Anexo 12.

Selección, diseño y escalado del equipamiento de la planta de remoción de cromo trivalente contenido en el residual del proceso de curtido.

(a). Tanque de compensación:

Se requieren almacenar $0,986 \text{ m}^3$ de residual (1 m^3).

$V_R = 0,986 * 1,12 \text{ m}^3$; considerando un 12 % de sobre diseño.

$V_R = 1,104 \text{ m}^3$

La relación de $\frac{H}{D} = 1$.

(b). Tanque de precipitación química.

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se va a utilizar para controlar el pH a 9, valor al que se logra separar la mayor cantidad posible de cromo III de efluente.

Para un volumen de 148 mL a escala de laboratorio se requiere de 10 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por lo que se estima la masa de este, necesario para un volumen mayor.

$$\left(\frac{10 \text{ g}}{0,000148 \text{ m}^3} \right)_{lab} = \left(\frac{m}{0,986 \text{ m}^3} \right)_{piloto}$$

$$m = (66,6 \text{ kg de Ca(OH)}_2)_{\text{piloto}}$$

Agente precipitante: 66,6 Kg de cal apagada que equivale a $0,03 \text{ m}^3$ ($\rho_{\text{ap}}=2211 \text{ Kg/m}^3$).

$$V = 0,986 + 0,03 = 1,016 \text{ m}^3, \text{ aproximar a } 1 \text{ m}^3.$$

$$V_R = 1,12 \text{ m}^3; \text{ considerando un } 12 \% \text{ de sobre diseño.}$$

$$V_R = 1,12 \text{ m}^3$$

Criterios de diseño del reactor: similitud geométrica:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{\text{laboratorio}} = \left(\frac{H}{D}\right)_{\text{piloto}}$$

$$H_{\text{lab}} = 11 \text{ cm y } D_{\text{lab}} = 7 \text{ cm}$$

$$\left(\frac{Hr}{D}\right)_{\text{piloto}} = 1,57$$

$$Hr = 1,57 * D$$

$$Hr = 1,57 \text{ m y } D = 1 \text{ m}$$

$$H = 1,27 \text{ m}$$

Escalado del agitador:

Criterios de selección del agitador por similitud geométrica:

$$d = (0,43).D$$

$$H = (0,55).D$$

$$b = (0,5).D$$

$$h \leq 0,3.D$$

Se seleccionó según la Tabla 21. Apéndice. (ROSABAL, 2006) plantea que para $d/D=0,5$ se utiliza el agitador de placas.

Agitador de placas, tipo 3, $\alpha = 90^\circ$ y $Z=2$

Aplicando criterio de potencia por unidad de volumen propuesto por (Rodríguez.I and Blázquez.G, 2010)

$$\left(\frac{n^3 * d^5}{V}\right)_{\text{lab}} = \left(\frac{n^3 * d^5}{V}\right)_{\text{piloto}}$$

$$n_{\text{lab}} = 1,17 \text{ s}^{-1}$$

$$d_{\text{lab}} = 0,03 \text{ m}$$

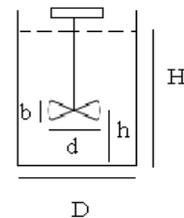
$$V_{\text{lab}} = 0,000148 \text{ m}^3$$

$$d_{\text{piloto}} = 0,43 \text{ m}$$

$$V_{\text{piloto}} = 1 \text{ m}^3$$

Cálculo de la potencia del agitador:

$$\text{Calcular el régimen de mezclado: } Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu} \quad \rho_{\text{ap}} = 1285,14 \text{ Kg/m}^3 \text{ (experimentalmente)}$$



$$\mu = 1,1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{experimentalmente}) = 1,1 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$Re \text{ m piloto} = 56165,29 = 5,6 \times 10^4$$

$$Re \text{ m lab} = 1230,23 = 1,2 \times 10^3$$

Cálculo de la potencia del agitador:

Ir a Figura 9,7 y seleccionar $K_N = 0,5$, hacer corrección porque $H \neq D$ y $D/d \neq (1,33-1,5)$, según la expresión:

$$KN \text{ correg.} = KN * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,5} * \left(\frac{D}{\frac{D}{d} \text{ tab}}\right)^{0,5}$$

$$KN \text{ correg.} = 1,07$$

$$KN \text{ correg.} = \frac{N}{d^5 \cdot n^3 \cdot \rho}$$

$$N = KN \text{ correg.} \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho$$

$$N = 0,36 \text{ W}$$

$$N_{int} = N + 2 * N$$

$$N_{int} = 1,08 \text{ W} = 0,00108 \text{ kW}$$

Ir a Tabla 14. Apéndice I. (ROSABAL, 2006)

Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica $n = 1800 \text{ rpm}$.

(c). Tanque de sedimentación de Cr(OH)_3 :

Se procedió a diseñar el sedimentador por el método del (Pavlov EC 3.11).

$$F_{sed} = \frac{Q_v}{v'_{sed}} \qquad v'_{sed} = 0,375 \text{ cm/min} = 0,0000625 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v'_{sed} = 0,5 v_{sed}$$

$$Q_v = \frac{0,9929 \text{ m}^3}{38 \text{ min}} = 0,000435 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v'_{sed} = 0,5 * 0,75$$

$$F_{sed} = 6,96 \text{ m}^2$$

$$Vd = \frac{Q_v \cdot c_o}{\rho_p} (t_f - t_c) + \frac{Q_v \cdot c_o}{\rho \cdot X} (t_f - t_c) \text{ Ec 6.23 Rosabal}$$

$$Vd = 0,757 \text{ m}^3$$

$$C^o = 258,2 \frac{Kg}{m^3} \text{(Experimentalmente)}$$

$$t_f = 38 \text{ min} = 2280 \text{ s} \text{(Experimentalmente)}$$

$$t_c = 8 \text{ min} = 480 \text{ s} \text{(Experimentalmente)}$$

$$X = \frac{x}{1-x} : \text{Ec 5,2 Rosabal}$$

$$X = 0,25$$

$$h_d = \frac{v_d}{F_{sed}} \text{ Ec 6.27 Rosabal}$$

$$h_d = 0,11 \text{ m}$$

$$h_{sed} = h_{alim} + h_{cono} + h_{alm} + h_d \text{ Ec 6.28 Rosabal}$$

Según el Rosabal: $h_{alim} = 0,3 \text{ m}$, $h_{cono} = 0,3 \text{ m}$, $h_{alm} = 0,3 \text{ m}$

Sustituyendo: $h_{sed} = 1,1 \text{ m}$

Datos.

Fracción peso de sólidos en suspensión(x): 20% (experimentalmente)

$$\rho = 1070 \frac{Kg}{m^3} \text{(Experimentalmente)}$$

$$\rho_s = 1291 \frac{Kg}{m^3} \text{(Experimentalmente)}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{x}{\rho_p} + \frac{1-x}{\rho} : \text{Ec 5,6 Rosabal}$$

Despejando ρ_p :

$$\rho_p = 7315,3 \frac{Kg}{m^3}$$

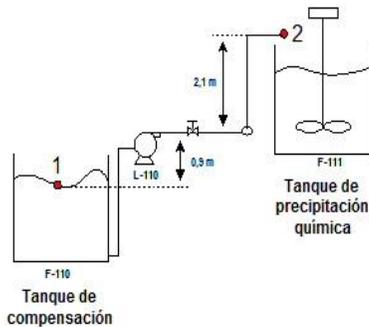
Conociendo el Área de sedimentación se puede determinar las dimensiones del sedimentador.

$$D_{sed} = 3 \text{ m} \text{ y } h_{sed} = 1,1 \text{ m}$$

Para un volumen a sedimentar de 1 m^3 :

(d). Selección de bombas.

Aplicación del balance de energía mecánica:



Datos:

$\Delta Z = 3m$

$v = 1,5 \text{ m/s}$ (líquidos en tuberías a presión). **Tabla 1-1 (Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981)**

$D_N = 1'' = 0,0335 \text{ m}$

$d_i = 0,0266 \text{ m}$

$A = 0,00056 \text{ m}^2$

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$L = 11 \text{ m}$

$\rho = 1293 \text{ Kg/m}^3$

$\mu = 0,0011 \text{ Kg/m.s}$

$e = 0,0002 \text{ m}$ (Tubos de acero sin costura y tubos soldados no corroidos) **Tabla 9**

Tabla 11. Determinación de accesorios.

Parámetro	K
Entrada	0,5
Salida	1
5 codos de 90°	3,75
1 válvulas de globo	6
Σk	11,25

$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_p$

Cálculo del flujo:

$Q_v = A \times v$

$Q_v = 0,84 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Cálculo del número de Reynold:

$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu}$ (Ec. 1.27.) (Pavlov, K.F.,

Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981)

$Re = 46900,6 > 4000$: Régimen turbulento

Cálculo de la diferencia de velocidad:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0,1148 \text{ m}$$

Cálculo de las pérdidas totales:

$f = 0,037$ (determinado gráficamente, Fig 3.9 del Rosabal).

$$h_{pt} = \left(\frac{f * L}{d} + \sum K \right) * \frac{v^2}{2g}$$

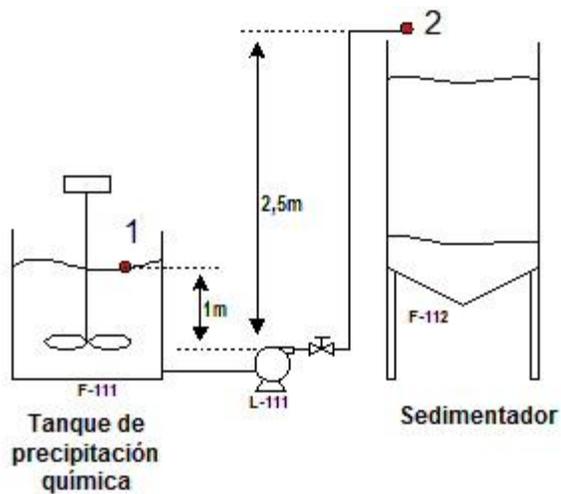
$$h_{pt} = 3,05 \text{ m}$$

$$H = 6,17 \text{ m}$$

Modelo: KP 350 M 1 que tiene una potencia de 0,592 kW y consume 18 kWh/año para una carga de 6,17 m y un flujo volumétrico de 1,97 L/s. (**Softwar Drunfus**).

Bombas (L-111):

Aplicación del balance de energía mecánica:



◀ Datos:

$$\Delta Z = 1,5 \text{ m}$$

$v = 1,5 \text{ m/s}$ (líquidos en tuberías a presión). **Tabla 1-1 (Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981)**

$$D_N = 1 \frac{1}{2}'' = 0,0483 \text{ m}$$

$$d_i = 0,0409 \text{ m}$$

$$A = 0,001313 \text{ m}^2$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$L = 5 \text{ m}$$

$$\rho = 1460 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,0012 \text{ Kg/m.s}$$

$e = 0,0002 \text{ m}$ (Tubos de acero sin costura y tubos soldados no corroídos) *Tabla 9 del Rosabal.*

$$\Delta P_{\text{filtro}} = 0,16 \text{ Pa} = 1,63 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \text{ (Determinado experimentalmente)}$$

◀ **Tabla 12.** Determinación de accesorios.

Parámetro	K
Entrada	0,5
Salida	1
2 codos de 90°	1,5
1 válvulas de globo	6
Σk	9

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_p$$

Cálculo del flujo:

$$Q_v = A \times v$$

$$Q_v = 1,97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del número de Reynold:

$$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.27}) \quad (\text{Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981})$$

$Re = 74642,5 > 4000$: Régimen turbulento.

Cálculo de la diferencia de velocidad:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0,1148 \text{ m}$$

Cálculo de las pérdidas totales:

$f = 0,032$ (determinado gráficamente, Fig 3.9 del Rosabal).

$$h_{pt} = \left(\frac{f \cdot L}{d} + \sum K \right) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{pt} = 1,48 \text{ m}$$

Modelo: KP 250M 3 que consume una potencia de 0,48kW para una carga de 3,1 m y un flujo volumétrico de 2,4 L/s, que consume 118 kWh/año. (Bloch)

Anexo 13.

Selección, diseño y escalado del equipamiento de la planta de remoción de color a los residuales del proceso de teñido.

Selección del equipamiento para la tecnología de producción a escala piloto para darle tratamiento a $0,1 \text{ m}^3$ de residual de teñido:

(a). Cribado:

Criba de mayas finas de limpieza manual.

Planchas de acero con orificios de 1 mm de diámetro

En el balance de masa se determinó que aproximadamente el 5,7 % de todo el residual que entra a la criba se retiene en esta.

(b). Tanque de compensación:

Se requieren almacenar $0,1 \text{ m}^3$ de residual.

$V_R = 0,1 \cdot 1,12 \text{ m}^3$; considerando un 12 % de sobre diseño.

$V_R = 0,112 \text{ m}^3$

Teniendo en cuenta que el residual que se va a coleccionar proviene de la operación de teñido, se conoce por el capítulo 2 que el pH es 4-5, por lo que se va a requerir que el tanque sea de acero recubierto con PVC.

La relación de $\frac{H}{D} = 1$.

Tabla 30. Características del tanque de almacenamiento de residual.

Parámetro	Valor
Volumen de líquido (m^3)	0,1
Altura del Líquido (m)	0,47
Volumen del tanque (m^3)	0,112
Diámetro (m)	0,52
Altura (m)	0,52

(c) Tanque de precipitación química:

Volumen de agua residual a precipitar: $0,1 \text{ m}^3$

Sustancia

Masa molar (g/mol)

Ca(OH) ₂	74
Cr ₃	52

$$R.C \left(\frac{Ca(OH)_2}{Cr} \right) = \frac{74}{52} = 1,423$$

$$m(Ca(OH)_2) = 1,423 * V_o * C(Cr)$$

$$m(Ca(OH)_2) = 1,423 * 0,1 \text{ m}^3 * 10,25 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

(Ca(OH)₂) = 1,46g*2: como la cal industria tiene tantas impurezas se le añade el doble para garantizar que la reacción ocurra completamente.

$$(Ca(OH)_2) = 2,92 \text{ g}$$

Agente precipitante: 2,92 g de cal apagada que equivale a 0,000001319 m³ (ρ_{ap}=2211 Kg/m³),
 $V = 0,1 + 0,000001319 = 0,100001319 \text{ m}^3$, por lo que podemos aproximarlo a 0,1 m³.

$V_R = 0,1 * 1,12 \text{ m}^3$; considerando un 12 % de sobre diseño.

$$V_R = 0,112 \text{ m}^3$$

Criterios de diseño del tanque de presipitación: similitud geométrica:

$$\left(\frac{H}{D} \right)_{laboratorio} = \left(\frac{H}{D} \right)_{piloto}$$

$$H_{lab} = 11 \text{ cm} \text{ y } D_{lab} = 7 \text{ cm}$$

$$\left(\frac{H}{D} \right)_{piloto} = 1,57$$

$$H_r = 1,57 * D$$

$$H_r = 0,71 \text{ m y } D = 0,45 \text{ m}$$

$$H = 0,63 \text{ m}$$

Diseño del agitador:

Criterios de selección del agitador por similitud geométrica:

$$d = (0,43).D$$

$$H = (0,55).D$$

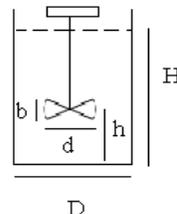
$$b = (0,5).D$$

$$h \leq 0,3.D$$

Se seleccionó según la Tabla 21. Apéndice.

2006) plantea que para d/D=0,5 se utiliza el Agitador de placas, tipo 3, α =90° y Z=2

Aplicando criterio de potencia por unidad de



(Rosabal, J.M., Valle, M., agitador de placas.

volumen propuesto por

$$\left(\frac{n^3 * d^5}{V} \right)_{lab} = \left(\frac{n^3 * d^5}{V} \right)_{piloto}$$

(Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010)

$$n_{lab} = 1,17 \text{ s}^{-1}$$

$$d_{lab} = 0,03 \text{ m}$$

$$V_{lab} = 0,000150 \text{ m}^3$$

$$d_{piloto} = 0,2 \text{ m}$$

$$V_{piloto} = 0,1 \text{ m}^3$$

Calculo de la potencia del agitador:

Calcular el régimen de mezclado: $Re m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}$

$\rho_{ap} = 964 \text{ Kg/m}^3$ (experimentalmente)

$\mu = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (experimentalmente) $= 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

$n_{piloto} = 0,43 \text{ s}^{-1}$

$Re m_{piloto} = 15172,32$

$Re m_{lab} = 922,81$

Ir a Figura 9,7 y seleccionar $KN = 0,8$, hacer corrección porque $H \neq D$ y $D/d \neq (1,33-1,5)$, según la expresión:

$$KN_{correg.} = KN * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,5} * \left(\frac{D}{\frac{D}{d}_{tab}}\right)^{0,5}$$

$KN_{correg.} = 1,16$

$$KN_{correg.} = \frac{N}{d^5 \cdot n^3 \cdot \rho}$$

$N = KN_{correg.} \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho$

$N = 0,028W$

$N_{int} = N + 2 * N$

$N_{int} = 0,084 W = 0,000084 kW$

Ir a Tabla 14. Apéndice I. (Rosabal, J.M., Garcell, L., 2006)

Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica $n = 1800 \text{ rpm}$.

(d). Tanque colector:

Se requieren almacenar aproximadamente $0,1 \text{ m}^3$ de residual.

$V_R = 0,1 * 1,12 \text{ m}^3$; considerando un 12 % de sobre diseño.

$V_R = 0,112 \text{ m}^3$

La relación de $\frac{H}{D} = 1$.

(d)Tanque de homogenización.

El diseño del tanque se realiza considerando los criterios de escalado empleados para el tanque de precipitación.

Al dicho tanque llegan aproximadamente $0,1 \text{ m}^3$ de agua residual, calculado a partir de balance de masa, considerando un 12 % de sobre diseño, el volumen que requiere el tanque será de:

$V_R = 0,112 \text{ m}^3$

Criterios de diseño del homogenizador: similitud geométrica:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{laboratorio} = \left(\frac{H}{D}\right)_{piloto}$$

$H_{lab} = 11 \text{ cm}$ y $D_{lab} = 7 \text{ cm}$

$$\left(\frac{Hr}{D}\right)_{piloto} = 1,57$$

$$Hr = 1,57 * D$$

$$Hr = 0,71 \text{ m y } D = 0,45 \text{ m}$$

$$H = 0,63 \text{ m}$$

Criterios de selección del agitador por similitud geométrica:

$$d = (0,43).D$$

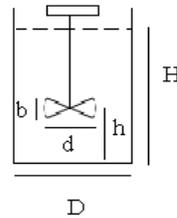
$$H = (0,55).D$$

$$b = (0,5).D$$

$$h \leq 0,3.D$$

Tabla 21. Apéndice. (Rosabal, J.M., Valle, Agitador de placas, tipo 3, $\alpha = 90^\circ$ y $z=2$)

Aplicando criterio de potencia por unidad de



M., 2006)

volumen propuesto por

$$\left(\frac{n^3 * d^5}{V}\right)_{lab} = \left(\frac{n^3 * d^5}{V}\right)_{piloto}$$

(Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010)

$$n_{lab} = 1,33 \text{ s}^{-1}$$

$$d_{lab} = 0,03 \text{ m}$$

$$V_{lab} = 0,000150 \text{ m}^3$$

$$d_{piloto} = 0,2 \text{ m}$$

$$V_{piloto} = 0,1 \text{ m}^3$$

Calculo de la potencia del agitador:

$$\text{Calcular el régimen de mezclado: } Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}$$

$$\rho_{ap} = 1009 \text{ Kg/m}^3 \text{ (experimentalmente)}$$

$$\mu = 1,1 * 10^{-3} \text{ Pa.s (experimentalmente)} = 1,1 * 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}$$

$$n_{piloto} = 0,5 \text{ s}^{-1}$$

$$Re_{m \text{ piloto}} = 18345,5$$

$$Re_{m \text{ lab}} = 1097,98$$

Ir a Figura 9,7 y seleccionar $KN = 0,65$, hacer corrección porque $H \neq D$ y $D/d \neq (1,33-1,5)$, según la expresión:

$$KN_{correg.} = KN * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,5} * \left(\frac{\frac{D}{d}}{\frac{D}{d}_{tab}}\right)^{0,5}$$

$$KN_{correg.} = 1,409$$

$$KN_{correg.} = \frac{N}{d^5 \cdot n^3 \cdot \rho}$$

$$N = KN_{correg.} \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho$$

$$N = 0,057W = 0,0000157 \text{ KW}$$

$$N_{int} = N + 2 * N$$

$$N_{int} = 0,171 \text{ W} = 0,000171 \text{ kW}$$

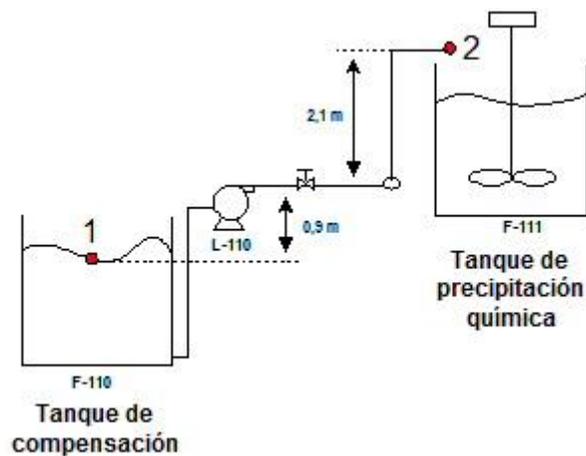
Ir a Tabla 14. Apéndice I. (Rosabal, J.M., Garcell, L., 2006)

Motor monofásico, 110/220 V, 60 Hz con velocidad sincrónica $n = 1800 \text{ rpm}$.

Escala	Reactor						Agitador de paletas			
	V (m ³)	H _R (m)	D (m)	N (kW)	tmezclado (min)	n (rpm)	d (m)	H (m)	b (m)	h (m)
Laboratorio	0,00015	0,11	0,07	0,0635	15	80	0,03	0,039	0,035	0,014
Piloto	0,1	0,71	0,45	0,000171	15	30	0,2	0,63	0,225	0,09

Bombas (L-110):

Aplicación del balance de energía mecánica:



Datos:

$$\Delta Z = 3 \text{ m}$$

$v = 1,5 \text{ m/s}$ (líquidos en tuberías a presión). Tabla 1-1 (Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981)

$$D_N = 1'' = 0,0335 \text{ m}$$

$$d = 0,0266 \text{ m}$$

$$A = 0,00056 \text{ m}^2$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$L = 11 \text{ m}$$

$$\rho = 964 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,0011 \text{ Kg/m.s}$$

$e = 0,0002 \text{ m}$ (Tubos de acero sin costura y tubos soldados no corroidos) Tabla 9 del Rosabal.

Tabla 3.7: Determinación de accesorios.

Parámetro	K
Entrada	0,5
Salida	1
5 codos de 90°	3,75
1 válvulas de globo	6
Σk	11,25

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_p$$

Cálculo del flujo:

$$Q_v = A \times v$$

$$Q_v = 0,84 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cálculo del número de Reynold:

$$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.27}) \quad (\text{Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., 1981})$$

Re = 34966,9 > 4000 : Régimen turbulento

Cálculo de la diferencia de velocidad:

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0,1148 \text{ m}$$

Cálculo de las pérdidas totales:

f= 0,037 (determinado gráficamente, Fig 3.9 del Rosabal).

$$h_{pt} = \left(\frac{f \cdot L}{d} + \sum K \right) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{pt} = 3,05 \text{ m}$$

$$H = 6,17 \text{ m}$$

Modelo: KP 350 M 1 que tiene una potencia de 0,592 kW y consume 18 kWh/año para una carga de 6,17 m y un flujo volumétrico de 1,97 L/s. (**Bloch**).

Anexo 14

Cálculo de los costos variables y cargos fijos.

Tabla 15. Consumo de materias primas.

Producto	Cantidad consumida(kg)	Precio (\$/kg)	Gasto monetario(\$)
Hidróxido de calcio . (Cal Apagada)	66,6	1,983	132,1

Fuente: (www.cu.all.biz)

Tabla 16. Gastos generales de electricidad.

(Costo unitario: 0,25 \$/ kWh)

Equipos	Potencia (kW)	Tiempo de trabajo(h)	Costo(\$)
Tanque de precipitación química con agitador	0,09	0,5	0,01125
Bomba (L-110)	0,592	0,15	0,0222
Bomba (L-111)	0,48	0,12	0,0144
Bomba (L-113)	0,61	0,013	0,002
Bomba (L-114)	0,649	0,009	0,0015
Bomba (L-115)	0,592	0,0141	0,0021
Bomba (L-116)	0,48	0,011	0,0014
Bomba (L-117)	0,592	0,0141	0,0021
Compresor	1,1	6	1,65
Tanque de precipitación química con agitador	0,09	0,5	0,01125
Tanque homogenizador	0,09	0,17	0,00383
Tanque de precipitación química con agitador	0,09	0,5	0,01125

Tabla 17. Cálculo de la mano de obra.

No. operarios	\$/h	h/día	\$/año
2	1,85	8	4 440

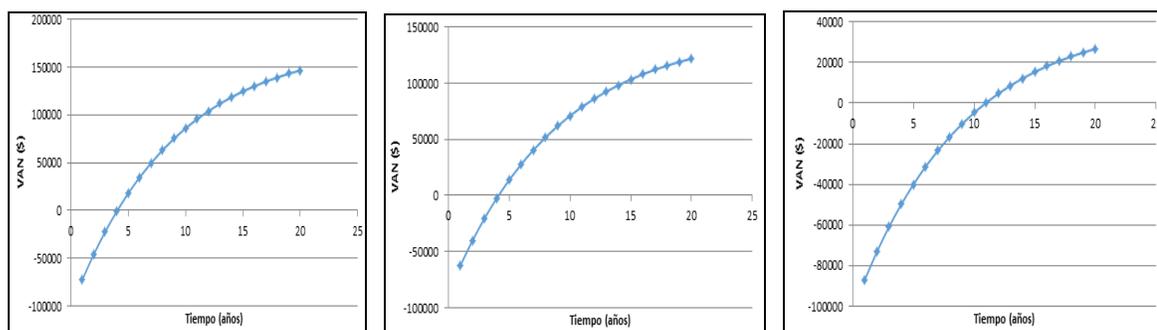
Anexo 15.

Tabla18 Costo de materiales de construcción para el secadero de lodo crómico de la etapa de tratamiento a residual del curtido.

Materiales	Cantidad	Precio	Costo(\$)
Cabilla 3/8	150 m	5,80 \$/m	870
Cemento	10 sacos	3,29 \$/saco	32,9
Gravilla	1,5 m ³	30,42 \$/ m ³	45,63
Arena	1,5 m ³	32,29 \$/ m ³	48,44
Tubo de PVC de 3"	9 m	16,03 \$/3 m	48,09
Rejilla	1	\$ 4,20	4,2
Total			1 049,26

Tabla 19. Costo de materiales de construcción para el secadero de lodo crómico de la etapa de tratamiento a residual del teñido.

Materiales	Cantidad	Precio	Costo(\$)
Cabilla 3/8	70 m	5,80 \$/m	406
Cemento	5 sacos	3,29 \$/saco	16,45
Gravilla	0,7 m ³	30,42 \$/ m ³	21,29
Arena	0,7 m ³	32,29 \$/ m ³	22,6
Tubo de PVC de 3"	3 m	16,03 \$/3 m	32,06
Rejilla	1	\$ 4,20	4,2
Total			502,6



(a)

(b)

(c)

Figura 1. Plazo de recuperación de la inversión al descontado. PRD (años).

(a). Tratamiento a residual del proceso de pelambre; (b). Tratamiento a residual del proceso de curtido; (c). Tratamiento a residual del proceso de teñido.