

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA



“TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA UNA PLANTA
GALVANICA ARTESANAL”

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUIMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE
CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

EMMA ANTONIA ALVAREZ NUÑEZ

LIMA – PERÚ

2003

*“ Señor, detrás y delante me rodeastes
y sobre mi pusistes tu mano, tál
conocimiento es demasiado maravilloso
para mí. “*

DEDICATORIA

Dedico esta obra:

*A mis padres, por su gran cariño y
comprensión, por sus sabios consejos,
porque confiaron en mí y porque nunca
me abandonaron;*

*A mis hermanos, por su buen ejemplo
de perseverancia para ser un gran
triunfador;*

*A Eduardo, mi esposo, porque siempre
me demostró su gran amor e in finita
paciencia;*

y en especial:

*A mis niños, Arthur y Jhon, a Uds hijos
míos por lo mucho que los amo, para
que también se esfuercen, así como se
esforzó su madre y logren ser grandes y
excelentes profesionales.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos mis profesores de la UNI, al Ing. Zaldivar, Ing. Pizarro, Ing. Collado, Ing. Dextre, Ing. Chero, Ing. Apaza; etc., etc.; por los valiosos conocimientos que me brindaron; a mi excelente jurado, por su gran participación en el día de mi sustentación; a mis compañeros, con quienes compartí momentos difíciles e inolvidables, en especial a Jorge Rado, mi gran compañero y amigo de siempre quien con su gran experiencia profesional me aclaró y despejó muchas inquietudes.

RESUMEN

El gran desarrollo de las sociedades industrializadas en los últimos años ha llevado consigo una serie de ventajas indiscutibles, el nivel y la calidad de vida han aumentado considerablemente; sin embargo, un efecto secundario a este progreso es la generación de productos residuales muy contaminantes y complejos, esta contaminación no solo altera el equilibrio ecológico, produciendo mortandad de algunas especies animales y vegetales, o la proliferación descontrolada de otros, sino que puede destruir en forma definitiva la vida en los lugares afectados.

La industria galvánica constituye uno de los pilares en la economía de un país, por la diversidad de productos que maneja, así como por el aspecto social al cual está ligado debido al número de empleados que requiere, pero a su vez constituye uno de los principales focos de contaminación ambiental.

Teniendo en cuenta los efectos que puedan causar las aguas residuales al medio ambiente y los problemas ecológicos irreversibles que se pueden presentar, el presente informe propone el diseño de un módulo de tratamiento para el control de las aguas residuales de una planta galvánica artesanal.

Se tratarán las aguas residuales con contenido de cianuros y las aguas residuales con contenido de cromo hexavalente, utilizando el método químico mediante el proceso batch o lote; de esta manera se logrará reducir la contaminación dentro de los límites máximos permisibles, según normas internacionales vigentes del tratamiento de aguas. Para el desarrollo del tema, se hace una evaluación de la industria galvánica en la ciudad de Lima y escogemos una planta artesanal existente, de la cual se obtiene los datos de proceso para el diseño del módulo de tratamiento propuesto. Se hace una selección y diseño de los equipos, así como el costo de la inversión y sugerencias para el plan de manejo ambiental.

INDICE

		Pag.
I.	Introducción	8
II.	Conceptos y técnicas empleadas	9
2.1	La Industria galvánica	9
2.2	Decapado de metales	9
	2.2.1 Acero y aleaciones de Fe.	9
	2.2.2 Cobre y aleaciones	9
	2.2.3 Aleaciones de zinc	9
2.3	Pulido	9
2.4	Desengrase electrolítico	10
2.5	Desplacado de metales	10
2.6	Cobreado alcalino	11
2.7	Cobreado ácido	11
2.8	Niquelado	12
2.9	Cromado brillante	12
III.	Descripción del Proceso	13
3.1	Ubicación de la planta artesanal	13
3.2	Descripción del entorno	14
	3.2.1 Ambiente físico.	14
	3.2.2 Ambiente biológico	14
	3.2.3 Ambiente socio-económico	14
	3.2.4 Ambiente de interés humano.	14
3.3	Diagrama del proceso de cromado.	14
3.4	Tipos de contaminación de la planta.	16
	3.4.1 Efluentes líquidos.	16
	3.4.2 Emisiones de gases a la atmósfera.	17
	3.4.3 Desechos sólidos.	17
3.5	Efectos de los contaminantes.	17

3.6	Características del agua residual.	.....	20
3.7	Límites de Contaminación.	.....	20
3.7.1	LMPs – Perú	.....	20
3.7.2	LMPs-Chile	.....	23
3.7.3	LMPs-México	.....	24
3.7.4	Cuadros comparativos de los LMPs.	.....	24
IV.	Diseño del módulo para el tratamiento de efluentes	.....	27
4.1	Métodos de tratamiento de efluentes.	.....	27
4.1.1	Proceso por cargas.	.....	29
4.1.2	Proceso continuo.	.....	29
4.1.3	Proceso integrado.	.....	30
4.2.	Tratamiento de aguas con contenido de cianuro.	... .	30
4.3	Tratamiento de aguas con contenido de cromato.	... .	37
4.4	Diseño del sistema propuesto.	.....	40
4.4.1	Dosificación de reactivos.	.....	43
4.4.2	Selección del volumen del tanque reactor	.....	48
4.4.3	Selección de la bomba y diámetro de tubería.	.....	50
4.4.4	Costos.	.....	54
4.4.5	Operación del sistema o módulo propuesto	.....	56
V.	Plan de manejo ambiental.	.....	58
5.1	Plan de mitigación.	.....	58
5.2	Plan de monitoreo.	.....	58
5.3	Plan de contingencia.	.....	58
5.4	Plan de cierre	.....	58
VI.	Conclusiones y Recomendaciones	.....	59
VII.	Bibliografía.	.....	61

VIII. Anexos.	.....	62
Anexo 1	Esquemas de secuencia de operación	62
Anexo 2	Cálculo para determinar la cantidad de hipoclorito	71
Anexo 3	Cálculo para determinar el contenido de hipoclorito	75
	en 1 litro de NaClO al 10%	
Anexo 4	Cálculo para determinar la concentración de cromato ...	76
	A partir de cromo hexavalente.	
Anexo 5	Cálculo para determinar la cantidad de bisulfito	77
	en 1 litro de solución al 10%	
Anexo 6	Cálculo para determinar la cantidad de NaHSO ₃	78
	para convertir el cromo hexavalente a trivalente.	
Anexo 7	Pasos para calcular la altura útil del sistema propuesto ...	80

I. INTRODUCCIÓN

Existen en la Ciudad de Lima, alrededor de 1500 plantas de recubrimientos electrolíticos, en su mayoría en forma artesanal, ubicados principalmente en los distritos de Ate-Vitarte, San Juan de Lurigancho, San Martín de Porras e Independencia.

Las aguas residuales que provienen de estas plantas constituyen uno de los desechos inorgánicos de gran poder contaminante debido a la presencia de elevadas concentraciones de cianuros y metales pesados.

Tomaremos como piloto una planta artesanal de cromo brillante (cromado) ubicado en el distrito de Independencia. Los efluentes de estas plantas están contaminadas con sustancias diversas, que en muchos casos pueden resultar tóxicas o corrosivas, dependiendo de su naturaleza y concentración que tengan. En consecuencia, estos efluentes no sirven para consumo humano ni empleo en otras actividades industriales, y no se deben agregar directamente o indirectamente al mar o ríos sin tratamiento previo o dilución hasta límites aceptables, con la finalidad de asegurar la neutralización de sus efectos perniciosos.

Este módulo propuesto es muy importante por su utilidad en resguardo del medio ambiente y su aplicación práctica es posible por su facilidad de operación y bajo costo.

II. CONCEPTOS Y TECNICAS EMPLEADAS

2.1 La industria galvánica.

Tiene por finalidad el tratamiento de superficies metálicas por procesos químicos o electroquímicos con los siguientes objetivos :

1. Proteger las piezas contra la corrosión.
2. Mejorar su apariencia y durabilidad, al colocar un recubrimiento uniforme con mayor resistencia mecánica.
3. Disminuir el desgaste por abrasión.
4. Mejorar la resistencia de las piezas a temperaturas elevadas.

2.2 Decapado de metales:

El decapado es el proceso por el cual se remueve los óxidos de las superficies metálicas por ataque químico, el ácido a utilizar depende de la naturaleza del metal:

2.2.1 Acero y aleaciones de hierro: Se utiliza generalmente ácido clorhídrico diluido (HCl) al 40%, si se desea desoxidarlo más rápido se puede preparar soluciones más concentradas de hasta 50%.

2.2.2 Cobre y sus aleaciones: Generalmente los óxidos consisten de óxidos cuproso y cúprico, un buen desoxidante es una solución diluida al 10% de ácido sulfúrico, pero también puede usarse la solución preparada para el tratamiento de hierro si es que posteriormente se va a pulir.

2.2.3 Aleaciones de zinc: El zinc es un metal muy activo por lo que la mayoría de los ácidos lo atacan, es aconsejable el tratamiento con ácido clorhídrico diluido (10%) por 10 a 15 segundos.

2.3 Pulido.

El pulido se realiza con la finalidad de limpiar la superficie metálica finamente para obtener un mayor poder catódico al depositarse los iones metálicos a su superficie. Por lo tanto, se acondiciona para una mejor adherencia del metal a recubrir. En esta operación, se utilizan máquinas pulidoras, las piezas son pulidas manualmente y se pulen especialmente las piezas ferrosas.

2.4 Desengrase Electrolítico Tiene por finalidad eliminar las grasas adheridas al metal, el desengrase se realiza electrolíticamente en un baño que tiene la formulación y condiciones de operación que se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 : Desengrase Electrolítico

Desengrase Electrolítico				
Formulación		Condiciones de Operación		
Compuesto	%	Parámetro	Valor	Unidad
Hidróxido de sodio (NaOH)	50-80	Temp.	30-50	°C
Cianuro de sodio (NaCN) o (KCN)	12-20	Dens. Corriente	3-6	A/dm ²
		Voltaje	2-8	V.
		Anodos	Acero	

2.5 Desplacado de metales

Generalmente a los materiales que se van a reprocesar se les tiene que remover las capas deterioradas de cromo, níquel y cobre; los métodos más utilizados para el desplazado son los siguientes:

2.5.1 Desplacado de cromo : Es suficiente la inmersión en una solución al 50% de ácido clorhídrico, el decapado termina a los pocos minutos al dejar de desprender burbujas de hidrógeno.

2.5.2 Desplacado de níquel: Es bastante efectivo, realizarlo por vía electrolítica, por el método de corrosión anódica, en un electrólito al 50% de ácido sulfúrico bajo una tensión de 3 voltios; si el metal base es cobre, el ataque proseguirá hasta el decapado total.

2.6 Cobreado Alcalino. Este baño tiene la siguiente formulación:

Cobreado Alcalino				
Formulación		Condiciones de Operación		
Compuesto	g/L	Parámetro	Valor	Unidad
Cianuro de Cobre (I)	98	Temp..	20-40	°C
Hidróxido de sodio	79	Dens. Corriente	1-2	A/dm ²
Cianuro de sodio	156	Voltaje	2-3	V.
Tiosulfato de sodio	0.2	Anodos	Cobre	
		PH	11.5	
		Espesor	0.8	μ/min

2.7 Cobreado Acido. Este baño tiene la siguiente formulación:

Cobreado Acido				
Formulación		Condiciones de Operación		
Compuesto	g/L	Parámetro	Valor	Unidad
Sulfato de Cobre	220	Temp..	24-28	°C
Acido Sulfúrico	32	Dens. Corriente	3-5	A/dm ²
Cloruro de sodio	0.12	Voltaje	2-8	v.
		Anodos	Cobre Electr.	
		PH	< 1	
		Espesor	0.8	μ/min

2.8 Niquelado. Este baño tiene la siguiente formulación:

Niquelado				
Formulación		Condiciones de Operación		
Compuesto	g/L	Parámetro	Valor	Unidad
Sulfato de Níquel	250	Temp..	50-60	°C
Cloruro de Níquel	40	Dens. Corriente	4-6	A/dm ²
Acido Bórico	40	Voltaje	3-8	v.
		Anodos	Níquel	
		PH	4.6	
		Espesor	1	µm/min

Nota: Una formulación opcional es cuando se utilizan reactivos comerciales, tales como : Solución correctora, abrillantador Stratolux y Humectante Ni 719.

2.9 Cromado brillante. Este baño tiene la siguiente formulación:

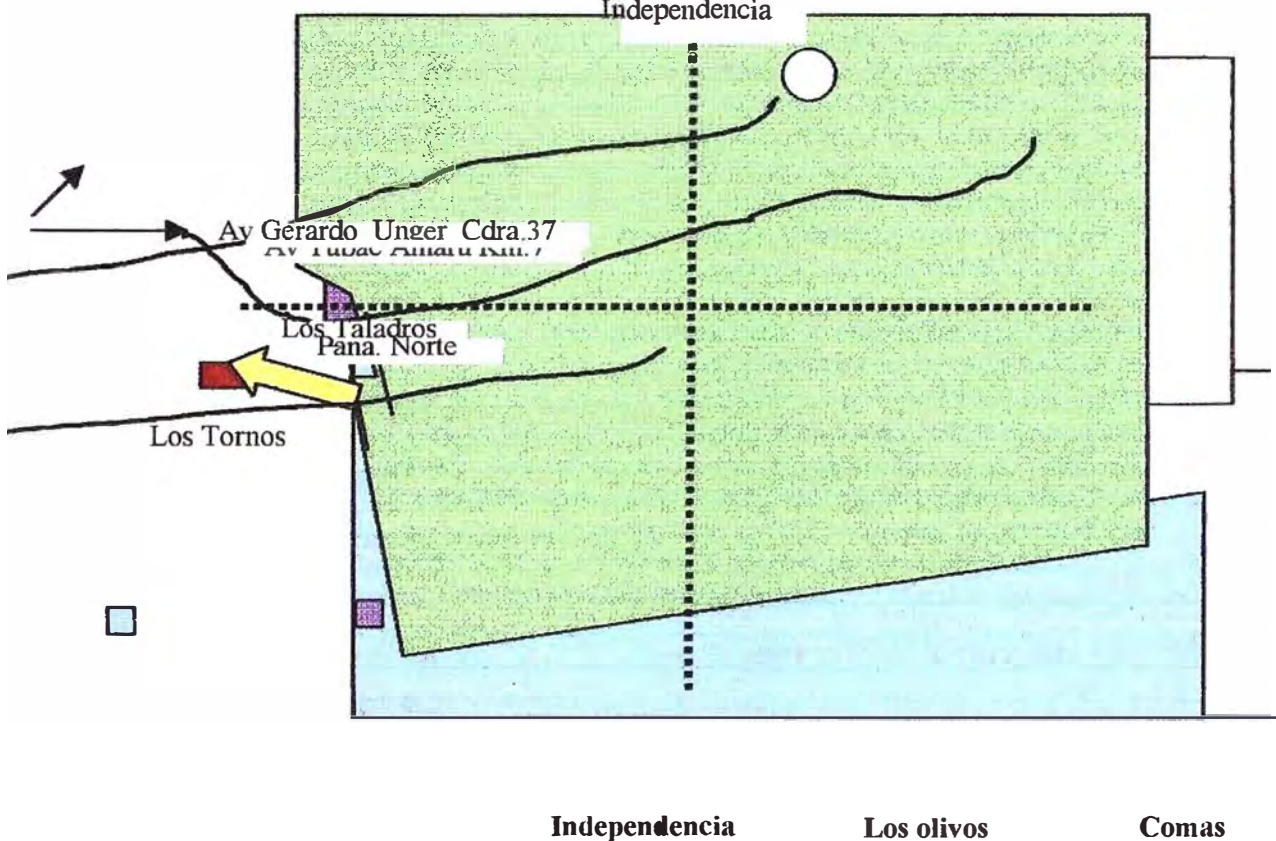
Cromado Brillante				
Formulación		Condiciones de Operación		
Compuesto	g/L	Parámetro	Valor	Unidad
Acido crómico	300	Temp..	38-40	°C
Acido sulfúrico	0.8	Dens. Corriente	15	A/dm ²
Aditivo EO	40mL/L	Voltaje	3-6	v.
Tensid cromo	5 mL/L	Anodos	Pb-Sn	
		PH	4.6	
		Espesor	0.2	µm/min

III. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

3.1 Ubicación de la planta artesanal.

Nombre o razón Social de la Empresa	:	Persona Natural
Representante	:	Luz Vivanco Segovia
Departamento	:	Lima
Distrito	:	Independencia.
Calle	:	Los Tornos Nro.258
Ubicación Geográfica	:	Ver. Fig. 3.1
Año de inicio de actividades	:	1992

Fig. 3.1 Plano de Comisaría de Independencia geográfica de la planta (Escala : 1/1000)



3.2 Descripción del entorno

3.2.1 Ambiente físico

El suelo es de tierra de cultivo, de resistencia sísmica moderada.

La planta artesanal, se encuentra ubicada en una zona industrial, en donde todas las plantas vecinas tienen medidores de agua de consumo industrial, que es suministrado por la red pública.

El personal administrativo está compuesto de profesionales, el personal obrero de técnicos calificados que viven por la zona.

Todos los residuos líquidos de las empresas vecinas van directamente al alcantarillado público (desagüe).

3.2.2 Ambiente Biológico.- En los alrededores no hay zonas verdes de protección gubernamental. No se observa vida animal silvestre (fauna), ni áreas verdes naturales (flora).

3.2.3 Ambiente socio-económico.- Los alrededores son zonas de talleres industriales con muy pocas viviendas, en su mayoría son precarias.

3.2.4 Ambiente de interés humano.- En los alrededores no hay zonas arqueológicas protegidas, existe población que se extienden hacia los alrededores, en donde existen comercios formales e informales.

3.3 Diagrama del proceso de cromado

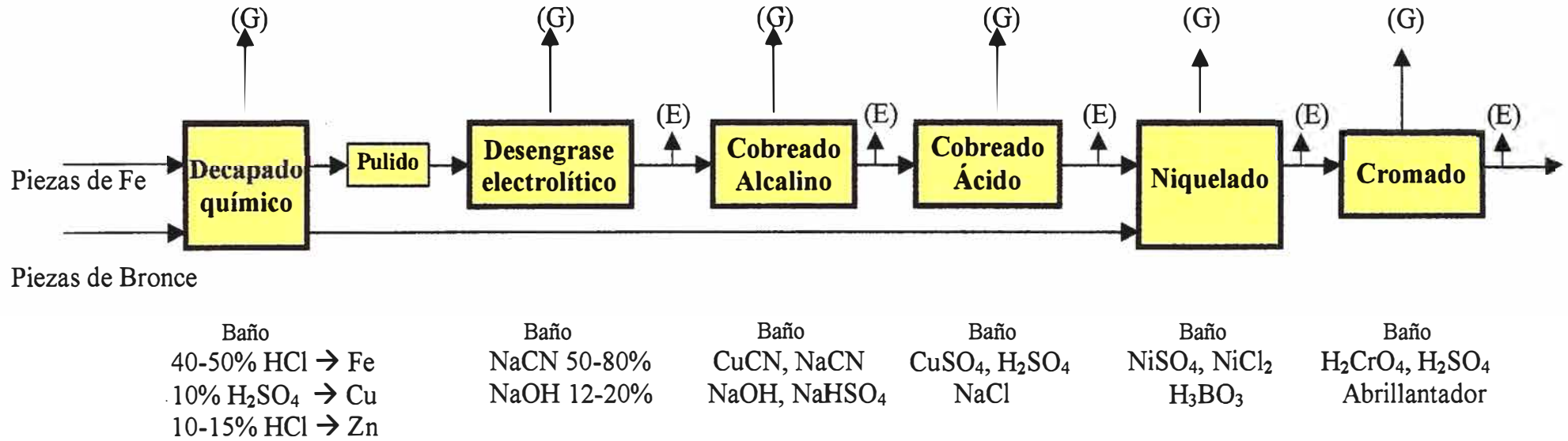
El diagrama Nro.1 nos muestra el proceso por etapas de cromado brillante para piezas ferrosas y bronce.

El proceso de cromado brillante para piezas ferrosas, empieza con la etapa de decapado químico, pulido, desengrase electrolítico, cobreado alcalino, cobreado ácido, niquelado y finalmente el cromado.

Para el cromado brillante de piezas a base de cobre (bronce), se obvian las etapas de desengrase electrolítico, cobreado alcalino y cobreado ácido; es llevado directamente a la etapa de niquelado y cromado.

Es importante señalar que en cada etapa intermedia se realiza un enjuague de la pieza para la siguiente etapa. Esto se realiza con la finalidad de que la pieza quede limpia sin residuos del baño anterior.

Diagrama Nro.1 : Etapas del proceso de cromado brillante.



Nota : Para piezas de bronce, no necesita cobrearlo, ya que dicho material es una aleación a base de cobre(90%) y estaño(10%).

(E) : Enjuague.

(G) : Gases o Vapores

3.4 Tipos de Contaminación de la planta.

El Diagrama Nro.1, muestra que en las diferentes etapas del proceso, se generan:

3.4.1 Efluentes Líquidos

En este tipo de Industria, se produce la mayor cantidad de desechos líquidos. Debido a la elevada acidez y alcalinidad de estos efluentes, le confieren al efluente de desecho un fuerte poder corrosivo. Estos efluentes se pueden agrupar en tres clases:

Aguas con contenido de cromatos : Son las aguas que contienen todas las formas de cromo hexavalente provenientes de los enjuagues de las piezas tratadas en los baños de cromado, desplazado de piezas recicladas, etc. En este grupo también se incluyen a los propios baños de tratamiento que contienen cromo hexavalente cuando deben ser desechados por envejecidos e inútiles.

Aguas con contenido de cianuros : Son los que provienen de los enjuagues de las piezas tratadas en los baños de desengrase electrolítico, o baños cianurados. En este grupo también se incluye los propios baños cianurados de tratamiento cuando deber ser desechados por envejecidos e inútiles.

Aguas sin contenido de cromatos ni cianuros : Son todas las demás aguas provenientes de los enjuagues de los diferentes procesos que no contengan ni cromo hexavalente ni cianuros; los mismos que pueden ser procedentes de los procesos de decapado químico, algunos baños de desengrase alcalino, etc. En este grupo también se incluye los propios baños de este proceso cuando deben ser eliminados por envejecidos e ineficaces.

Desechos Concentrados : Son aquellos en las que periódicamente son descartados en pequeños volúmenes y están constituidos por las soluciones desengrasantes, decapantes y los baños de electrodeposición agotados.

Desechos Diluidos : Son aquellos que continuamente son descartados en grandes volúmenes y están principalmente conformados por las aguas de enjuague del proceso.

Las aguas residuales de los baños galvánicos desengrasantes (operación de limpieza alcalina), no solo contienen reactivos químicos del propio baño (sales, hidróxido de sodio o potasio, emulsionantes orgánicos y tensoactivos), sino también jabones, producto de la saponificación de las grasas desechadas de la superficie de las piezas que provienen de la operación de pulido. El pH es frecuentemente mayor que 10.

Por el contrario, el pH es frecuentemente menor que 2 en los desechos de la operación ácida (baños galvánicos decapantes o desoxidantes), los cuales contienen ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico o sus sales, así como también una apreciable concentración de metales como resultado de la disolución metálica de las piezas de trabajo.

Finalmente, las aguas residuales de los procesos de electrodeposición contienen sales metálicas, ácidos, álcalis y varios otros compuestos empleados en el control del baño.

3.4.2 Emisiones de gases a la atmósfera

Los gases o vapores que se desprenden de los baños electrolíticos (G) del **Diagrama Nro.1**, son corrosivos y tóxicos que pueden ser muy perjudiciales para la salud; así como para los objetos metálicos que se encuentran expuestos a dichos gases. Si las instalaciones de estas plantas galvánicas fueran cerradas, deberían utilizar campanas extractoras, en otro caso estas instalaciones deben estar en lugares abiertos donde exista circulación de aire.

3.4.3 Desechos sólidos

Los desechos sólidos más importantes del proceso son el polvillo generado por el pulido y el “aserrín agotado” que se utiliza para secar las piezas húmedas del producto terminado. Tanto el aserrín agotado (humedecido) como el polvillo del pulido son desechados en colectores de basura.

3.5 Efectos de los contaminantes.

El riesgo de contaminación de las aguas residuales galvánicas y el tratamiento necesario para su disposición segura depende de las sustancias químicas presentes (muchas de ellas son significativamente tóxicas al ser humano y a otros organismos), de su concentración y volumen, de las posibilidades de contacto

humano, y de su comportamiento en el medio ambiente después de su disposición.

Así se tiene:

- **Cianuros**: El efecto letal de esta sustancia, aumenta con la disminución del pH y el aumento de la temperatura (un aumento de 10° C puede duplicar o triplicar la acción letal), y con la disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Las concentraciones letales por inhalación son de 150 ppm por 30-60 min., y en concentraciones de 500 ppm por pocos min. La dosis letal por ingestión es de 2-5 mg/kg de peso corpóreo.
- **Níquel**: El níquel afecta los procesos vitales. Las sales de níquel (principalmente el níquel carbonílico) son tóxicas. En plantas terrestres, concentraciones mayores que 50 mg/kg de peso seco son tóxicas. Tiene poca capacidad de bioacumularse en peces.
- **Cromo**: Este metal afecta las funciones biológicas, principalmente el crecimiento. Es bioacumulable. Los máximos límites permitidos en los desagües varían de 5 a 2 ppm para el cromo trivalente y de 0,2 a 0,05 ppm para el cromo hexavalente. Cuando en el medio ambiente están presentes niveles bajos de cromo, el Cr (III) aparentemente juega un rol esencial en el metabolismo de plantas y animales, mientras que el cromo (VI) es tóxico para las bacterias así como para las plantas y animales, además de ser muy móvil y migrar a distancias considerables de su fuente.

La siguiente Tabla 3.5.1, muestra los valores de contaminación generada en las diferentes etapas del proceso de una planta típica de Cromado Brillante.

Tabla 3.5.1 : Valores de contaminación generada en las diferentes etapas del proceso de una planta típica de Cromado Brillante.

PARAMETRO	Etapas del Proceso	Valor Promedio del parámetro (mg/L)	Volumen del agua residual (L/día)	Carga contaminante (kg/día)
Cianuro	Desengrase Electrolytico	942,8	175,0	0,165
Cianuro	Cobreado Alcalino	390,6	175,0	0,068
Cromo Hexavalente	Cromado Brillante	4833,1	215,0	1,039
Níquel	Niquelado Brillante	616,9	180,0	0,111
Cobre	Cobreado Alcalino	293,0	175,0	0,051
PH	Decapado Químico	1,2		
Sólidos suspendidos	Decapado Químico	132,1		
Sólidos disueltos	Decapado Químico	7299,8		
Cromo total	Decapado Químico	21,3		
Níquel total	Decapado Químico	12,9		
Cobre total	Decapado Químico	9,5		
Hierro total	Decapado Químico	1149,1		

3.6 Características del agua residual

Se caracteriza por poseer en él materiales físicos, químicos, biológicos y microbiológicos. En nuestra inspección de nuestra planta artesanal, encontramos las siguientes características:

A.- Características Físicas.-

- | | | |
|----------------------|---|------------------------------|
| 1.- Sólidos totales. | : | Presentes a la vista. |
| 2.- Olores | : | Presente (picante al olfato) |
| 3.- Temperatura | : | 30 °C |
| 4.- Color | : | Oscuro-Naranja (Cromado) |

B.- Características Químicas.

- | | | |
|-----------------------------------|---|------------------------------------|
| 1.- Materia orgánica. | : | Jabones (desengrase). |
| 2.- Medida del contenido Orgánico | : | No contaminante. |
| 3.- Materia inorgánica | : | Acidos, bases y sales inorgánicas |
| 4.- Gases. | : | Oxidos de cromo (baños galvánicos) |

C.- *Características Biológicas.*- Los residuos para este tipo de industria es una contaminación netamente químico y no hay indicios de microorganismos.

- | | | |
|---|---|---------------|
| 1.- Microorganismos. | : | No presentes. |
| 2.- Organismos patógenos. | : | No presentes. |
| 3.- Organismos indicadores de contaminación | : | No presentes. |
| 4.- Métodos para valorar la toxicidad. | : | No se emplea. |

3.7 Límites de Contaminación

3.7.1 LMPs - Perú.

Es importante notar la diferencia que existe entre los límites máximos de emisión y los límites de calidad ambiental; los últimos están referidos a las concentraciones máximas permitidas (LMPs) de sustancias potencialmente contaminantes en los cuerpos que pueden recibir las descargas de desecho, tales como los cuerpos de agua.

La entidad que se encarga de establecer los criterios y patrones generales de ordenamiento y calidad ambiental y coordinar con los sectores la fijación de los límites máximos permisibles (LMPs) es el Consejo Nacional de Ambiente (CONAM).

Actualmente nuestro país solo cuenta con los límites máximos permisibles (LMPs) de emisión para efluentes líquidos provenientes de actividades pesqueras, mineras-metalúrgicas, explotación y comercialización de hidrocarburos líquidos y sus productos derivados; así como para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel; éstas norman las concentraciones máximas de sustancias potencialmente contaminantes en dichas corrientes.

No existe, por tanto, una norma oficial que establezca los límites máximos permisibles de emisión para actividades particulares como la Industria Galvánica, sólo se establece algunos parámetros para efluentes industriales vertidos a colectores públicos (desagües), sin considerar los límites para sustancias tóxicas (ver **Tabla III.3.7.1.1**: D.S. 28/60 - ASPL - 29/11/60). Además, la calidad del agua está reglamentada por los títulos I, II y III del D.L. N° 17752 de la “**Ley General de Aguas**” D.S. N°261-69-AP, con la respectiva clasificación de los cursos de agua y de las zonas costeras del país. (ver **Tabla III.3.7.1.2**).

**Tabla III. 3.7.1.1 Límites permisibles para las descargas
Industriales que se vierten a los colectores públicos
D.S. 28/60 - ASPL (29/11/60) – PERÚ**

Parámetro Contaminante	Valor Normal.
DBOs	250 mg/L
Caudal de desagüe	250 L/d – persona
Sólidos sedimentables	8.5 mL/L h
Temperatura	< 35°C
Punto de Ignición	> 90°C
PH	5.0 - 8.5

**Tabla III. 3.7.1.2 Reglamento de los Títulos I, II y III del D.L. N°17752
Valores Limites “Ley General de Aguas” D.S. N° 361-69-AP**

Parámetro	Clase					
	I	II	III	IV	V	VI
Parámetros biológicos						
Coliformes totales (NMP/100 mL)	8.8	20,000	5,000	5,000	1,000	20,000
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	0	4,000	1,000	1,000	200	4,000
DBO (mg/L)	5	5	15	10	10	10
OD (mg/L)	3	3	3	3	5	4
Sustancias potencialmente perjudiciales						
Mat. Extractible en Hexano(mg/L)	1.5	1.5	0.5	0.2		
Sust. Activas de azul de Metileno(mg/L)	0.5	0.5	1.0	0.5		
Carbón activo por alcohol (mg/L)	1.5	1.5	5.0	5.0		
Carbón activo por cloroformo (mg/L)	0.3	0.3	1.0	1.0		
Sustancias potencialmente peligrosas						
Selenio (mg/m ³)	10	10	50		5	10
Mercurio (mg/m ³)	2	2	10		0.1	0.2
PCB (mg/m ³)	1	1	1 ⁺		2	2
Esteres Estalatos (mg/m ³)	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3
Cadmio (mg/m ³)	10	10	50		0.2	4
Cromo (mg/m ³)	50	50	1,000		50	50
Níquel (mg/m ³)	2	2	1 ⁺		2	**
Cobre (mg/m ³)	1,000	1,000	500		10	*
Plomo (mg/m ³)	50	50	100		10	30
Zinc (mg/m ³)	5,000	5,000	25,000		20	**
Cianuros (CN) (mg/m ³)	200	200	1 ⁺		5	5
Fenoles (mg/m ³)	0.5	1	1 ⁺		1	100
Sulfuros (mg/m ³)	1	2	1 ⁺		2	2
Arsénico (mg/m ³)	100	100	200		10	50
Nitritos (N) (mg/m ³)	10	10	100		N.A.	N.A.

Clase	Características
I	Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
II	Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración, aprobados por el Ministerio de salud.
III	Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
IV	Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
V	Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.
VI	Agua de zona de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial.

* : Pruebas de 96 horas LC 50 multiplicados por 0.1

** : Pruebas de 96 horas multiplicadas por 0.02

1⁺ : Valores a ser determinados. En caso de sospechar su presencia se aplicará los valores de la columna V provisionalmente.

N.A. : Valor no aplicable.

3.7.2 LMPs – Chile

La tabla III 3.7.2 muestra los LMPs para descargas de efluentes que se efectúan en redes de alcantarillado, según el Ministerio de Obras Públicas de Chile, que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. Santiago, 7 de mayo de 1998 decreto N° 609/98 (publicado d.o. 20/07/98).

Tabla III 3.7.2 : Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúen en redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas (Chile).

Parámetros	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permitido
Aceites y grasas	mg/L	A y G	150
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	4 (1)
Cadmio	mg/L	Cd	0,5
Cianuro	mg/L	CN ⁻	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ^h	0,5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Hidrocarburos totales	mg/L	HC	20
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,02
Níquel	mg/L	Ni	4
PH	Unidad	PH	5,5-9,0
Plomo	mg/L	Pb.	1
Poder espomogéno	Mm	PE	7
Sólidos sedimentables	ml/L h	S.D.	20
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	1.000 (2)
Sulfuros	mg/L	S ²⁻	5
Temperatura	°C	T°	35
Zinc	mg/L	Zn	5
DBO ₅	mg/L	DBO ₅	-
Fósforo	mg/L	P	10-45
Nitrógeno amoniacal	mg/L	NH ⁴⁺	80
Sólidos suspendidos totales	mg/L	S.S	300

- (1) Si el contenido natural en la fuente de agua potable del establecimiento industrial (distribuida por el prestador de servicios sanitarios o fuente propia) es mayor al indicado en la tabla, el límite máximo del parámetro en la descarga será igual al contenido natural del mismo.
- (2) se aceptarán concentraciones entre 1000 y 1500 mg/L, si se cumplen las siguientes condiciones:
- a) pH = 8-9
 - b) Temperatura del residuo industrial líquido (°C) < 1 a la temperatura de las aguas receptoras.

3.7.3 LMPs - México:

PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-052-ECOL-1999, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos .

La **Tabla 3.7.3** nos muestra un extracto de los LMPs, de los constituyentes inorgánicos en efluentes.

TABLA 3.7.3 : CARACTERISTICAS DEL EXTRACTO (PECT) QUE HACEN PELIGROSO A UN RESIDUO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE (México)

No. INE	CONSTITUYENTES INORGANICOS	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/L)
C.1.01	ARSÉNICO	5.0
C.1.02	BARIO	100.00
C.1.03	CADMIO	1.0
C.1.04	CROMO HEXAVALENTE	5.0
C.1.05	NIQUEL	5.0
C.1.06	MERCURIO	0.2
C.1.07	PLATA	5.0
C.1.08	PLOMO	5.0
C.1.09	SELENIO	1.0

3.7.4 Cuadros comparativos de los LMPs:

La **Tabla III 3.7.4.1** se muestra un cuadro comparativo de límites de descarga para aguas residuales galvánicas en países como Francia, Suecia, Suiza y U.S.A.

Tabla III. 3.7.4.1 Cuadro comparativo de límites de descarga para aguas residuales galvánicas.

Parámetro	Francia (1985)	Suecia (1985)	Suiza (1975)	U.S.A. (1984) máx. por día
pH	6.5 - 9		6.5 - 8.5 (30°C)	6 - 9
DBO(1), DQO(2) (mg/L)	150 (2)		20 (1)	
Materias en susp. (mg/L)	15	10	20	60
Aceites (mg/L)	5		20	52
Cianuro libre (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.86
Cianuro total (mg/L)	1.2	1		
Cromo libre (mg/L)	0.1	0.1	0/1	
Cromo total (mg/L)	2	1		2.77
Cobre (mg/L)	2	1	0.5	3.3
Níquel (mg/L)	5	1	2	3.98
Zinc (mg/L)	5	2	2	2.61
(Zn + Cu + Ni + Al + Fe + Cr + Cd + Pb + Sn)(mg/L)	15			

La **Tabla III 3.7.4.2**, muestra un cuadro comparativo de los contaminantes más representativos del efluente de la planta artesanal y los LMPs de algunos países de Europa, U.S.A., Latinoamérica y Perú.

Tabla III 3.7.4.2 : Cuadro comparativo de las aguas residuales de la planta artesanal con respecto a los LMPs.

PARAMETROS	Proceso del efluente (enjuague)	VALOR PROMEDIO (mg/L)	LMPs Francia mg/L	LMPs Suecia mg/L	LMPs Suiza mg/L	LMPs U.S.A mg/L	*LMPs México mg/L	*LMPs Chile mg/L	*LMPs Ecuador mg/L	*LMPs Perú mg/L
Cianuro libre	Desengrase Electrolytico y Cobreado Alcalino	942.8	0.1	0.1	0.1	0.86				
Cianuro total	Desengrase Electrolytico y Cobreado Alcalino	390.6	1.2	1.0				1.0	1.0	
Cromo libre	Cromado	4833.1	0.1	0.1	0.1			0.5	0.5	
Cromo total	Cromado	616.9	2.0	1.0			5.0	10.0		
Cobre		29.0	2.0	1.0	0.5	3.3			1.0	
Niquel			5.0	1.0	2.0	3.98	5.0	4.0		
Sólidos Suspendidos			15.0	10.0	20.0	60.0		300	220	
pH		11 -12	6.5 - 9		6.5 - 8.5	6 - 9		5.5 - 9.0	5.0 - 9.0	5.0 - 8.5
Temperatura(°C)		25			30			35	< 40	< 35
Aceites y grasas			5		20	52		150	100	
DBO			150		20				250	
DO									500	

* Basados en los límites de descarga al alcantarillado público

IV DISEÑO DEL MODULO PARA EL TRATAMIENTOS DE EFLUENTES.

4.1 Métodos de tratamiento de Efluentes.

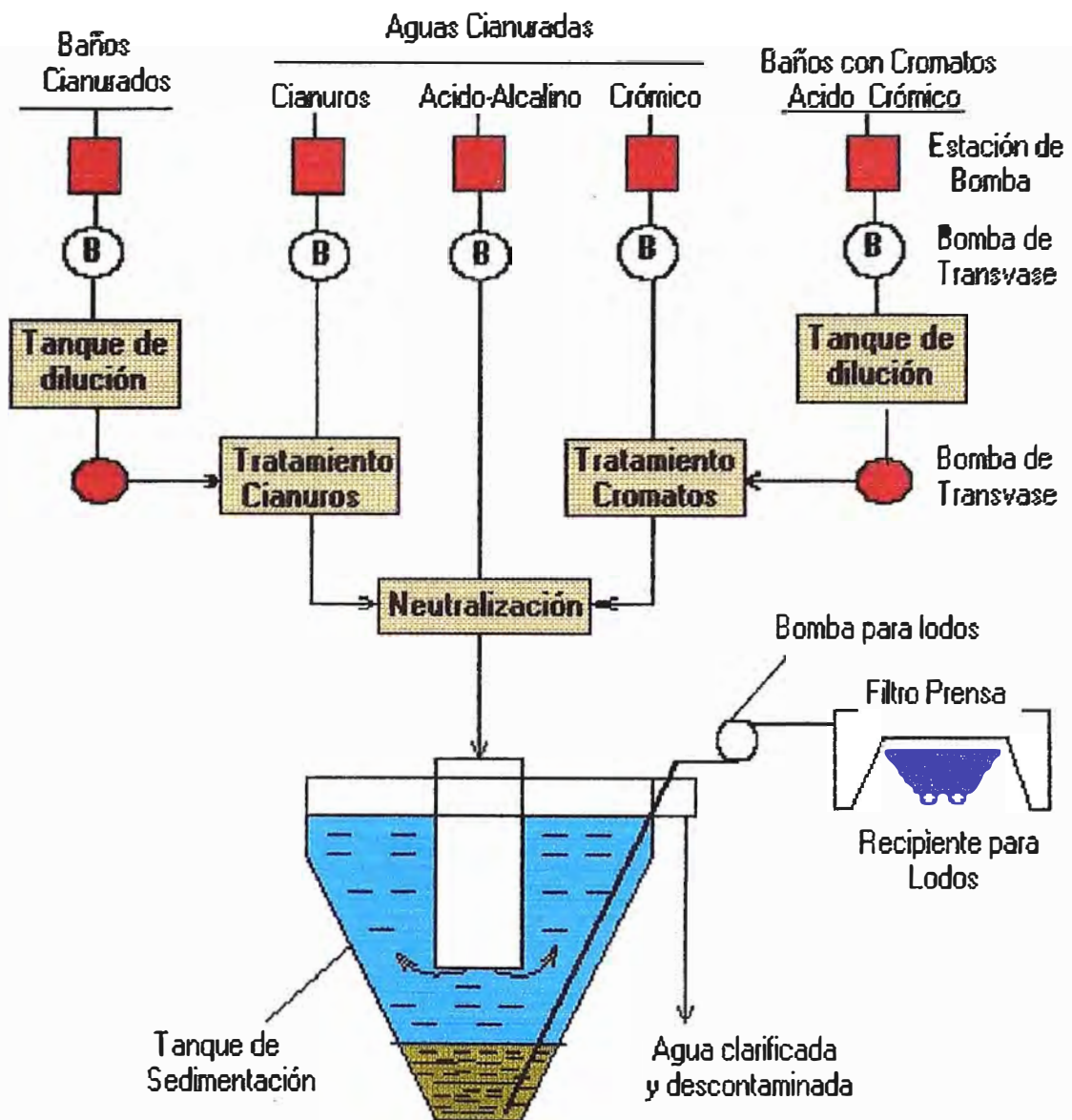
Los métodos de tratamiento típicos son

- 1.- Proceso por cargas (batch).
- 2.- Proceso continuo.
- 3.- Proceso integrado.

La colección de aguas residuales se hará por medio de tuberías o canales por los que fluya cada uno de los grupos de aguas residuales (cianuradas, cromatadas) de manera independiente y sean conducidos a las pozas de colección, de donde serán bombeadas, o conducidas por gravedad, según requerimiento a los respectivos tanques de tratamientos.

Una disposición típica del sistema de colección de las aguas residuales se puede apreciar en la Fig. 4.1.

Fig 4.1. Diagrama de flujo de una planta típica de tratamiento de aguas residuales.



4.1.1 Proceso por cargas (batch).

Es el más antiguo y fue muy utilizado como principal método de tratamiento por muchos años. Consiste en utilizar dos o tres tanques o pozas de almacenamiento para cada corriente de las aguas residuales. Cada tanque es construido del tamaño suficiente para contener el flujo de dichas aguas de desecho en un periodo de tiempo dado, que podría ser de un día, una semana o un turno de trabajo. Luego, la corriente se desvía a otro tanque, en tanto que el primero, se analiza, se trata y se descarga.

Las instalaciones para este proceso son menos costosas que las del proceso continuo, sobre todo cuando se trata de instalaciones pequeñas, pero a veces resulta inmanejable y antieconómica, cuando se trata de instalaciones para grandes flujos.

4.1.2 Proceso continuo

Este tipo de procesos, requiere de una instalación más compleja y costosa de instalar, pero generalmente es más fácil y económica de operar. Consiste de varias pozas o tanques cerrados, en donde ingresa el flujo de aguas residuales y se realizan los análisis en forma continua y de manera automática, con la ayuda de electrodos sensores que se instalan dentro de los mismos. Estos tanques se encuentran equipados con dispositivos de dosificación de las soluciones que sirven para el tratamiento, los cuales responden automáticamente a las señales de los sensores; además de mecanismos de agitación para un buen mezclado de los productos y de los ductos de aereamiento según sea necesario.

Los flujos de las soluciones pueden ser canalizados por gravedad, o también forzados por medio de bombas apropiadas, según cada diseño particular. La descarga de los lodos, generalmente se realiza por medio de bombas de fango y exprimidos en un filtro aparente, quedando listos para ser desechados o sometidos a un proceso de recuperación de sustancias económicamente reutilizables. El agua que finalmente se obtiene, sale de manera continua por el rebosadero final, limpia e inofensiva para ser eliminada por el colector municipal (desagüe) o para su reutilización en

algunas etapas del proceso galvanotécnico. Algunas veces se le somete a un tratamiento iónico para mayor purificación antes de su reutilización.

4.1.3 Proceso integrado

Este proceso permite la reutilización de las aguas procedentes de los enjuagues, antes de que lleguen a formar parte de la corriente final de desecho. Para esto se mezclan las aguas de enjuague, de muy poca toxicidad, que tengan similar composición y por tanto requieran del mismo tratamiento para su purificación, por lo que se procesan de manera separada del resto de aguas residuales, y luego son recicladas a la línea de tratamiento electrolítico, reutilizándose como enjuague en algunos procesos. Los enjuagues con aguas recicladas, son operados en forma sistemática en circuito cerrado, por lo que gradualmente experimentan un incremento de la concentración de contaminantes, en la medida que son utilizadas. Entonces, es necesario eliminar periódicamente a la corriente final de aguas residuales, pequeñas cantidades de esta agua recicladas, que son reemplazadas en cantidad equivalente por agua fresca.

Esta manera de tratar las aguas utilizadas en los procesos electrolíticos, reduce considerablemente el consumo de agua fresca: así como el volumen de las aguas residuales que son sometidos al proceso de desintoxicación.

4.2 Tratamiento de aguas residuales con contenido de cianuros.

El tratamiento de cianuros, se realiza mediante mecanismos de reacciones químicas llamadas redox (reducción – oxidación). El proceso redox se caracteriza por la existencia de una transferencia de electrones entre los compuestos que intervienen en la reacción, de forma que un compuesto los cede y el otro los capta. De aquí se deduce, la reacción de dos componentes, oxidante y reductor, perfectamente definidos. La función primaria de la oxidación en el tratamiento de efluentes de cianuros, es esencialmente convertir el cianuro a un compuesto menos tóxico como lo es el cianato, o destruirlo completamente y convertirlo a dióxido de carbono y nitrógeno. La función secundaria es la precipitación de materiales, los cuales al ser oxidados tienen una menor solubilidad. La **Tabla 4.2a** muestran las tecnologías desarrolladas en el proceso de oxidación del cianuro con sus ventajas y desventajas.

Tabla 4.2a : Tecnologías usadas en el proceso de oxidación de cianuros.

Tecnología	Objetivo	Ventajas	Desventajas
Oxidación Química por Clorinación Alcalina	Oxidación del CN^- en dos etapas: 1) $CN^- > CNO^-$ 2) $CNO^- > CO_2 + N_2$	Fácil manipuleo y control del dosaje. La segunda etapa no es necesario si los desechos no entran en contacto con otros que contienen cromo.	La reacción es exotérmica a altas concentraciones de cianuros, puede producir combinaciones gaseosas tóxicas.
Oxidación Química por Sulfato Ferroso	Formación de un complejo que es removido en forma de lodo	Bajo costo de operación, la solución de sulfato ferroso proviene del baño agotado del decapado. Fácil manipuleo y control de dosaje	Formación de gran cantidad de lodo. Efluente coloreado de azul. El ferrocianuro se descompone a cianuro libre en presencia de la luz solar.
Oxidación Química por peróxidos	Oxidación de cianuros a cianatos	Precipitación de metales pesados en forma de óxidos e hidróxidos.	Los cianuros se oxidan parcialmente a cianatos.
Oxidación Química por ozono	Oxidación de cianuros a dióxido de carbono y nitrógeno	Adicionalmente, el ozono oxida fenoles y cromóforos, y los transforma en productos no tóxicos e incoloros.	Por su inestabilidad, el ozono se debe generar in situ. Dificultad en el manipuleo y control del dosaje.
Oxidación Electrolítica	Oxidación de cianuros a cianatos	Método eficiente, reduce concentraciones de cianuros a menos de 1 ppm. No requiere el uso de reactivos químicos	Costo del tratamiento alto. Es aplicable a volúmenes de agua residual, menores de 100 litros.

En el presente trabajo, se seleccionó el proceso de oxidación de cianuros con hipoclorito de sodio, porque se adecua mejor a las plantas de desintoxicación artesanales, que usan el proceso de flujo discontinuo o batch, por su fácil manipuleo y control de dosaje.

Los datos del laboratorio nos muestran que la destrucción de cianuros es total e inmediata, la operación se realiza a condiciones ambientales y la producción de lodos es baja.

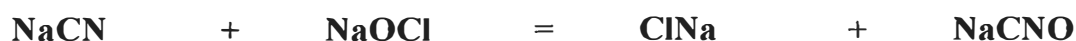
La **Tabla 4.2b.**, muestra los resultados del laboratorio del tratamiento de 6 muestras de contaminantes, asimismo se observa el proceso de oxidación de cianuros en dos etapas, típica de las aguas residuales de enjuague del desengrase electrolítico.

Tabla 4.2b : Operación para los Procesos de Oxidación de Cianuros de las Aguas Residuales del Enjuague del Desengrase Electrolítico

Muestra	pH del Agua Residual	Cianuro libre (mg/L)	Cianuro Total (mg/L)	Primera Etapa de la Oxidación $CN^-(ac) \rightarrow CNO^-(ac)$			Segunda Etapa de la Oxidación $CNO^-(ac) \rightarrow CO_2(g) + N_2(g)$				
				Dosis del Agente Oxidante Cl_2 / CN^-	Potencial Redox en el punto de equivalencia (mv)	Tiempo de reacción (min)	pH del agua residual	Dosis del agente oxidante Cl_2 / CN^-	Potencial Redox en el punto de equivalencia (mv)	Tiempo de reacción sin ajuste del pH (días)	Tiempo de reacción con ajuste del pH (8,0 - 8,5) (min)
01	12,6	920,15	1363,81	3,57	370	1	11,7	10,25	625	3	16
02	11,8	223,60	367,90	2,96	386	1	11,1	9,81	630	3	18
03	12,4	731,50	1105,20	3,82	360	1	11,1	10,87	640	3	15
04	12,4	746,20	1126,50	2,93	355	1	11,5	9,41	600	3	18
05	12,0	356,4	560,4	3,14	385	1	11,4	10,53	610	3	17
06	12,1	452,4	700,1	3,69	390	1	11,4	8,96	634	3	16

Como nos muestra la **Tabla 4.2b**, la reacción tiene lugar en dos etapas, la 1ra. etapa es de cianuro a cianato y la 2da. etapa es de cianato a dióxido de carbono (debido al pH de la operación a bicarbonato sódico) y nitrógeno. Los pH necesarios para las dos reacciones son diferentes, por lo que se realizan por separado.

La 1ra. etapa de oxidación de cianuro a cianato tiene lugar a un pH entre 10 – 11 y requiere un tiempo de 1 minuto. La rapidez de reacción aumenta con el pH y exceso de cloro. La reacción que tiene lugar es:



El pH de la reacción debe mantenerse entre 10-11 con el fin de evitar la formación de gases tóxicos como el ClCO y el HCN y acelerar la reacción.

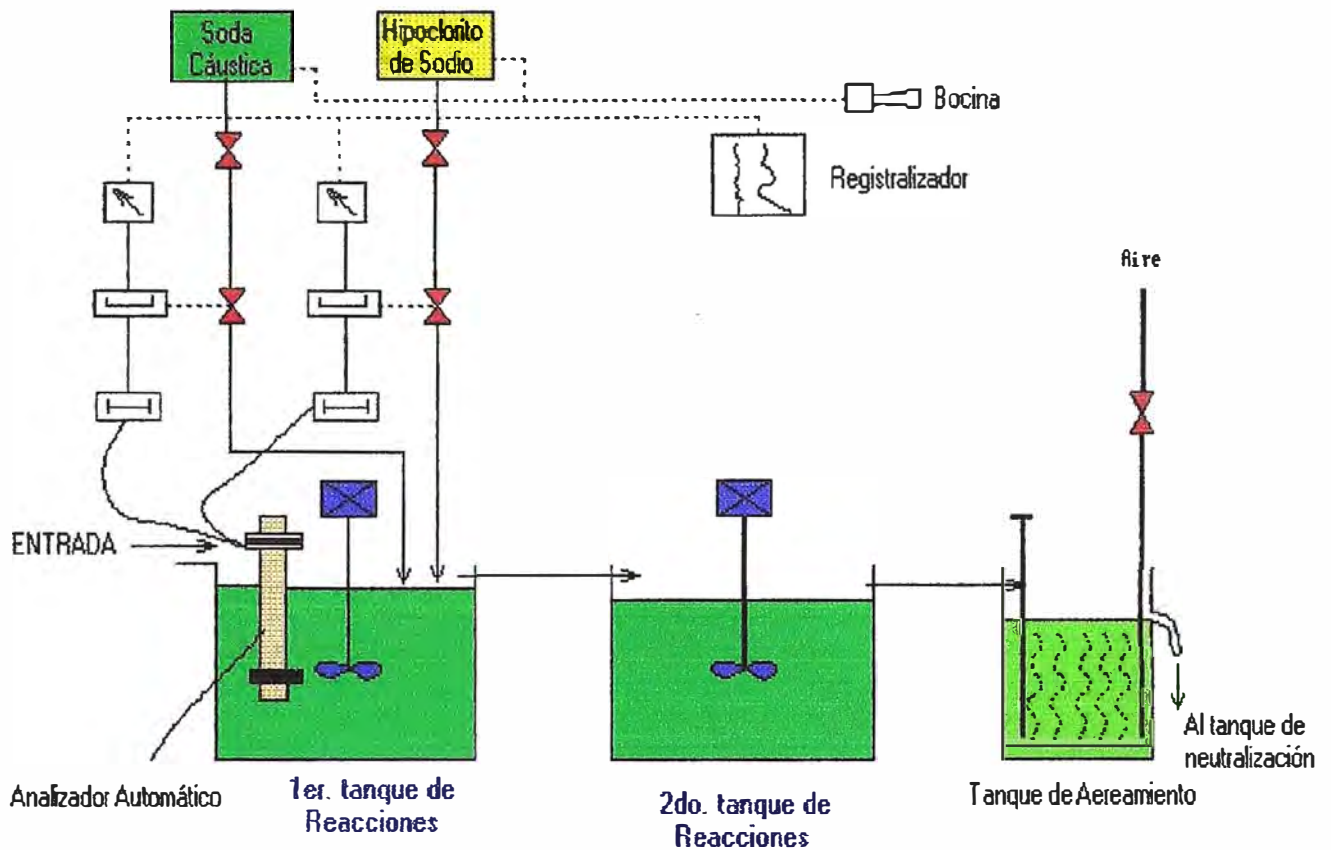
La 2da. etapa de oxidación de cianato a dióxido de carbono y nitrógeno es:



Manteniendo un pH neutro entre 8 y 8.5 el tiempo necesario de permanencia es de aproximadamente de 18 minutos.

La **Fig.4.2a** muestra un esquema de tratamiento automático continuo de las aguas residuales con contenidos de cianuros. Para la eliminación completa de cianuros, hasta un rango de concentración de 0.1 mg/l, según normas internacionales, se conduce el flujo de aguas residuales a un tanque, donde se mide el pH, para controlarlo y mantenerlo hasta 10, mediante dosificación con soda cáustica, se agrega el cloro en forma de hipoclorito de sodio(lejía) al tanque, luego es mezclado bien, utilizando un agitador de paleta. Producidas las reacciones arriba mencionadas, aparecen cierta cantidad de lodos constituidos por los nuevos productos formados. Sin embargo no se ha destruido aun, el 100% de los cianuros, por lo que se requiere extender las condiciones propicias para que continúen las reacciones, para ello, las aguas residuales con cierto contenido de sales insolubles recién formadas pasan a otro tanque donde continua la agitación mecánica, a fin de prolongar el periodo de reacciones y garantizar la disminución de cianuro hasta

Fig. 4.2a : Esquema de tratamiento automático para descontaminar las aguas residuales con contenido de cianuros



el rango de concentración de 0.1 mg/l. El agua así tratada pasa entonces a un tanque de neutralización general donde se juntan con las aguas cromatadas ya tratadas y desintoxicadas; así como también con las aguas residuales que no contienen cromo ni cianuro.

El tanque de neutralización, Fig 4.2b, debe estar equipado también con inyector de aire, medidores de pH y dispositivos de dosificación de soda cáustica y ácido para mezclar y mantener el pH en 8-9.

Del tanque de neutralización pasa al tanque de sedimentación que generalmente tiene la forma de cono invertido, como muestra la Fig 4.2c, equipado con una bomba de succión de lodos que se depositan en el fondo y son llevados a un filtro prensa para separarlos. El agua clarificada, finalmente se encuentra lista para verter al desagüe municipal o para reutilizarla en la planta de galvanotécnica.

Fig. 4.2b : Esquema de un tanque de neutralización de una planta de tratamiento de aguas residuales de proceso continuo

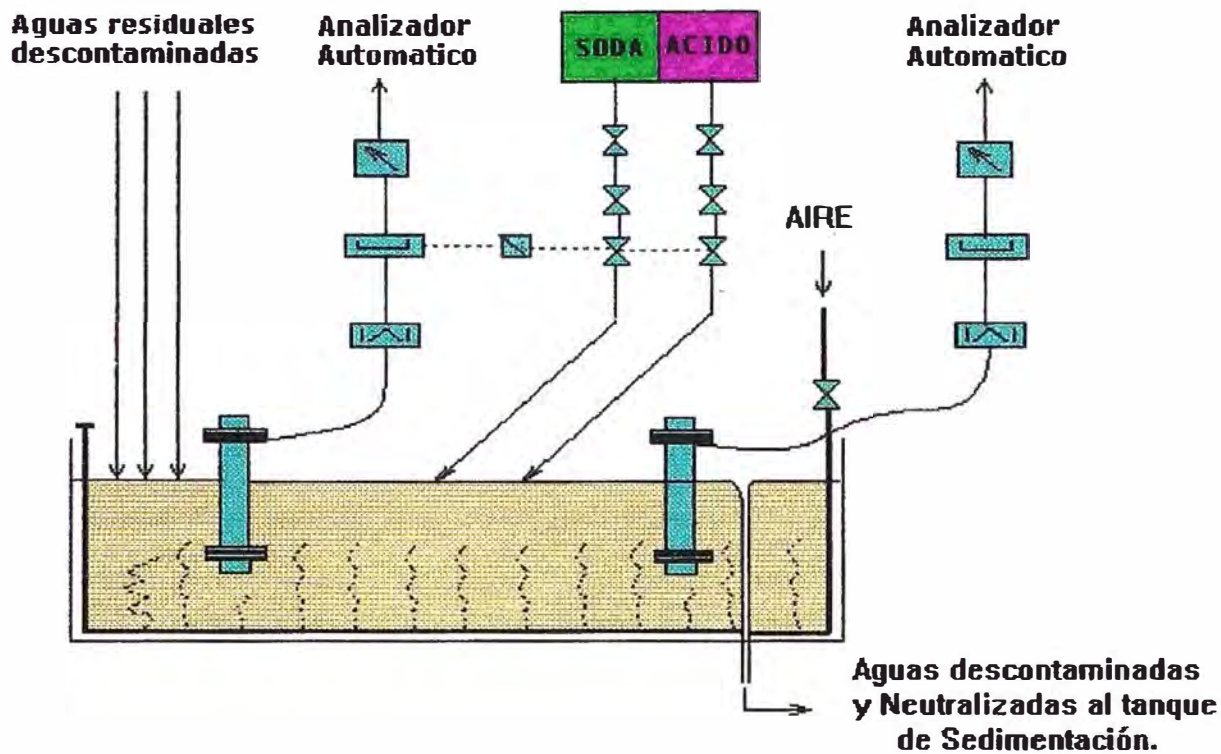
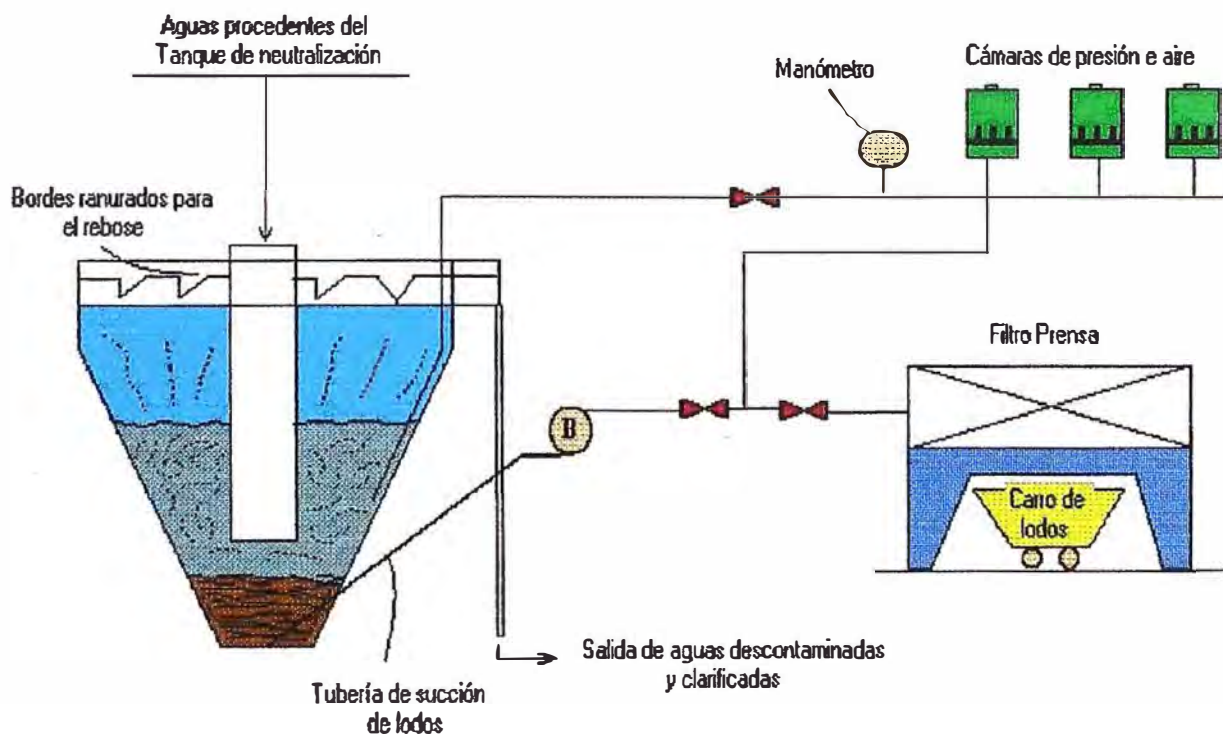


Fig. 4.2c : Sistema de sedimentación constituido de una poza en forma de cono invertido



4.3 Tratamiento de las aguas con contenido de cromato.

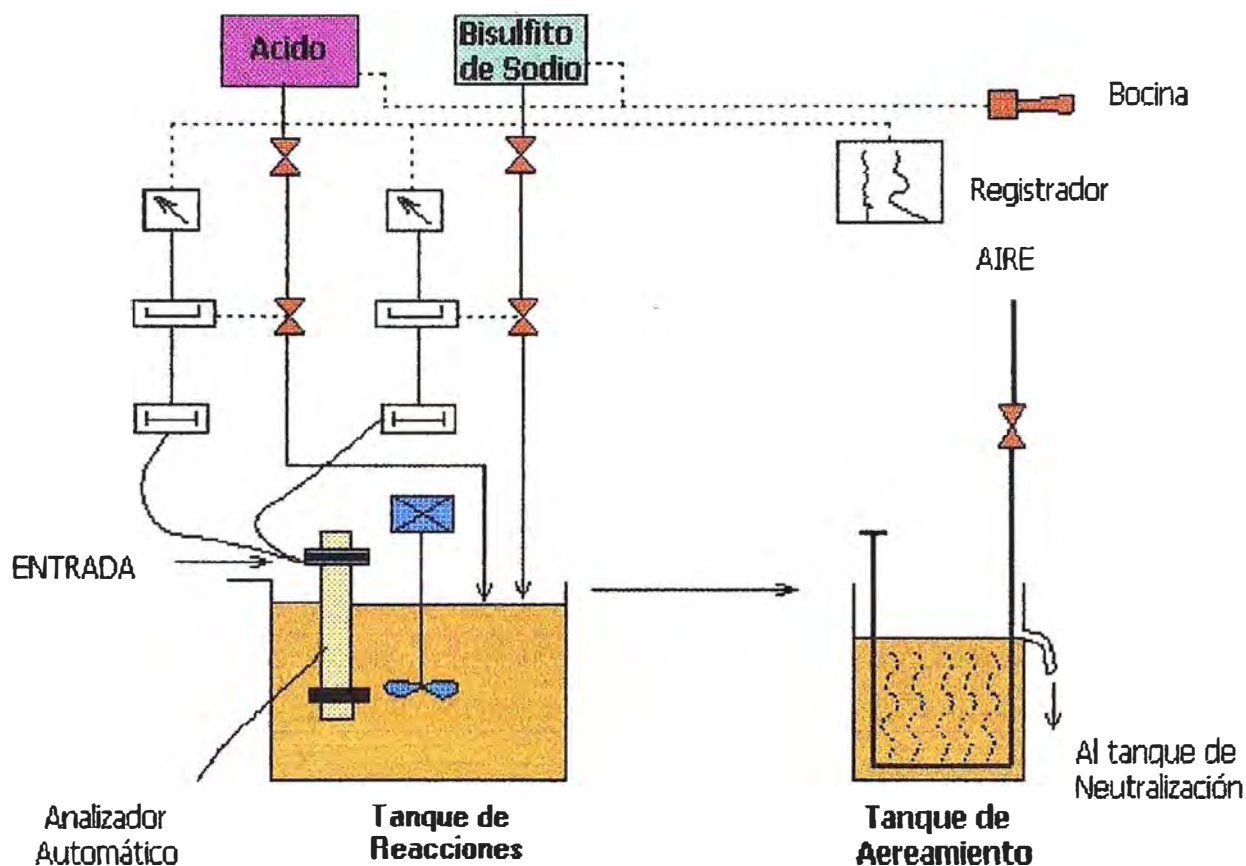
Otro de las aplicaciones del mecanismo redox, es la reducción del cromo hexavalente a trivalente cuya toxicidad es del orden de 100 veces menor y la posterior precipitación del hidróxido insoluble, eliminado en forma de lodo.

La Fig. 4.3, muestra el esquema de una planta automática para el tratamiento de aguas residuales con contenido de cromo y sus derivados; el tratamiento de desintoxicación de las aguas residuales con contenido de cromatos y ácido crómico libre, se realiza en un tanque similar que en el de cianuros, pero con dosificación de ácido (sulfúrico, clorhídrico, etc. en solución al 20% aprox.), para mantener el pH por debajo de 2.5, y luego realizar la reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente, por acción de sustancias reductoras como el bisulfito de sodio (NaHSO_3), sulfito de sodio (Na_2SO_3), sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), o metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

Estas sustancias se pueden agregar en polvo, mediante alimentadores secos o en solución o emulsión (como en el caso del bisulfito de sodio que se utiliza en emulsión al 20%), que se agregan mediante alimentadores o dosificadores para líquidos.

Algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, sobre todo aquellas de tipo continuo, están equipadas con alimentadores automáticos que agregan las sustancias reductoras al tanque, según las señales que envían los analizadores automáticos que normalmente tienen instalados en el tanque de tratamiento.

Fig. 4.3 : Esquema de tratamiento de las aguas residuales con Contenido de cromo y derivados



Entre las sustancias reductoras más usuales se encuentra el sulfato ferroso y el bisulfito de sodio.

Las reacciones que se producen durante el proceso en el cual el cromo hexavalente se convierte en cromo trivalente, son muy diversas dependiendo del agente reductor que se utilice. El ión Cr^{6+} forma el anión cromato CrO_4^{2-} , de color amarillo. En medio ácido se apropia de otra molécula de CrO_3^- originando dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, de color rojo naranja.

La reacción que se produce, si se utiliza bisulfito de sodio es:



En la práctica para neutralizar 1 kg de cromato se necesitan 8 litros de bisulfito sódico al 40%.

Si se utiliza sulfato ferroso heptahidratado la reacción es:



Después que se ha producido la reducción del cromo, las aguas que ya contienen partículas sólidas en suspensión, provenientes de las reacciones de reducción, pasan a otro tanque equipado con ductos de inyección de aire, donde se le somete una operación de aereamiento o ventilación interna, para eliminar los restos eventuales de los productos remanentes de la reacción, tal como muestra la Fig. 4.3. El agua así tratada pasa entonces al tanque de neutralización (Fig. 4.2b), donde se juntan con las aguas cianuradas ya desvenenadas y aquellas que no contienen cromo ni cianuro. Allí se analiza el pH de la solución para determinar la cantidad de soda o de ácido que se debe agregar para neutralizarla. Manteniendo el pH en 8-9 como se indicó antes. En las plantas modernas el análisis de pH y la dosificación consecuente de soda o ácido son controlados automáticamente por el computador que gobierna la planta. Del tanque de neutralización pasa al tanque de sedimentación (Fig. 4.2c) que generalmente tiene la forma de cono invertido.

Como se mencionó antes, los agentes reductores utilizados son : sulfato ferroso heptahidratado, bisulfito sódico o el anhídrido sulfuroso. Por criterios de costos y disponibilidad en el mercado local, utilizaremos el bisulfito de sodio, llevándose a cabo la reacción en medio ácido, entre 2 y 2.5

El ión Cr^{3+} (trivalente), como se mencionó antes, es mucho menos tóxico que el ión cromato (Cr^{6+}). Sin embargo, la reducción de cromatos no alcanza todo su valor hasta que no se elimine ulteriormente el cromo trivalente que se efectúa por precipitación en forma de hidróxido de cromo insoluble, en el último estudio de la depuración que es el recipiente de decantación (tipo cono invertido Fig. 4.2c).

4.4 Diseño del Sistema Propuesto.

La **Fig. 4.4a**, muestra el diagrama completo para el tratamiento de las aguas residuales para una planta galvánica continua, mediante el procedimiento químico, las cuales tienen las siguientes etapas

- Oxidación de cianuros
- Reducción de cromatos
- Neutralización.
- Decantación o sedimentación.
- Filtración de lodos.

La **Fig. 4.4b**, muestra, el diagrama que se propone para el tratamiento de las aguas residuales de una planta artesanal galvánica de cromado, mediante el procedimiento químico. Asimismo, el diseño se basa mediante el método por cargas o tipo batch, dado a que se adapta mejor a este tipo de plantas artesanales, ya que su producción no es continua y se trabaja mayormente a pedidos.

En el **Anexo 1**, se ilustran los diagramas o esquemas de la secuencia de operación del módulo o sistema propuesto para el tratamiento de las aguas residuales.

Fig. 4.4.a Esquema de tratamientos de aguas residuales de una planta galvánica continuada automatizada.

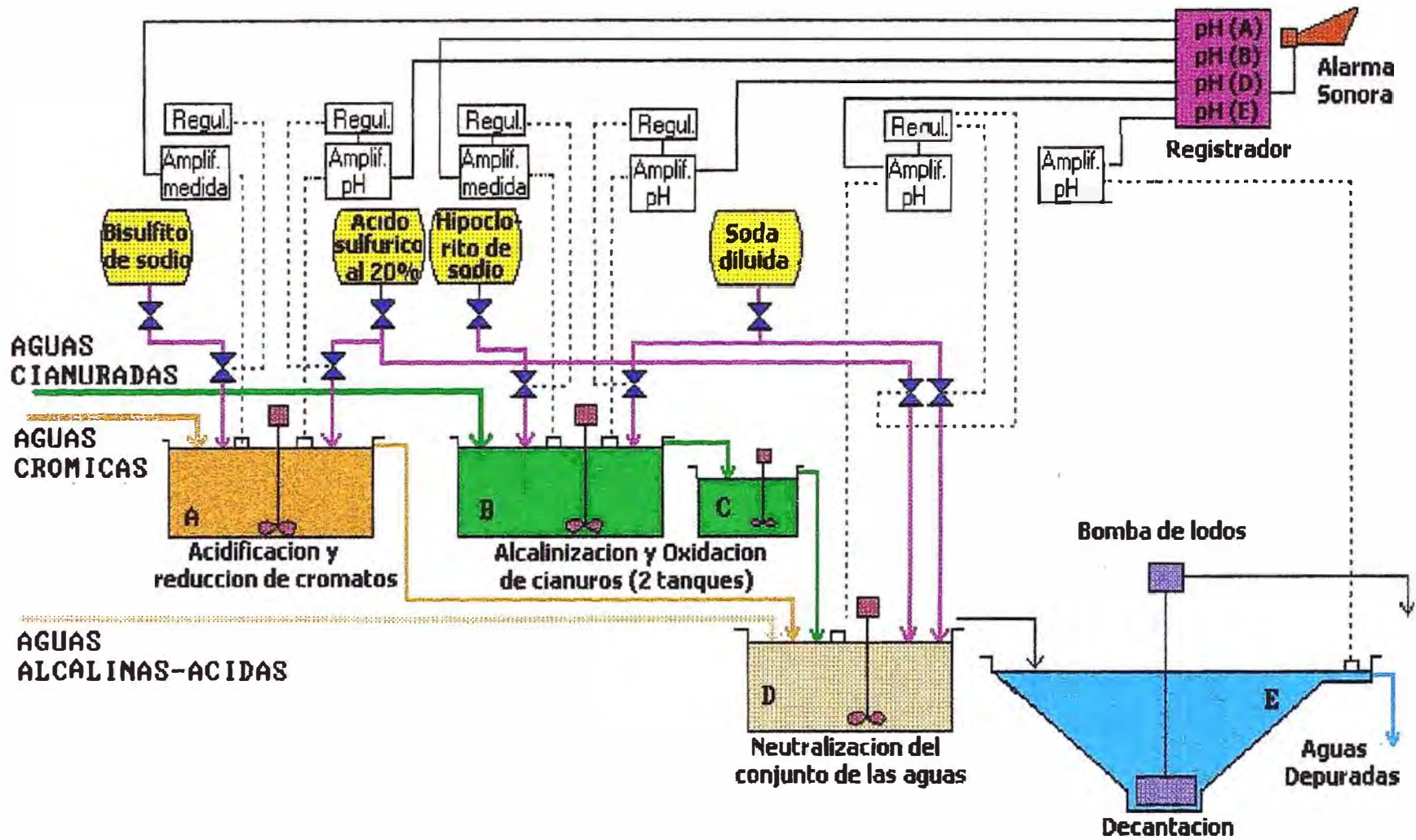
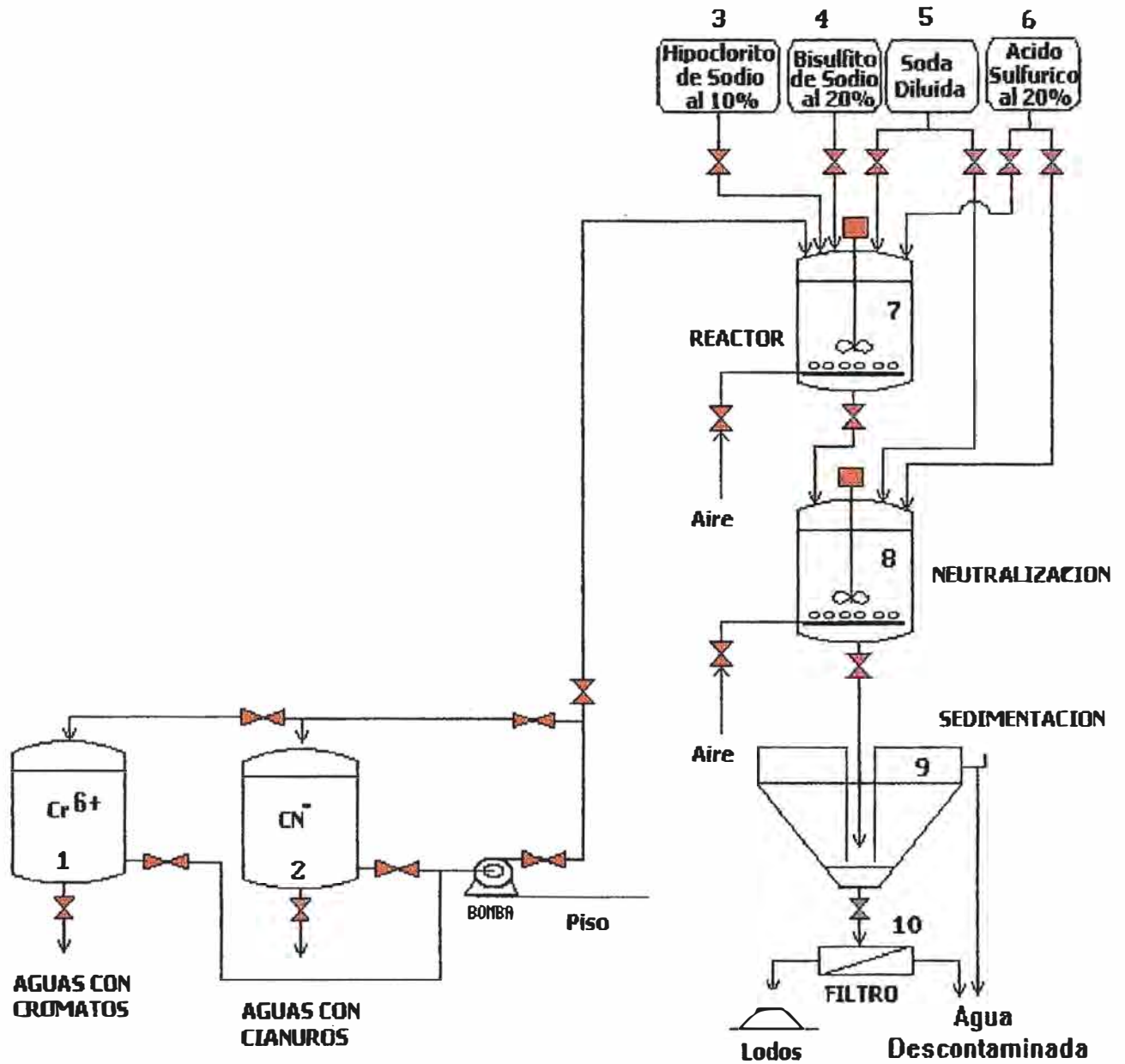


Fig. 4.4b Esquema propuesto para el tratamiento de las aguas residuales de 175 litros de capacidad, para una planta galvánica artesanal.



4.4.1 Dosificación de reactivos.

Los reactivos a utilizar son

Para neutralizar aguas con contenido de cianuros (CN^-) : Hipoclorito de sodio al 10%

Para neutralizar aguas con contenido de cromatos (CrO_4^{2-}): Bisulfito de sodio al 20%

A) Hipoclorito de sodio al 10%.

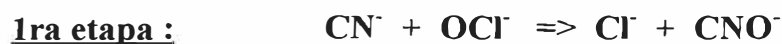
En nuestra planta artesanal, la mayor cantidad de descarga son los efluentes de cianuro, cuyo tratamiento lo haremos con hipoclorito de sodio al 10% disponible en el mercado local.

Los datos de operación son los siguientes:

Frecuencia de descarga (depende de los pedidos)	43.5 L/semana.
Volumen de descarga acumulable mensual	175 L/mes
Concentración del contaminante cianuro (Promedio)	940 mg/L
Contaminante cianuro de descarga mensual	164.5 g/mes

Cálculo de la cantidad de Hipoclorito de sodio al 10%

Este cálculo se realiza para neutralizar 175 litros de cianuro con una concentración de 940 mg/L, siguiendo las siguientes etapas:



- Para convertir a cianato [CNO^-] los 940 mg. de cianuro [CN^-] en un litro, necesitamos 2.607g de hipoclorito [OCl^-], partiendo según la dosificación práctica. Según la reacción, se forma 1.518g cianato [CNO^-]. (Ver Anexo1)

- En 1 litro de hipoclorito de sodio [NaOCl] al 10%, tenemos 69.128g de hipoclorito [OCl^-] (Ver Anexo2)

En consecuencia, por regla de tres simple, calculamos los litros de hipoclorito de sodio al 10% necesarios:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ Litro de Hipoclorito de sodio al } 10\% & \rightarrow & 69.128 \text{ g } [\text{OCl}^-] \\ X & \rightarrow & 2.607 \text{ g } [\text{OCl}^-] \end{array}$$

Tabla 4.4.1a : Volumen añadido de hipoclorito de sodio al 10% a diferentes concentraciones de cianuro.

Volumen del agua residual	Valor de Concentración	Volumen añadido para eliminar CN ⁻ (Litros)		Volumen Total del tanque reactor	Carga Contaminante de CN ⁻ (gramos)
		NaOCl 10%	NaOCl 63%		
CN ⁻ (L)	CN ⁻ (mg/L)			CN ⁻ + OCl ⁻ (L)	
175	500	11.03	1.75	186.03	87.5
175	800	17.65	2.80	192.65	140.0
175	940	20.74	3.29	195.74	164.5
175	1000	22.06	3.50	197.06	175.0
175	1500	33.10	5.26	208.10	262.5
175	2000	44.13	7.01	219.13	350.0
175	2500	55.16	8.76	230.16	437.5
175	3000	66.19	10.51	241.19	525.0
175	3500	77.22	12.27	252.22	612.5
175	4000	88.25	14.02	263.25	700.0
175	4500	99.29	15.77	274.29	787.5
175	5000	110.32	17.52	285.32	875.0
175	5500	121.35	19.27	296.35	962.5
175	5600	123.56	19.62	298.56	980.0
175	5700	125.76	19.98	300.76	997.5
175	5714.3	126.08	20.03	301.08	1000.0

B) Bisulfito de sodio al 20%

Utilizamos el Bisulfito de sodio al 20% para el tratamiento de las aguas con contenido de cromatos, específicamente reducir el cromo Cr⁶⁺, muy tóxico a cromo Cr³⁺.

La solución de bisulfito de sodio al 20% es preparada al momento de utilizarlo, ya que este producto químico esta disponible en el mercado local en forma sólida.

Datos de operación son los siguientes:

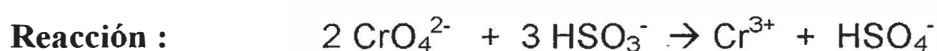
Frecuencia de descarga 43.5 L/semana.

Volumen de descarga acumulable mensual 175 L/mes

Concentración promedio de contaminante Cr ⁶⁺	4833,1 mg/L
Carga contaminante de Cr ⁶⁺ de descarga mensual	845.79 g Cr ⁶⁺ /mes

Cálculo de la cantidad de Bisulfito de sodio al 20%

Este cálculo se realiza para neutralizar 175 litros de Cr⁶⁺ con una concentración de 4833.1 mg/L, siguiendo la siguientes reacción:



- La concentración de Cr⁶⁺ de 4833.1 mg/L, equivale a una concentración de cromato [CrO₄²⁻ de 10781.53 mg/L. (Ver Anexo4)
- En 1 Litro de bisulfito de sodio de sodio [NaHSO₃] al 20%, contiene 155.77 grs de bisulfito [HSO₃⁻] (Ver Anexo5)
- Para eliminar 1 litro de residuo con contenido de Cr⁶⁺ (4833.1 mg) en forma de cromato CrO₄²⁻ (10781.53 mg), se necesitan 26.87 grs de bisulfito [HSO₃⁻], según dosificación practica. (Ver Anexo6).

Así, por regla de tres simple, calculamos los litros de bisulfito de sodio al 20% necesario:

$$\begin{array}{rcl}
 1 \text{ Litro de Bisulfito de sodio al 20\%} & \rightarrow & 155.77 \text{ g HSO}_3^- \\
 X & \rightarrow & 26.87 \text{ g HSO}_3^-
 \end{array}$$

X = 0.173 litros de bisulfito de sodio al 20% necesarios para neutralizar 4833.1 mg. de Cr⁶⁺ en un litro de agua residual.

Para los 175 litros de agua residual, necesito : 0.173 x 175 = 30.19 litros de bisulfito de sodio al 20%

V = 30.19 Litros. (Bisulfito de sodio al 20%)

Para los 175 litros de agua residual, necesito: 15.09 litros bisulfito de sodio al 40%.

Para los 175 litros de agua residual, necesito: 30.19 litros bisulfito de sodio al 20%.

Si las concentraciones de los cromatos variasen, se tendría que modificar la carga de reactivo al tanque reactor. La **Tabla 4.4.1b**, muestra el volumen añadido a diferentes concentraciones de contaminante Cr^{6+} .

Tabla 4.4.1b : Volumen añadido de bisulfito de sodio al 20% a diferentes concentraciones de cromato.

Vol. agua Residual $[\text{CrO}_4^{2-}]$ (L)	Concent. $[\text{CrO}_4^{2-}]$ mg/L	Cr Hexa. $[\text{Cr}^{6+}]$ mg/L	Vol.añad. NaHSO_3 20% (L)	Vol.añad. NaHSO_3 40%(L)	Volumen Reactor (L)	Carga CrO_4^{2-} (g)	Carga Cr^{6+} (g)
175	4461.54	2000.00	12.49	6.25	187.49	780.8	350.00
175	5576.92	2500.00	15.62	7.81	190.62	976.0	437.50
175	5714.29	2561.58	16.00	8.00	191.00	1000.0	448.28
175	6692.31	3000.00	18.74	9.37	193.74	1171.2	525.00
175	8923.08	4000.00	24.98	12.49	199.98	1561.5	700.00
175	9815.38	4400.00	27.48	13.74	202.48	1717.7	770.00
175	10261.54	4600.00	28.73	14.37	203.73	1795.8	805.00
175	10596.15	4750.00	29.67	14.83	204.67	1854.3	831.25
175	10781.50	4833.10	30.19	15.09	205.19	1886.8	845.79
175	10819.20	4850.00	30.29	15.15	205.29	1893.4	848.75
175	10930.77	4900.00	30.61	15.30	205.30	1912.9	857.50
175	11153.85	5000.00	31.23	15.62	206.23	1951.9	875.00
175	12269.20	5500.00	34.35	17.18	209.35	2147.1	962.50
175	12747.25	5714.29	35.69	17.85	210.69	2230.8	1000.00

4.4.2 Selección del volúmen del tanque reactor.

El volumen del reactor se fija observando las tablas 4.4.1a y 4.4.1b y la disponibilidad de cilindros volumétricos en el mercado local.

La tabla 4.4.1b, es el factor limitante porque utiliza una mayor cantidad volumétrica de reactivos (se utiliza 30.19 litros de bisulfito de sodio al 20% contra 20.74 litros de hipoclorito de sodio al 10%).

Volumen para el reactor de tratamiento de cianuros:

$V_R[\text{CN}^-] = \text{Volumen inicial (solución de } \text{CN}^-) + \text{Volumen añadido de hipoclorito}$

$$V_R[\text{CN}^-] = 175 + 20.74 = 195.74 .$$

$$V_R[\text{CN}^-] = 195.73 \text{ L.}$$

Volumen para el reactor de tratamiento de cromatos:

$V_R[\text{CrO}_4^{2-}] = \text{Volumen inicial (solución de } \text{CrO}_4^{2-}) + \text{Volumen añadido de bisulfito}$

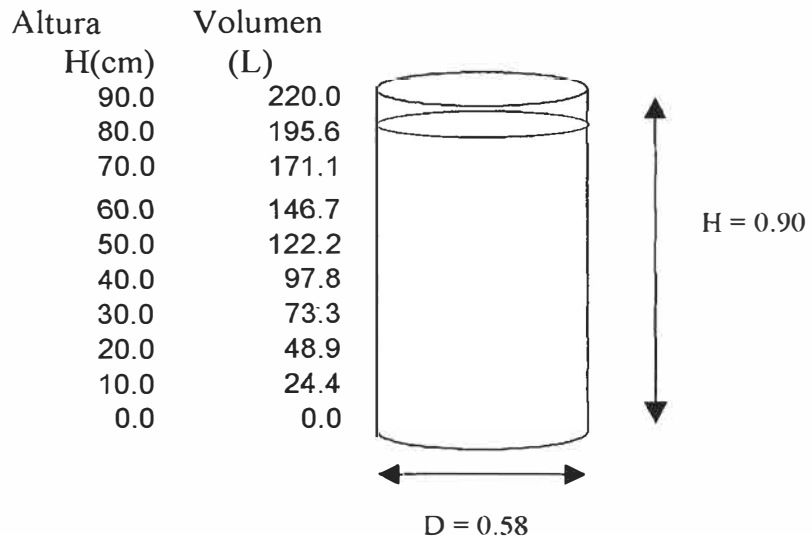
$$V_R[\text{CrO}_4^{2-}] = 175 + 30.19 = 205.19.$$

$$V_R[\text{CrO}_4^{2-}] = 205.19 \text{ L.}$$

Según nuestro modulo de tratamiento propuesto, podemos utilizar un solo tanque para las dos reacciones, es decir encontrar un volumen común que pueda trabajar para ambos volúmenes. En el mercado local existen disponibles cilindros de plásticos, con capacidades de 50, 220 y 1000 litros. En consecuencia, elegimos para nuestro caso, el tanque de 220 litros de capacidad, la cual puede ser utilizado en forma común para ambas reacciones, porque satisface los requerimientos.

Hay que tener en cuenta, que debe haber un espacio entre la superficie del liquido y el borde superior del reactor, ya que se instalará agitadores mecánicos.

La **Fig. 4.4.2** muestra la cubicación del tanque de recepción de las aguas residuales.

Fig. 4.4.2 : Cubicación de tanque de recepción de aguas residuales

Por otro lado, una vez elegido el volumen del reactor, se deduce los límites de concentraciones de cianuro con las que pueda tratar. De la tabla 4.4.1a, se observa que podemos tratar concentraciones de cianuro $[\text{CN}^-]$ comprendidas entre 500 a 1500 mg/L (Volumen de 186 hasta 208 litros). De la tabla 4.4.1b (para el cromato) deducimos que para 175 litros de agua residual con contenido de cromato, los límites de concentración de tratamiento de $[\text{Cr}^{6+}]$, varían entre 2000 a 5000 mg/L (Volumen de 186 hasta 207 litros).

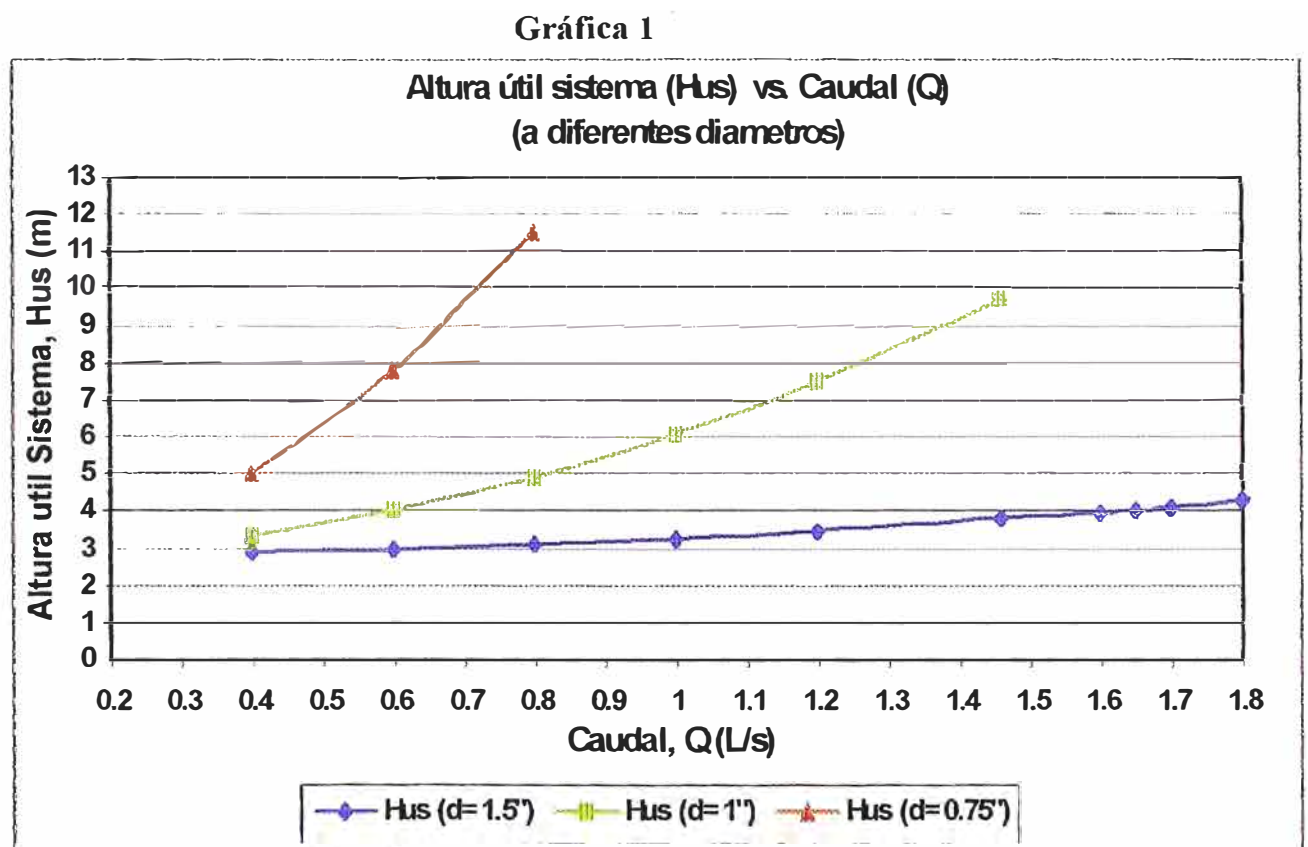
En ambos casos, si se requiere tratar a concentraciones mayores de 1500 mg/L (para el cianuro) o mayores de 5000 mg/L (para el cromo hexavalente), se tendría que disminuir el volumen del agua residual para que el volumen total no sobrepase el volumen del tanque reactor (no debe pasarse el contenido del líquido en 208 litros).

4.4.3 Selección de la bomba y diámetro de tubería.

Pasos:

1.- Calcular la altura útil del sistema (Hus) propuesto y hacer las curvas de Hus versus caudal(Q) a diferentes diámetros de la tubería (ver anexo 6).

De los cálculos del anexo 6, se obtuvo la siguiente gráfica de la altura útil del sistema (Hus) vs. caudal (Q) a diferentes diámetros de la tubería:



Leyenda :

Hus (d=1.5'') : Altura útil del sistema a un diámetro de 1.5 pulgadas.

Hus (d=1.0'') : Altura útil del sistema a un diámetro de 1.0 pulgadas.

Hus (d=3/4'') : Altura útil del sistema a un diámetro de 0.75 pulgadas.

2.- Seleccionar el tipo de bomba más adecuado, según el material de fabricación del impulsor, debido al manejo de fluidos corrosivos, tales como cianuros y cromatos. Asimismo, el fabricante nos proporcionará las curvas características de la Altura útil de la bomba (Hub) vs. Caudal(Q) de las posibles bombas seleccionadas.

Según la tabla proporcionada del fabricante tenemos

Chemical	Formula	ELASTOMERS			METAL PARTS			PLASTICS		
		Neoprene	Buna-N	Teflón (TFE)	Aluminium	Stainless Steel	Cast Iron	Polypropilene	Kynar(PVDF)	Nylon
Sodium Chloride	NaCl	A	A	A	B	A	B _{30%}	A	A	A
Sodium Hydroxide	NaOH	B	B	A	X	A _{50%}	B _{50%}	A	A	C
Sodium Chromate	Na₂CrO₄	A	A	A	A_{80%}	A_{60%}	A_{60%}	A	A	A
Sodium Cyanide	NaCN	A	A	A	X	A	A	A	A	B
Sodium Hypochlorite	NaClO	B	X	A	X	X	X	X	A	C

Leyenda :

Resistencia a la corrosión:

A: Muy buena B: Medio C: Mala. X: Muy mala (No usar)

Según la tabla anterior, para fluidos que contienen CN⁻ y CrO₄⁼ se recomienda utilizar bombas de Teflón, Polipropileno o de Acero inoxidable, según stock del fabricante o vendedor.

Según la tabla anterior seleccionamos dos bombas que cumplen con los requisitos de material de fabricación:

Bomba 1 :

Modelo : Electrobomba centrífuga Monoblock Serie A1

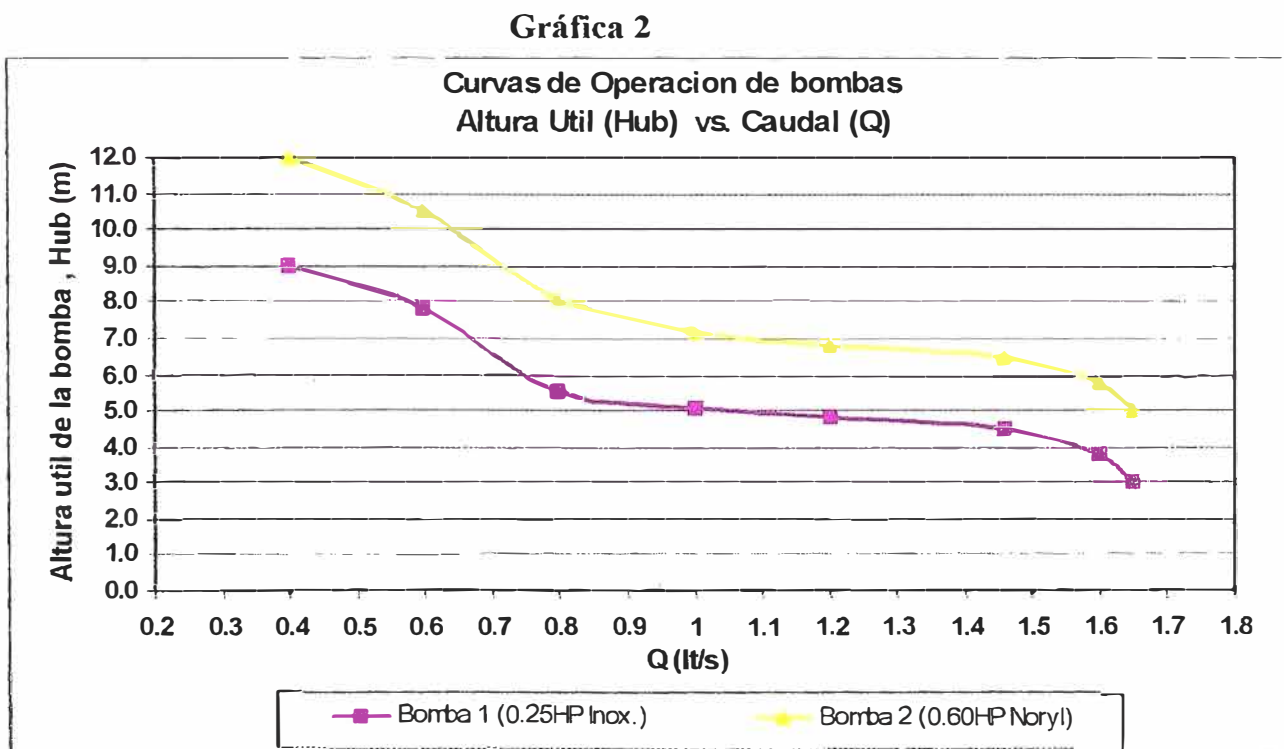
Motor : Monofásico de 0.25 HP, 220/110V, 60Hz, 3450rpm, Eje Acero inox. AISI 420

Caja : De fierro fundido gris.
 Impulsor : Tipo centrífugo. Fabricado de Acero inoxidable.
 ϕ succión x descarga 1" x 3/4"
 Costo \$ 78.0 + IGV.

Bomba 2 :

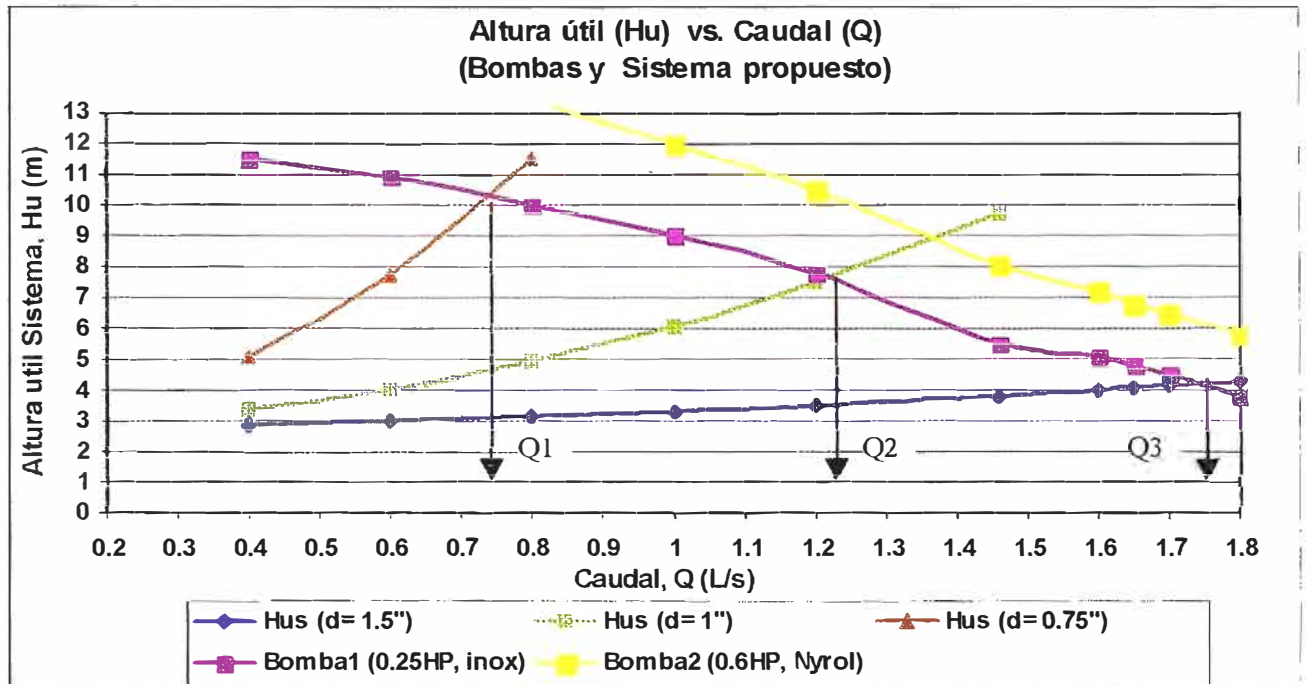
Modelo : Electrobomba Agua Master
 Motor : Monofásico de 0.6 HP, 220/110V, 60 Hz, 3450 rpm, con protector térmico. Eje en acero Inox. AISI 420.
 Caja : De material sintético NORYL.
 Impulsor : Tipo centrífugo. Fabricado de Material NORYL. Diseñado para máxima eficiencia.
 ϕ succión x descarga 1" x 3/4"
 Costo \$ 81.0 + IGV.

El fabricante también nos proporciona sus curvas características de operación, es decir gráficas de Alturas útiles de la bomba (Hub) vs. caudal(Q).



3.- Para seleccionar la bomba adecuada al sistema, superponer la Gráfica 1 y Gráfica 2, luego el punto donde la altura útil del sistema intercepta a la altura útil de la bomba a un cierto caudal, ésta será la bomba elegida. Como se muestra en la Gráfica 3.

Gráfica 3



La gráfica 3, muestra que la curva de la Bomba1 intercepta a las 3 curvas del sistema en 3 puntos, cuyos caudales son: $Q_1 = 0.75$, $Q_2 = 1.22$ y $Q_3 = 1.75$; Esto significa que la bomba1 puede trabajar a tres diámetros diferentes, el factor determinante para la elección del diámetro de tubería es el que tenga menor costo y el costo de la tubería está relacionada directamente con su diámetro, en consecuencia se elige la tubería de $\frac{3}{4}$ ".

Por otro lado, también se podría elegir la Bomba2, porque su curva intercepta en dos puntos con la curva del sistema. Pero esta Bomba2 se descarta, porque su costo es mayor y el consumo de energía es mayor, debido a que tiene mayor potencia.

En conclusión

Se elige para nuestro sistema, la Bomba1 de 0.25 HP para bombear los 175 litros de agua residual hacia el reactor, se utiliza tubería de $\frac{3}{4}$ ". El sistema operará a un

caudal de $Q_1 = 0.75$ Litros/seg., asimismo el tiempo estimado en descargar los 175 Litros de agua residual será de: $175 / (0.75 \times 60) = 4$ min.

4.4.4 Costos

a) Costos de equipos:

Los costos de los equipos, accesorios, tuberías, etc. utilizados en el sistema propuesto son los siguientes, en soles (S/.), incluido el IGV.

Cant.	Descripción	Und.	P. Unit.	Sub-Tot.
4	Tanques de 220 litros (1,2,7,8)	und.	70.8	283.2
4	Tanques de 50 litros (3,4,5,6)	und.	11.8	47.2
1	Tanque Sedimentador (adaptado)	und	94.4	94.4
15	Tubo ¾" PVC	mt.	3.5	53.1
15	Codos 90° ¾"	und.	1.7	26.6
6	Union "T"	und.	2.4	14.2
1	Bomba de 0.25 HP Inox.	und.	318.6	318.6
15	Válvulas compuerta."Simball"	und.	17.7	265.5
2	Agitadores (incluye motor)	und.	295.0	590.0
1	Filtro Kytasato (lodos)	und.	177.0	177.0
1	Bomba de succión.	und.	106.2	106.2
				=====
			Total	S/. 1,975.9

b) Costo de Instalación:

Incluye la mano de obra.

Obra Civil	: Base para la bomba	50.0
Estructura metálica	: Soporte de los tanques	150.0

		Total
		S/. 200.0

c) Costo de Insumos químicos:

Precios de reactivos químicos según el mercado local:

Producto Químico	\$/Kg	Estado
Hipoclorito de sodio al 10% (NaOCl)	0.26	Líquido
Bisulfito de sodio (NaHSO ₃)	0.56	Sólido
Hidróxido de sodio (NaOH)	0.48	Sólido
Acido Clorhídrico 33% (HCl)	0.52	Líquido
Acido Sulfúrico al 20% (H ₂ SO ₄)	---	Líquido

Consumo de reactivos para el tratamiento de 175 litros de agua residual con contenido de cianuro y 175 litros de agua residual con contenido de cromatos.

Producto Químico	Und.	Cant.	Costo Unit.	Total
Hipoclorito de sodio al 10%	L	20.74	0.91	18.76
Bisulfito de sodio al 20%	L	30.19	0.39	11.80
Hidróxido de sodio diluido 10%	L	2.0	0.34	0.34
Ac. sulfúrico 20% o Ac. clorhídrico 33%	und..	2.0	1.81	3.62
Papel filtro.	und	10	0.25	2.50
Papel indicador de pH.	und.	1	10.0	10.00
Total :				S/. 47.02
Total + IGV. :				S/. 55.50

d) Costo de equipos de seguridad:

Solamente es necesario que opere una sola persona.

Cant.	Equipo	Und.	Precio	Total
1	Casco	und.	20.0	20.0
1	Guantes	par.	18.0	18.0
1	Lente	und.	8.0	8.0
1	Botas Especiales	par.	30.0	30.0
1	Respiradores	und.	15.0	25.0
Total :				S/. 101.0
Total + IGV. :				S/. 119.2

Total a Invertir : $1975.9 + 200 + 55.5 + 119.2 = 2350.6$

Total = S/. 2,350.6

4.4.5 Operación del sistema o módulo propuesto

El sistema propuesto funcionará de la siguiente manera:

1.- Almacenamiento de las aguas residuales : Las aguas residuales con contenido de cromatos se almacenan en un tanque y las aguas residuales con contenido de cianuros en otro tanque, hasta completar 175 litros. El tiempo en recolectar los 175 litros de aguas residuales cianuradas procedentes del enjuague electrolítico y del cobreado alcalino, demora un tiempo de aproximadamente 1 mes; esto puede variar, dependiendo de la producción de cromado de las piezas metálicas; de igual manera, el tiempo en recolectar 175 litros de agua residuales cromatadas, procedentes de los enjugues y baños electrolíticos agotados, demora aproximadamente 1 mes, también puede variar, dependiendo de la producción de cromado.

2.- Preparación de Reactivos : La preparación de reactivos tiene que estar listo para su uso, el hipoclorito de sodio al 10% se compra en solución ya preparada, el bisulfito de sodio al 20% se tiene que preparar, ya que se vende en estado sólido, la soda diluida también se prepara la solución y el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico al 33% ya viene preparada.

Estos reactivos se colocan en tanques por separado de 50 litros, en la parte superior del tanque reactor para su dosificación.

3.- Bombeo de aguas residuales cianuradas (CN⁻) hacia el reactor : Una vez colocado los reactivos en la parte superior, se empieza a bombear las aguas residuales de cianuro hacia el tanque reactor, esto demora aprox. 4 min (según cálculos), luego agregamos soda cáustica poco a poco, para regular el pH a 10-11,

luego se agrega un volumen inicial de 6.60 litros de hipoclorito al 10%, agitación y aire para convertir el cianuro a cianato (1ra. etapa de reacción), esto demora aprox. 1 min., luego agregar los 14.14 litros restantes (2da etapa de reacción) para eliminación total de cianuro, agitación y aire. Inmediatamente vertemos el contenido a la etapa de neutralización durante 18-20 min, controlando el pH entre 8-8.5, agregando ácido con agitación y aire. Después, se vierte todo el contenido al tanque de sedimentación durante 3 días, luego, se elimina los lodos mediante un filtro y la solución desintoxicada se vierte al desagüe o reutiliza al proceso.

4.- Bombeo de aguas residuales cromatadas (CrO_4^{2-}) hacia el reactor : Se empieza a bombear (mediante cambio de válvulas) con la misma bomba, las aguas residuales del tanque de aguas cromatadas hacia el reactor, esto demora aprox. 4.17 min (según cálculos), luego agregamos ácido (sulfúrico) poco a poco, para regular el pH a 2-3, luego agregamos un volumen de 30.2 litros de bisulfito de sodio al 20%, para convertir el cromo hexavalente Cr^{6+} , a cromo trivalente Cr^{3+} (100 veces menos tóxico), agitación y aire. Luego se vierte todo contenido a la etapa de neutralización durante 18-20 min, controlando el pH entre 8-8.5, agregando soda cáustica diluida y agitando la solución para uniformizar la concentración. Después, se vierte todo el contenido al tanque de sedimentación durante 3 días, luego, se elimina los lodos mediante un filtro y la solución desintoxicada se vierte al desagüe o reutiliza al proceso.

V. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL

5.1 Plan de Mitigación

Identificando las líneas contaminantes del proceso, proponemos lo siguiente:

- Realizar un análisis químico del agua residual descontaminada para decidir si se puede reutilizar al proceso.
- Realización de un manual de manejo de productos químicos peligrosos.
- Dar charlas de seguridad industrial a los trabajadores

5.2 Plan de Monitoreo

Debido a que la planta no trabaja en forma continua, se realizará lo siguiente:

- Hacer por lo menos un análisis mensual del agua tratada.
- Los resultados de los análisis deberán ser llenados en una base de datos para su tratamiento estadístico.
- Reportar los consumos de agua mensual y hacer comparaciones si es que estamos reutilizando el agua tratada.

5.3 Plan de Contingencia

Debido a que la planta artesanal es chica, se recomienda:

- En caso de Sismos o terremotos mantener la serenidad y apagar las llave general de las maquinarias eléctricas.
- Hacer por lo menos un simulacro mensual para que el personal obtenga cierta preparación y saber que se debe hacer primero.
- Utilizar los equipos de seguridad en el manejo y operación del módulo propuesto para evitar daños físicos en caso de derrames químicos de los baños y tener los extintores en lugares visibles.

5.4 Plan de Cierre

Terminada las actividades de la planta (Cierre o por Clausura Municipal) se realizará lo siguiente:

- Tratar los baños galvánicos para su descontaminación.
- Los desechos sólidos y lodos desecharlos en rellenos sanitarios con reforestación.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones:

- 1.- La Industria Galvánica, genera la mayor cantidad de desechos líquidos inorgánicos tóxicos, contaminantes y corrosivos, debido a la elevada acidez y alcalinidad de estos efluentes; por lo que es conveniente tratarlas antes de su vertido al alcantarillado público.
- 2.- Los baños de revestimiento metálico, incluyen metales, tales como el cromo, cobre, níquel, zinc, cadmio, estaño; además de sodio, calcio, hierro, e hidrógeno; y aniones como : cianuros, nitratos, sulfatos, sulfitos, sulfonatos, carbonatos, fosfatos, fluoruros, cloruros, tartratos, y oxidrilos.
- 3.- Las aplicaciones de las reacciones redox para el tratamiento de las aguas residuales con contenidos de compuestos tóxicos es de mucha utilidad para la eliminación del cromo hexavalente y el cianuro.
- 4.- Los cianuros en dosis altas, son extremadamente venenosos, especialmente a pH ácido donde se encuentra en forma de ácido cianhídrico; es por eso, debido a su carácter muy tóxico, estos efluentes deben ser tratados antes de su vertido. Además el CN⁻ forma compuestos complejos con los metales e impide que se precipiten como hidróxidos.
- 5.- La destrucción de estos cianuros es la aplicación más importante en los procesos de oxidación.
6. La selección del agente reductor para el tratamiento de aguas residuales con contenido de cromo y derivados, dependerá de su disponibilidad local y la conveniencia desde el punto de vista económico.
7. El costo de equipos e instalación es del orden de S/. 2,175.9 (sin contar los insumos químicos utilizados ni servicios), para tratar 350 litros de aguas residuales por mes. Es decir, que sólo en infraestructura (equipos e instalación) se invierte un promedio de S/. 6.21 por litro de agua residual tratada.
8. El gasto en reactivos es del orden de S/. 55.50 mensuales, mientras que en infraestructura se invierte S/. 2175.9. Dada la cantidad baja de gastos en reactivos, las empresas pueden asumir estos gastos mensualmente.

9. Para que los empresarios artesanales tengan conciencia ambiental, el gobierno debe promover mecanismos de incentivos con la finalidad de que los empresarios puedan invertir en infraestructura y tratar sus residuos tóxicos.

Recomendaciones:

1.- Las plantas de este tipo de industrias deben utilizar campanas extractoras, con la finalidad de eliminar cualquier concentración de gases tóxicos. Para empresas artesanales se recomienda que las instalaciones sean en locales abiertos..

2.- Para el tratamiento de las aguas residuales que no contienen cianuros ni cromatos, éste se realiza mediante la neutralización con cal, especialmente para las aguas de enjuagues de piezas tratadas en baños ácidos.

3.- Si se emplea hipoclorito de sodio, que también en cierto grado es tóxico, se tiene que cuidar que no quede un exceso de la reacción, si no, es necesario tratar este oxidante con exceso de sulfato ferroso.

4.- Los oxidantes más utilizados en las industrias medianas a grandes para eliminar el Cianuro son Cloro(Cl_2) y Ozono(O_3). Por su facilidad de manipulación y costo utilizamos Hipoclorito de Sodio al 10% (Lejía). Se adapta mejor a nuestro medio y accesibilidad.

5.- Estar preparado para auditorias ambientales a futuro, implementando el módulo propuesto para el tratamientos de los efluentes o aguas contaminadas.

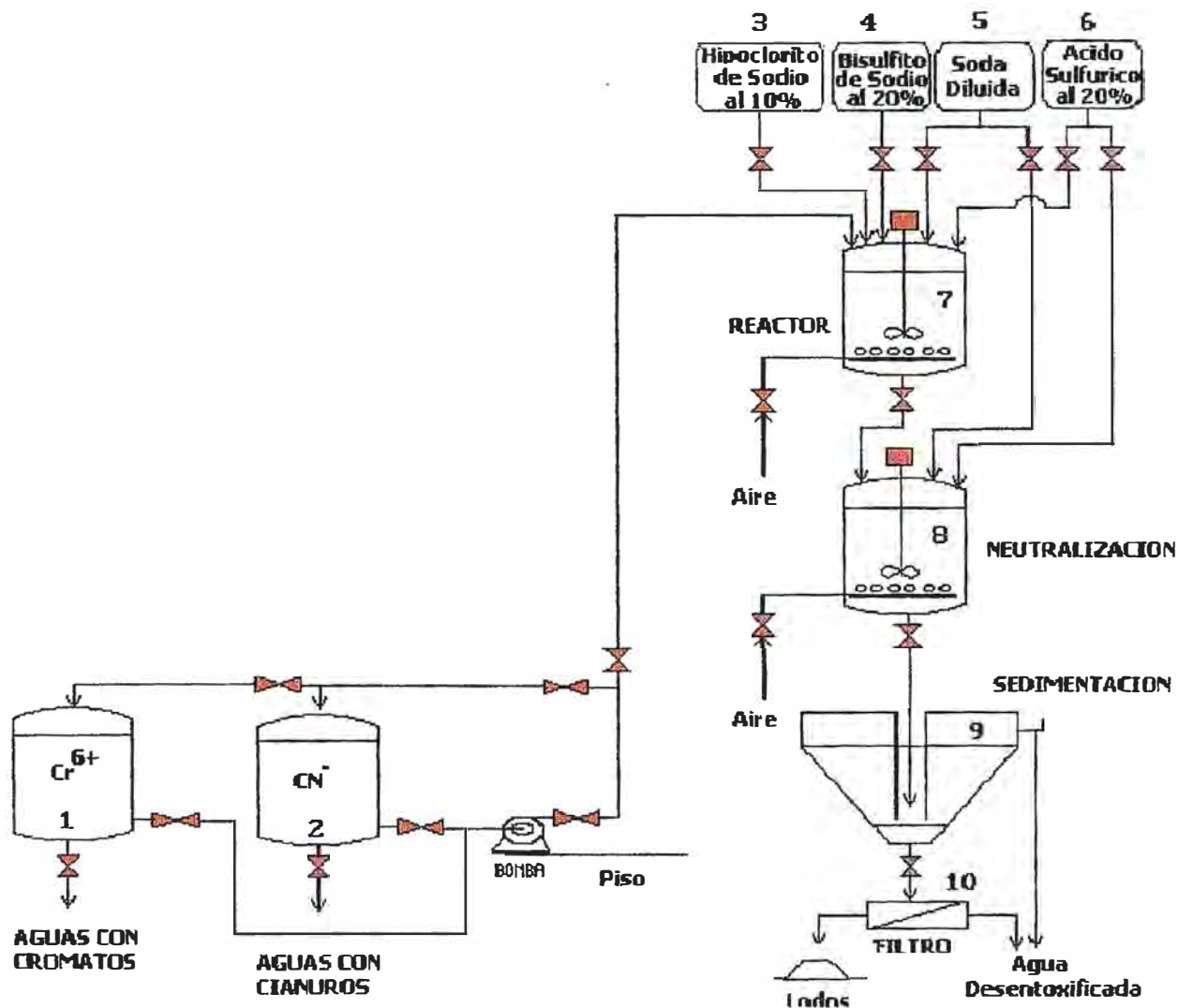
VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Blum, W. ; Hogaboom, G., "**Galvanotecnia y Galvanoplastia**". Ed..Continental México 1979.
2. Batstone, R., Smith, J. and Wilson, D., "**The Safe Disposal of Hazardous Wastes**". World Bank Technical Paper, Vol. II. Washington D.C., USA 1989.
4. Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental. CETESB. "**Tratamiento de Residuos Líquidos da Pequena Industria Galvanoplastias**" Sao Paulo. Brasil 1985.
5. "**Tratamiento Electrolítico de superficies**" Ing. Freddy Paredes Carrasco. Empresa Editora Mundoop S.A. Lima – Perú
6. "**Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas**". Segunda Edición. Claudio Mataix. 1982.
7. "**Termodinámica Química para ingenieros**". Richard E. Balzhiser; Michael R. Samuels; John D. Eliassen. Edit. Price Hall Hispanoamericana S.A. 1ra. Edición. 1972.
8. Bombas, Selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill. Keneth J.
10. Chemical Engineering, 84 (24); 91-92 (1977). Churchill, S.W.
11. "**Galvanotecnia**". Técnica y Procedimientos. J.Glayman
12. "**Análisis Químico Cuantitativo**" Teoría y Práctica Hobart H. Willard, N. Howell Furman; Clark E. Bricker

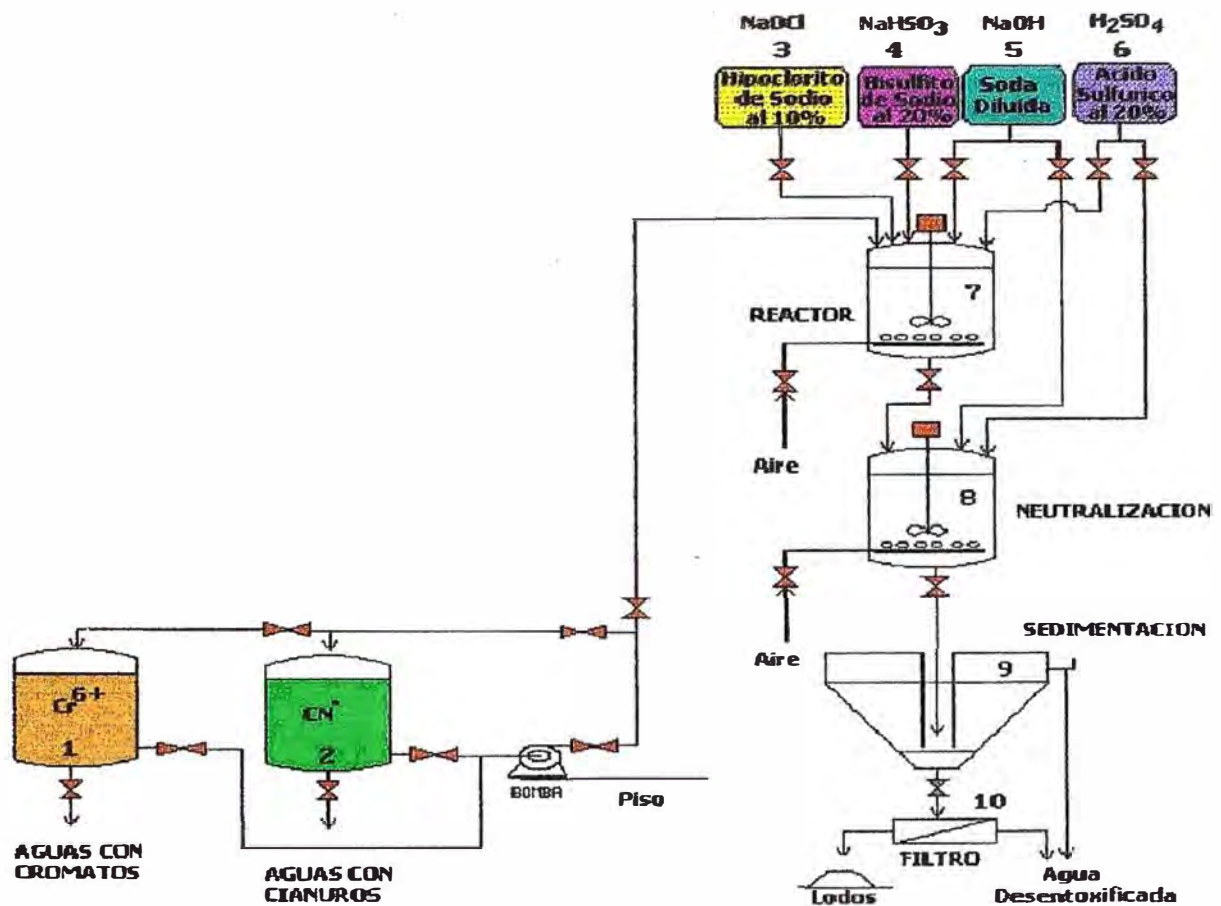
VIII. ANEXOS.

ANEXO 1 : Secuencia de operación del módulo propuesto para el tratamiento de las aguas residuales.

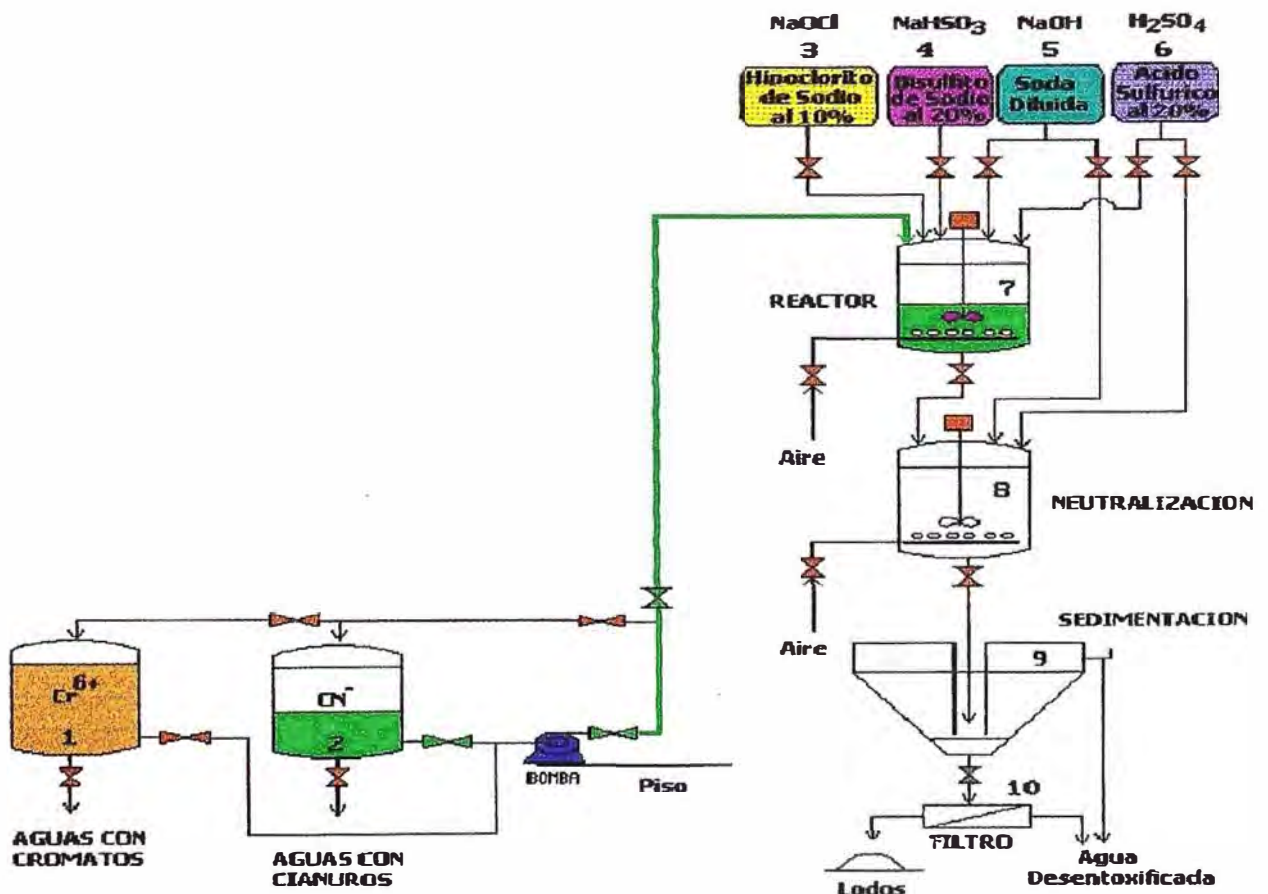
Paso 1 : Válvulas Cerradas



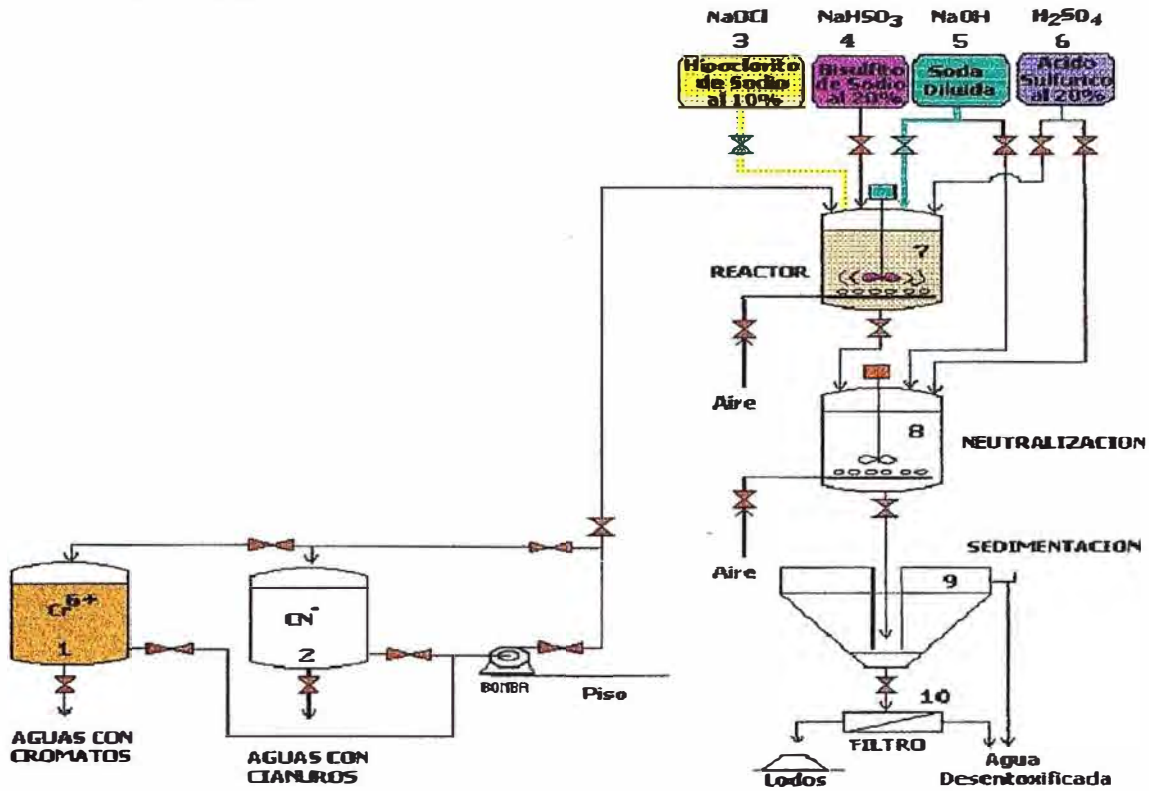
Paso 2 : Preparación de reactivos y recolección de los efluentes (Cr^{6+}) y (CN^-)



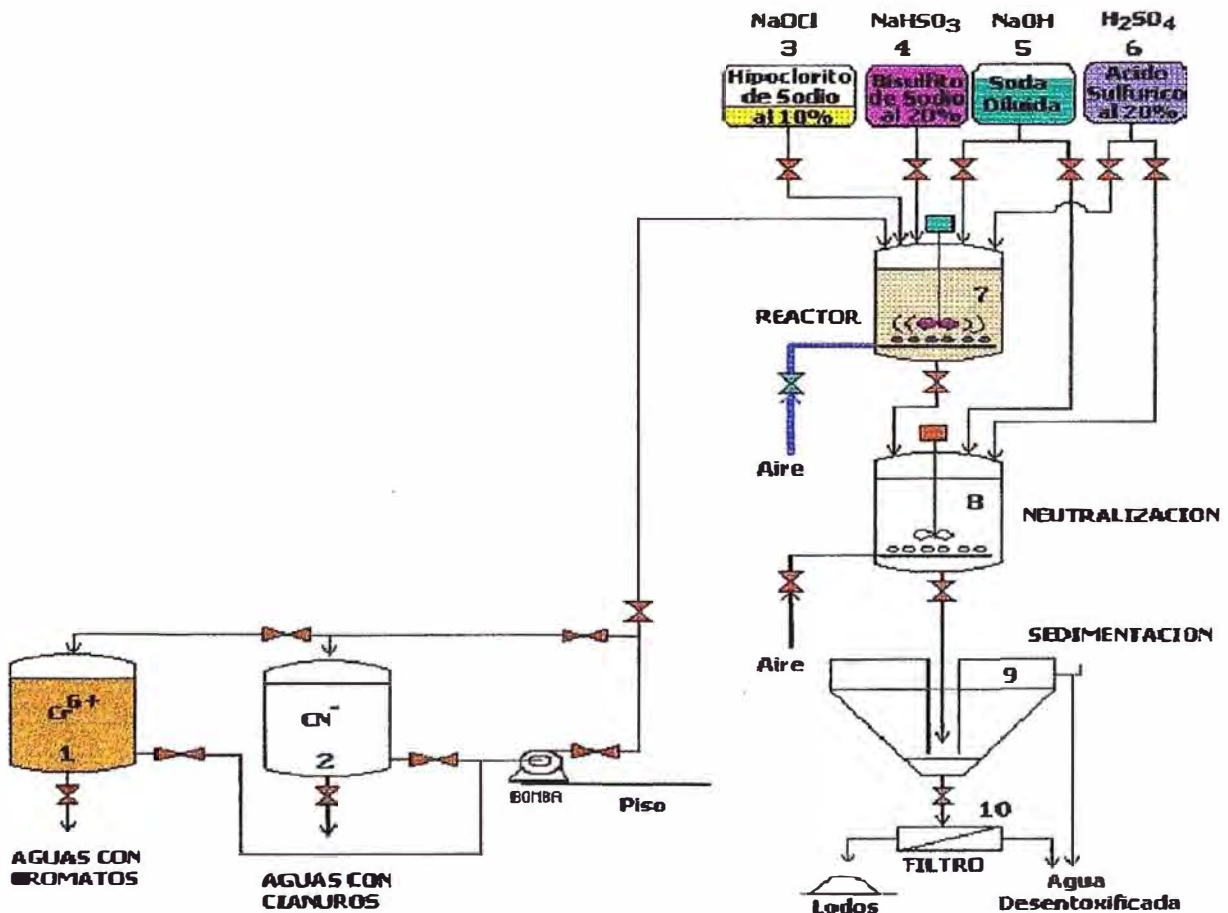
Paso 3 : Bombeo del efluente con contenido de cianuro al reactor.



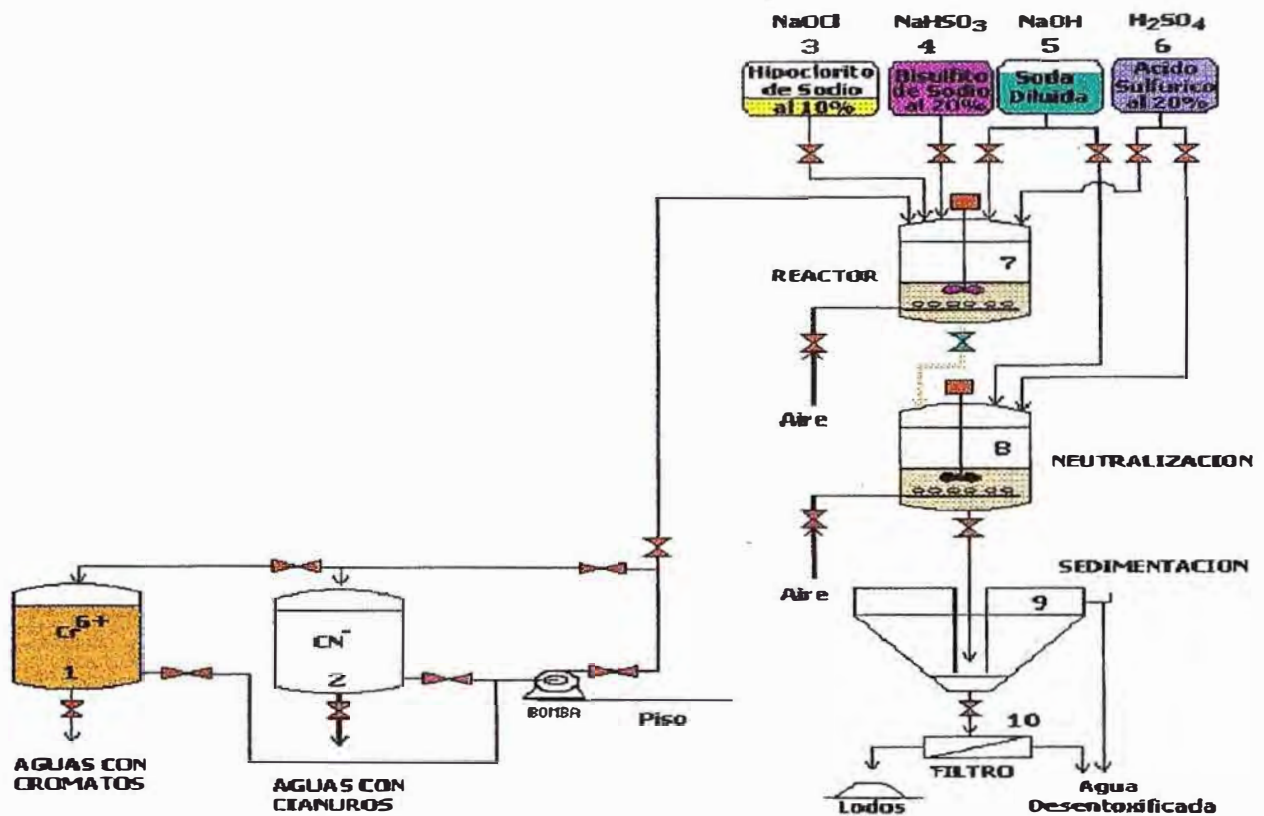
Paso 4 : Reacción del Cianuro con el Hipoclorito de sodio regulando el pH con soda Cáustica y agitación.



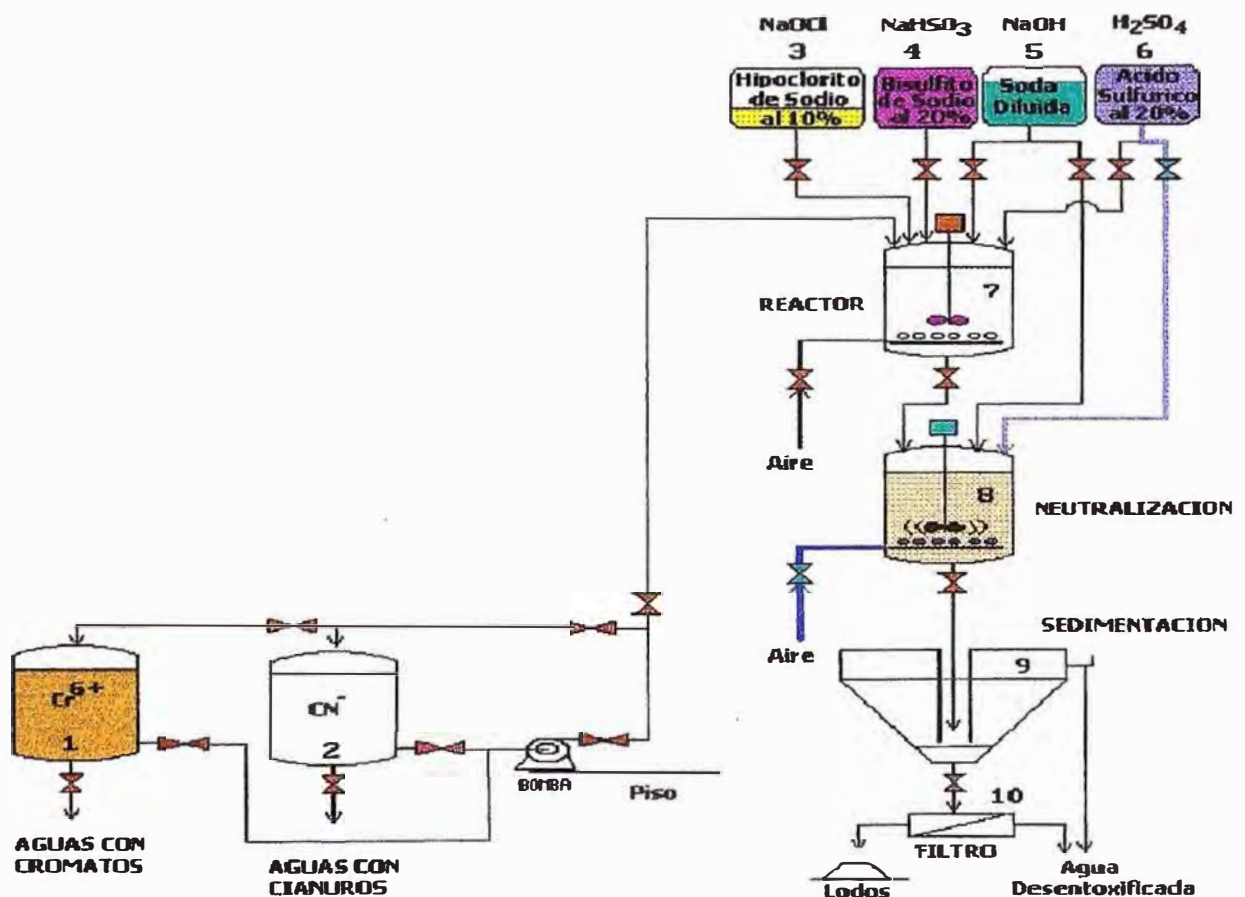
Paso 5 : Término de la adición del hipoclorito. Agitación y Aireación para eliminación total del cianuro.



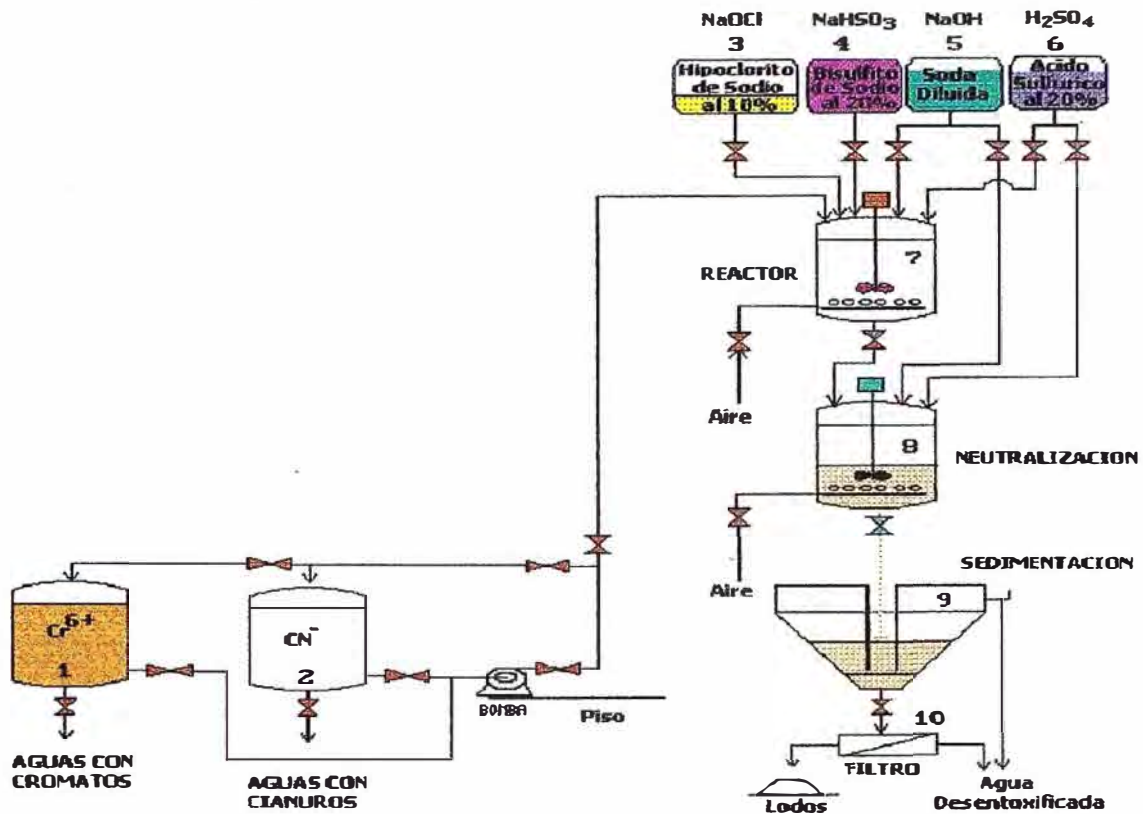
Paso 6 : Del Tanque 7 pasa al tanque 8. Neutralización.



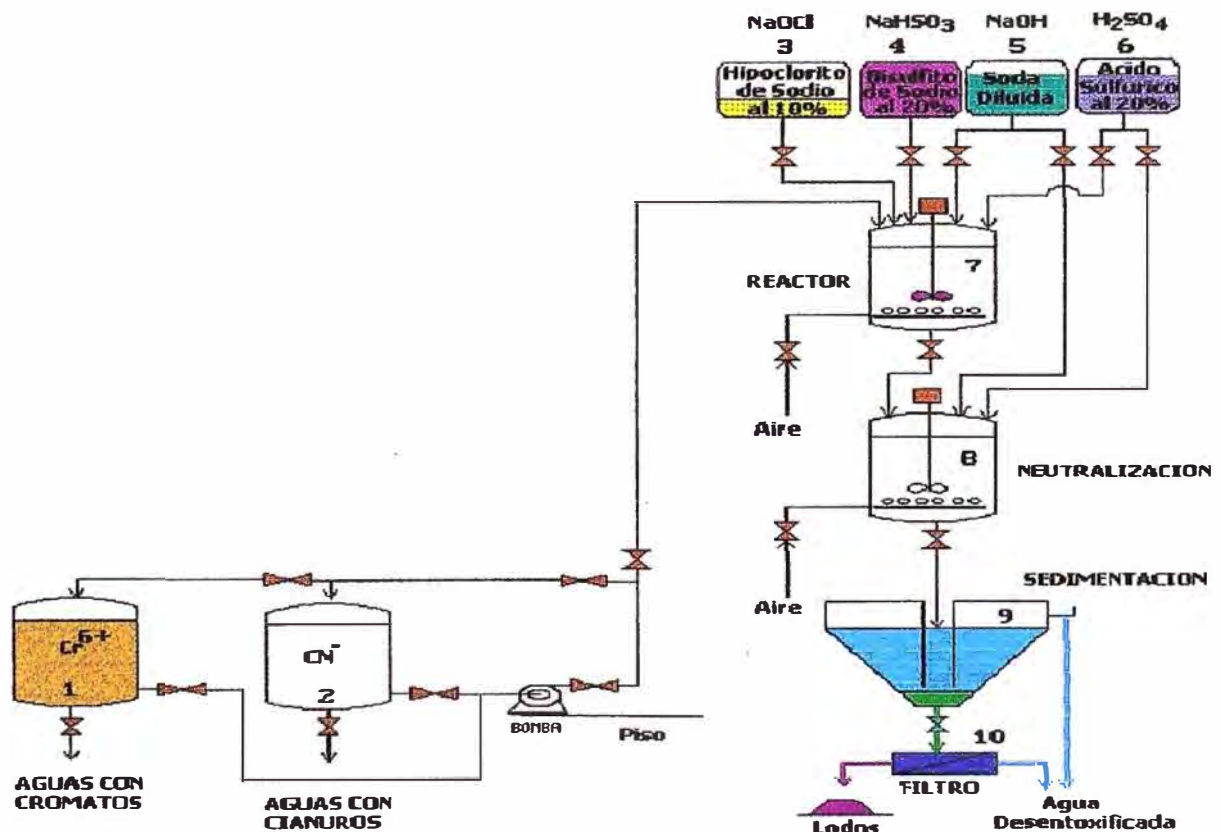
Paso 7 : Se neutraliza a pH entre 8 – 8.5 con ácido sulfúrico.



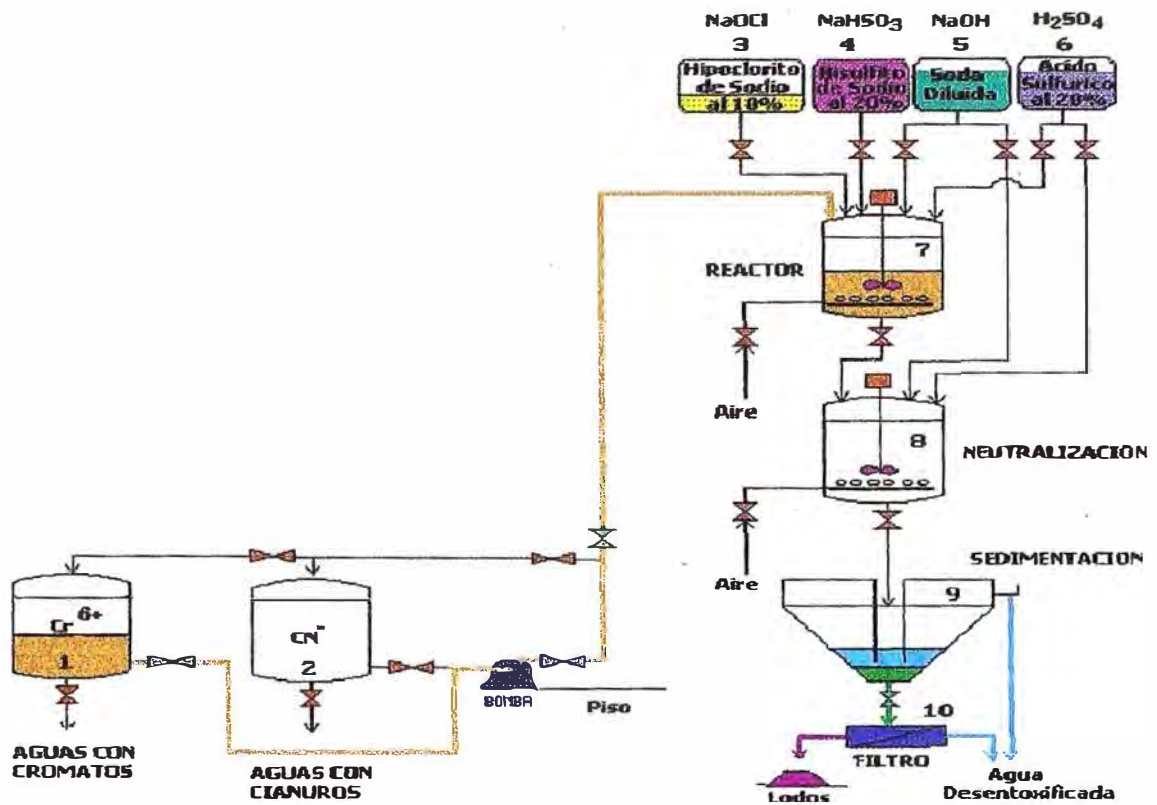
Paso 8 : Del tanque 8 pasa al tanque 9. Sedimentación.



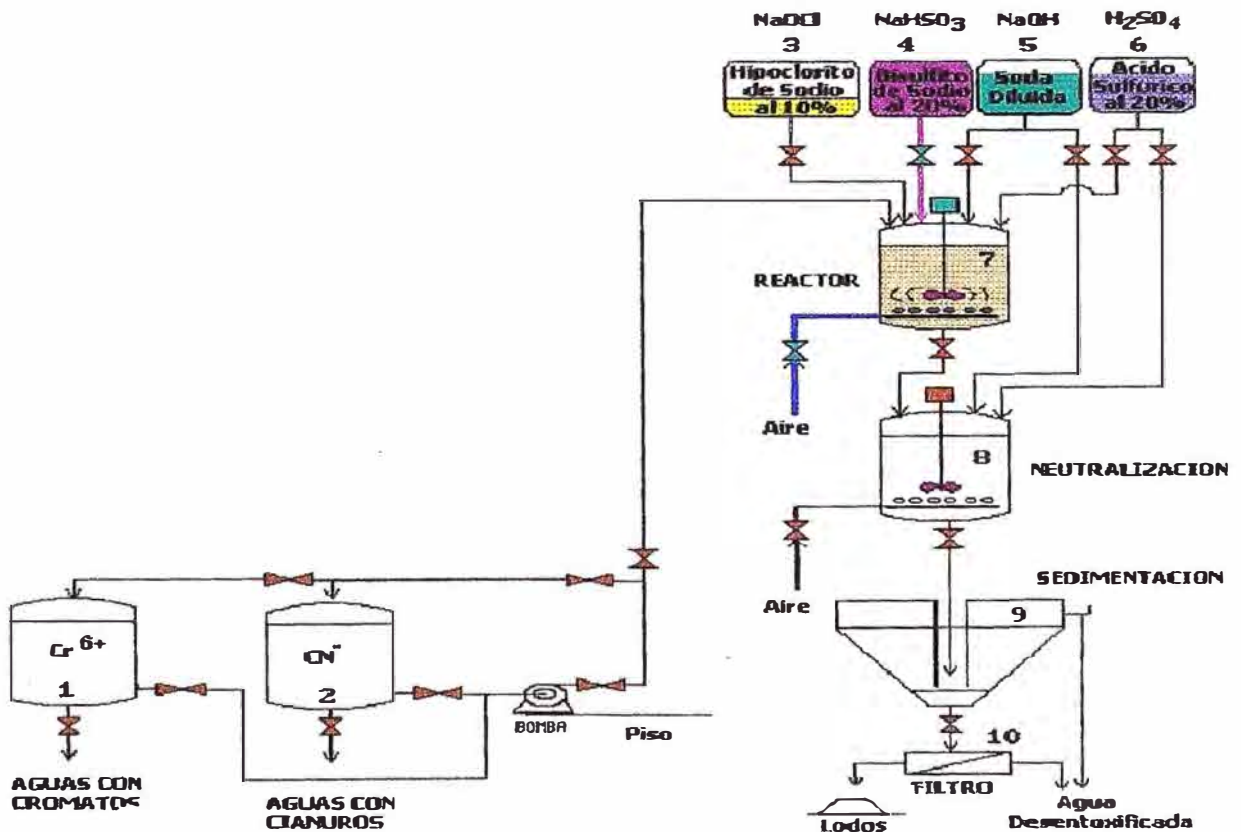
Paso 9 : Termino de la Neutralización. Empieza la Sedimentación con dos fases: Lodos y Claros.



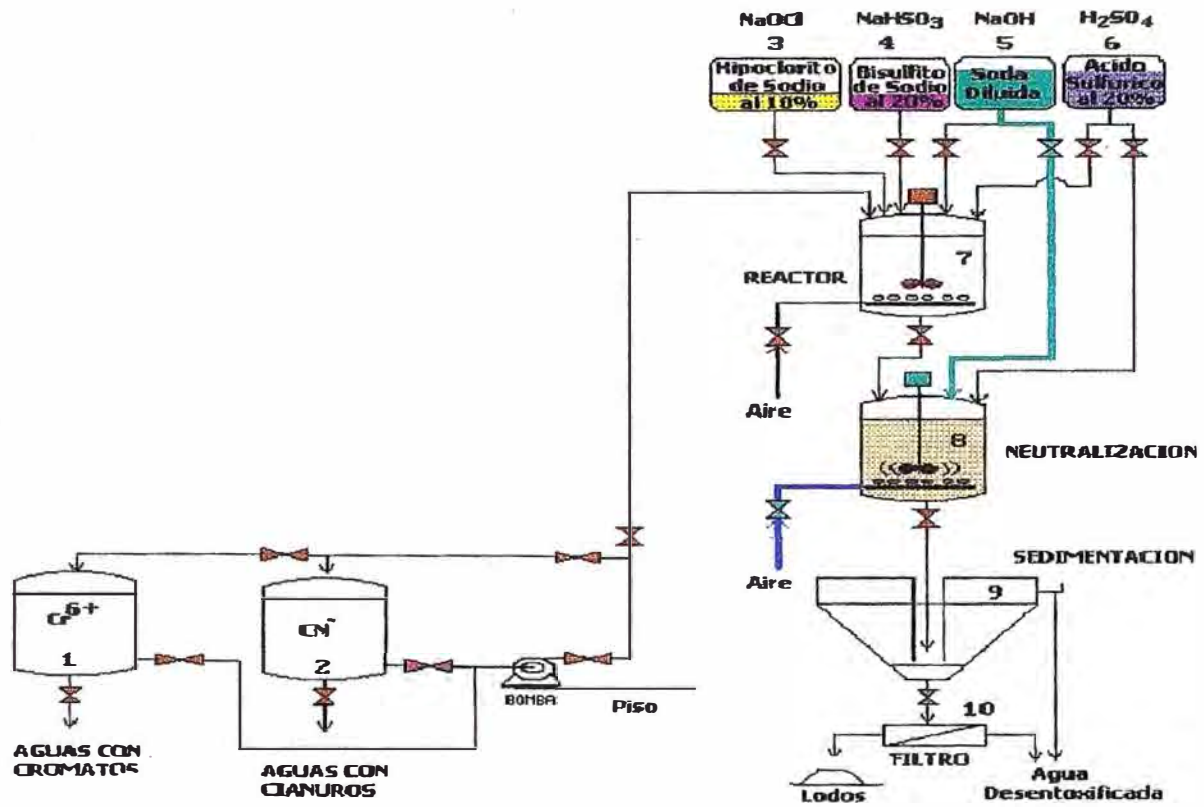
Paso 10 : Bombear el agua residual con cromato hacia el reactor.



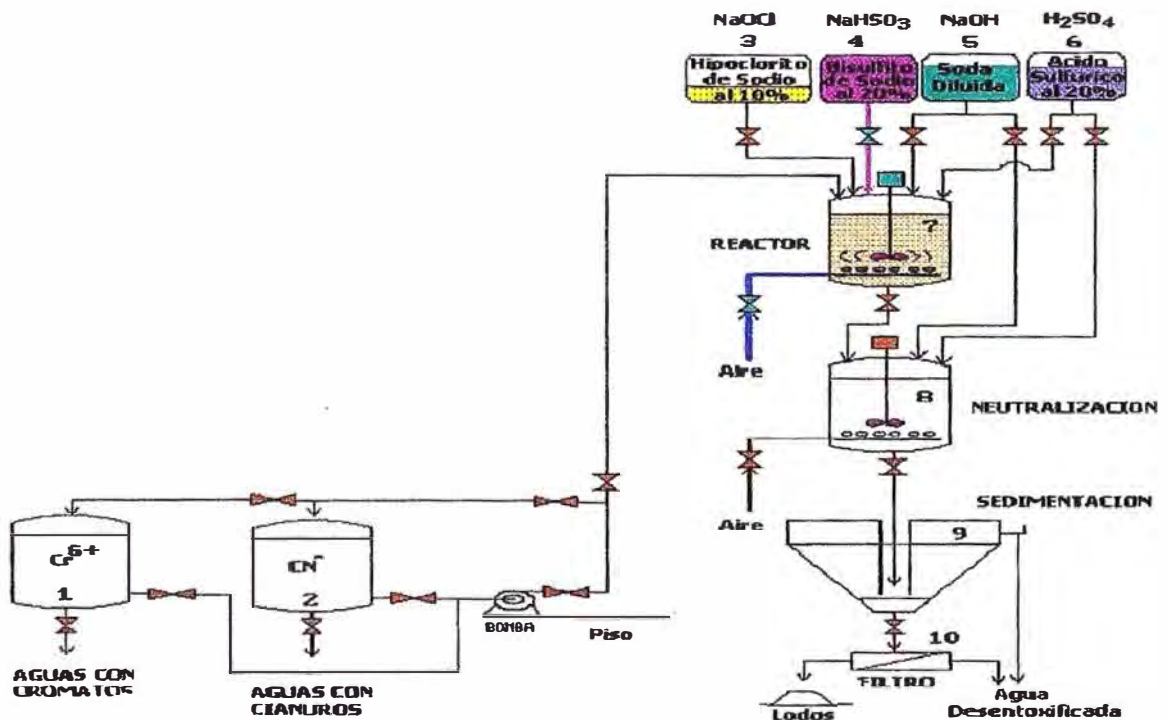
Paso 11 : Agregar el bisulfito de sodio. Agitación y Aireación a pH=2 – 2.5.



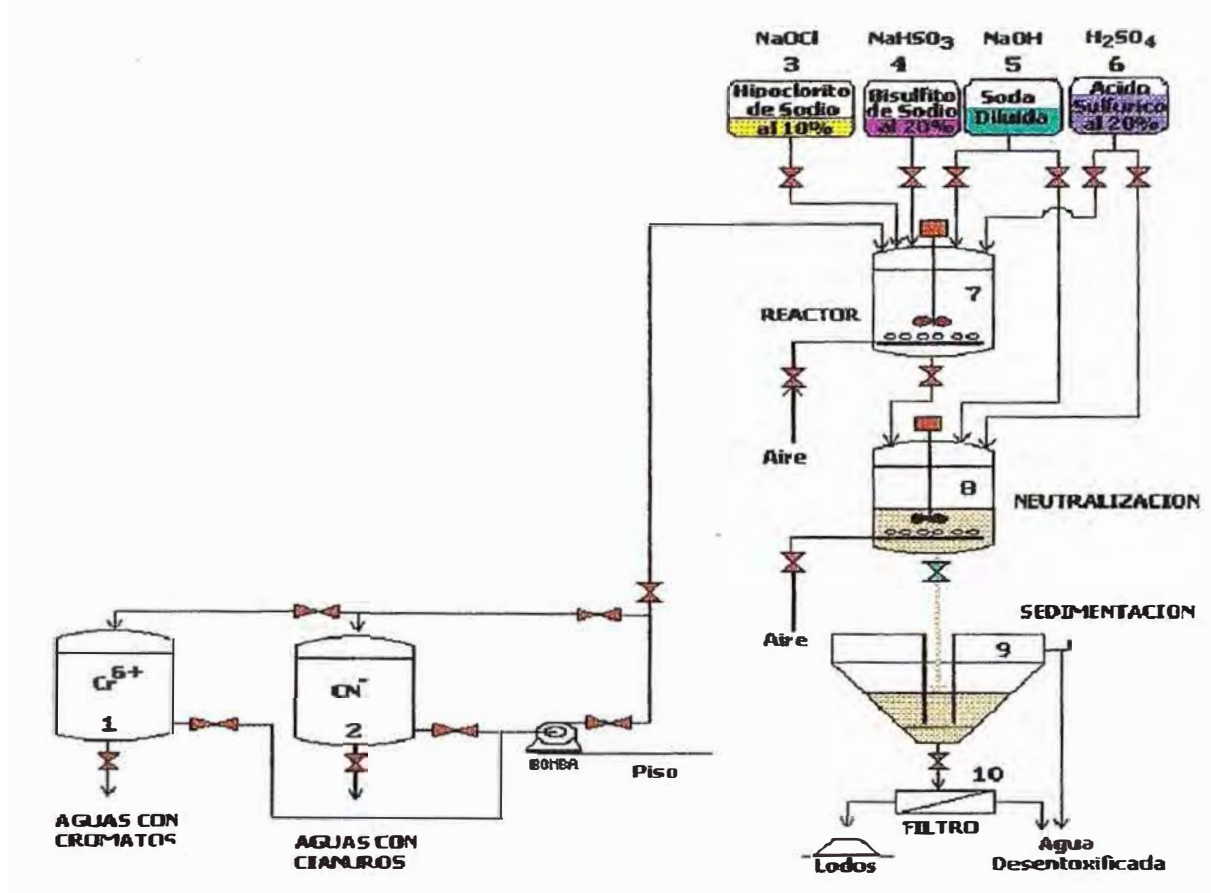
Paso 12 : Pasar a la etapa de Neutralización.



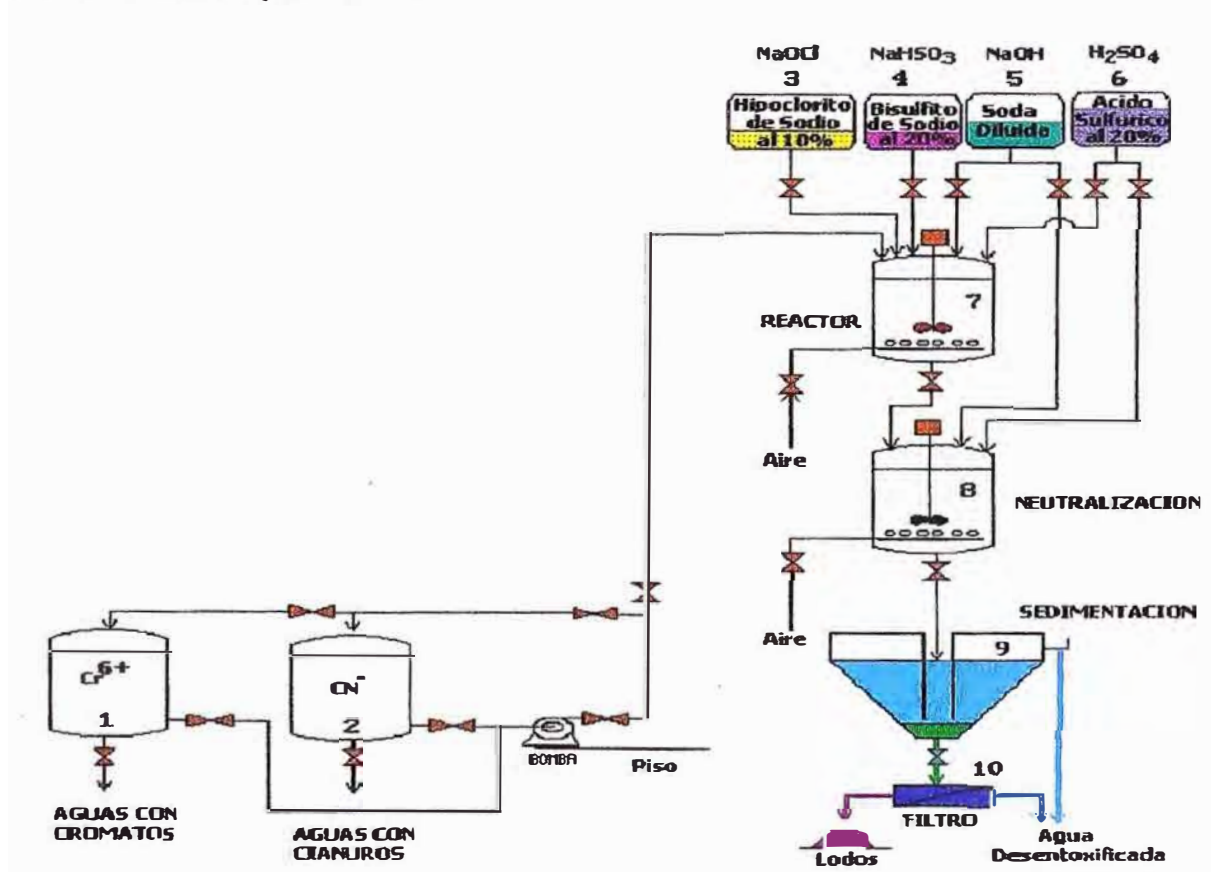
Paso 13 : Agitación y Aireación en la Neutralización.



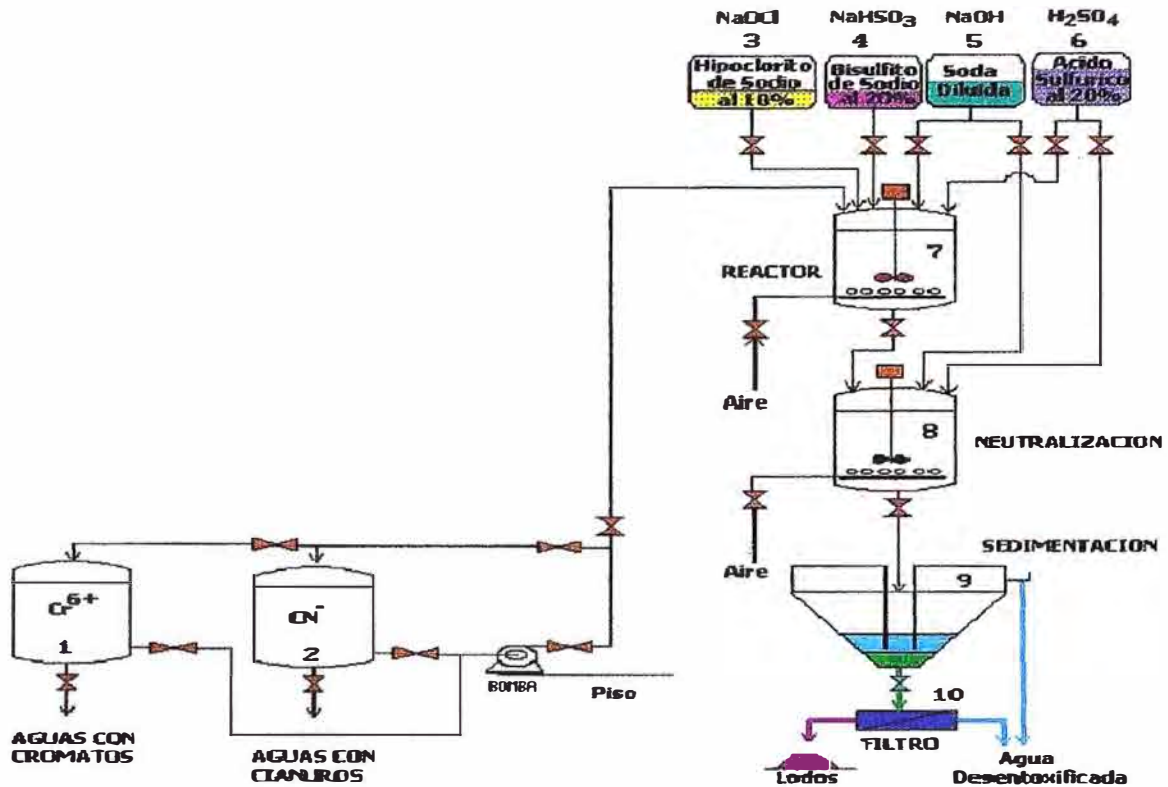
Paso 14 : Pasar a la etapa de Sedimentación.



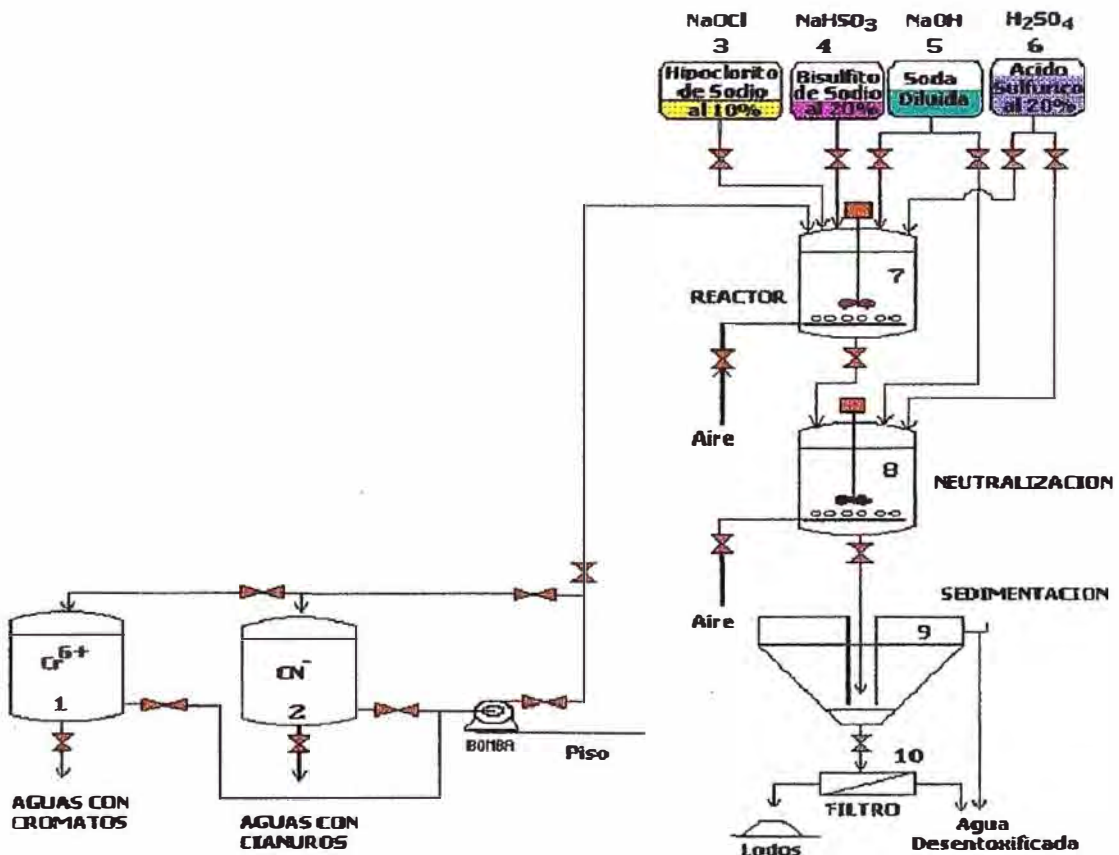
Paso 15 : Decantación y Filtración



Paso 16 : Decantación y Filtración hasta culminación.



Paso 17 : Término de la carga para descontaminar las aguas residuales.



X = 8.00 Litros de bisulfito de sodio al 40%

En conclusión:

Para neutralizar 1 Kg. de cromato, se necesitan 8 litros de bisulfito de sodio al 40%.

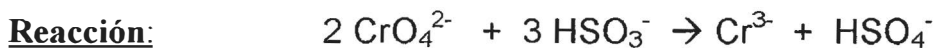
Para neutralizar 1 Kg. de cromato, se necesitan 16 litros de bisulfito de sodio al 20%.

c) Siguiendo el procedimiento anterior, ahora para neutralizar 4833.1 mg/L de $[\text{Cr}^{6+}]$, que equivale a 10781.53 mg/L de $[\text{CrO}_4^{2-}]$ (según anexo 3)

En 1 litro de solución :

$$W[\text{Cr}^{6+}] = 4833.1 \text{ mg} = 4.833 \text{ g}$$

$$W[\text{CrO}_4^{2-}] = 10781.53 \text{ mg} = 10.781 \text{ g}$$



$$\text{Relación molar } [\text{HSO}_3^-]/[\text{CrO}_4^{2-}] = 3.57$$

$$\text{Peso molecular del } [\text{HSO}_3^-] = 81$$

$$\text{Peso molecular del } [\text{CrO}_4^{2-}] = 116$$

$$\text{Moles de } [\text{CrO}_4^{2-}] = 10.781/116 = 0.093$$

De la relación molar

$$\text{Moles de } [\text{HSO}_3^-] = 3.57 \times 0.093 = 0.332$$

$$\text{Peso de } [\text{HSO}_3^-] = \text{moles } [\text{HSO}_3^-] \times \text{P.M.} = 0.332 \times 81$$

$$\text{Peso de } [\text{HSO}_3^-] = 26.87 \text{ g}$$

Se concluye que para neutralizar 4833.1 mg de cromo hexavalente $[\text{Cr}^{6+}]$ en un litro de solución, se necesitan 26.87 g de ión bisulfito $[\text{HSO}_3^-]$.

ANEXO 6: Cálculo para determinar la cantidad necesaria de bisulfito de sodio para convertir el cromo hexavalente a cromo trivalente.

a) Partimos de la dosis práctica : Para neutralizar 1 kg de cromato se necesitan 8 litros de bisulfito de sodio al 40%

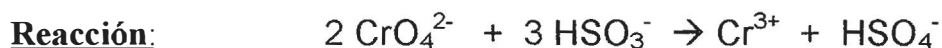
Datos :

Volumen Total 175 L.

Concentración $[\text{CrO}_4^{2-}]$ 5714.29 mg/L

Contenido de cromato : $5714.29 \times 175 = 1000\text{g}$. (1 kg de cromato $[\text{CrO}_4^{2-}]$)

b) Cálculo del volumen práctico de bisulfito de sodio al 40% para neutralizar 1kg de cromato.



Relación molar $[\text{HSO}_3^-]/[\text{CrO}_4^{2-}] = 3.57$ (Exceso para conversión total)

Peso molecular del $[\text{HSO}_3^-] = 81$

Peso molecular del $[\text{CrO}_4^{2-}] = 116$

Moles de $[\text{CrO}_4^{2-}] = 1000/116 = 8.62$

De la relación molar :

Moles de $[\text{HSO}_3^-] = 3.57 \times 8.62 = 30.77$

Peso de $[\text{HSO}_3^-] = \text{moles } [\text{HSO}_3^-] \times \text{P.M.} = 30.77 \times 81$

Peso de $[\text{HSO}_3^-] = 2492.308 \text{ g}$

Sabemos que del anexo 4 que 1 litro de bisulfito de sodio al 40%, contiene 311.54 g de ión bisulfito $[\text{HSO}_3^-]$

Entonces, por regla de 3 simple, calculamos el volumen necesario para de bisulfito de sodio al 40% que se tienen que añadir.

$$\begin{array}{lcl} 1 \text{ litro de bisulfito de sodio } 40\% & \rightarrow & 311.54 \text{ g. de } [\text{HSO}_3^-] \\ \text{X litros} & \rightarrow & 2492.308 \text{ g. de } [\text{HSO}_3^-] \end{array}$$

ANEXO 5: Cálculo para determinar la cantidad de bisulfito [HSO₃⁻] en un litro de solución al 20%.

a) Asumimos solución diluida y densidad de la solución la unidad.

Entonces :

En 1 Litro de bisulfito de sodio al 20% contiene 200 g de NaHSO₃

$$w [\text{NaHSO}_3] = 200 \text{ g}$$

$$\text{PM} [\text{NaHSO}_3] = 104$$

$$\text{Moles} [\text{NaHSO}_3] = 200/104 = 1.923$$

b) De la disociación iónica, calculamos los pesos equivalentes :



$$\text{Peq} [\text{NaHSO}_3] = 104.0/1 = 104.0$$

$$\text{Peq} [\text{Na}^+] = 23/1 = 23.0$$

$$\text{Peq} [\text{HSO}_3^-] = 81/1 = 81.0$$

Se cumple :

$$\# \text{ Eq-gr} [\text{NaHSO}_3] = \# \text{ Eq-gr} [\text{Na}^+] = \# \text{ Eq-gr} [\text{HSO}_3^-]$$

Entonces :

$$\frac{W[\text{Na}^+]}{\text{Peq.}[\text{Na}^+]} = \frac{W[\text{HSO}_3^-]}{\text{Peq.} [\text{HSO}_3^-]} \rightarrow \frac{W[\text{Na}^+]}{23.0} = \frac{W[\text{HSO}_3^-]}{81.0} \quad \dots (1)$$

$$\text{También : } W[\text{Na}^+] + W[\text{HSO}_3^-] = 200 \quad \dots(2)$$

Resolviendo (1) y (2), tenemos:

$$W[\text{Na}^+] = 44.231 \text{ g} \quad \text{y} \quad W[\text{HSO}_3^-] = 155.77 \text{ g}$$

En conclusión:

1 litro de bisulfito de sodio al 20%, contiene 155.77 g de ión bisulfito HSO₃⁻

1 litro de bisulfito de sodio al 40%, contiene 311.54 g de ión bisulfito HSO₃⁻

ANEXO 4: Cálculo para determinar la concentración de cromato $[\text{CrO}_4^{2-}]$, a partir de la concentración de cromo hexavalente $[\text{Cr}^{6+}]$

a) Datos :

Concentración de cromo hexavalente $[\text{Cr}^{6+}] = 4833.1 \text{ mg/L}$.

Para 1 litro de agua residual : $W[\text{Cr}^{6+}] = 4833.1 \text{ mg}$ (1)

b) Sabemos :

$$\# \text{ Eq-gr } [\text{CrO}_4^{2-}] = \# \text{ Eq-gr } [\text{Cr}^{6+}] = \# \text{ Eq-gr } [\text{CrO}_4^{2-}]$$

$$\frac{W[\text{CrO}_4^{2-}]}{\text{Peq.}[\text{CrO}_4^{2-}]} = \frac{W[\text{Cr}^{6+}]}{\text{Peq.}[\text{Cr}^{6+}]} \quad \dots (2)$$

$$\text{Peq.}[\text{CrO}_4^{2-}] = \frac{W[\text{CrO}_4^{2-}]}{W[\text{Cr}^{6+}]} \cdot \text{Peq.}[\text{Cr}^{6+}]$$

También :

$$\text{Peq.}[\text{CrO}_4^{2-}] = \text{PM } [\text{CrO}_4^{2-}]/\text{carga ion} \quad \text{Peq.}[\text{Cr}^{6+}] = \text{PA}[\text{Cr}^{6+}]/\text{carga ion}$$

$$\text{Peq.}[\text{CrO}_4^{2-}] = 116/2 = 58 \quad \dots (3)$$

$$\text{Peq.}[\text{Cr}^{6+}] = 52/2 = 26 \quad \dots (4)$$

Reemplazando (1), (3) y (4) en (2), tenemos:

$$W[\text{CrO}_4^{2-}] = 10781.50 \text{ mg/L}$$

Se concluye que 10781.50 mg. de cromato $[\text{CrO}_4^{2-}]$, contiene 4833.1 mg de cromo hexavalente $[\text{Cr}^{6+}]$ en un litro de solución contaminante.

ANEXO 3: Cálculo para determinar el contenido de hipoclorito [OCl⁻] en 1 litro de hipoclorito de sodio al 10%.

a) Asumimos solución diluida y densidad de la solución la unidad.

Entonces :

En 1 Litro de hipoclorito de sodio al 10% contiene 100 grs de NaOCl

$$W [\text{NaOCl}] = 100 \text{ g}$$

$$\text{PM} [\text{NaOCl}] = 74.5$$

$$\text{Moles} [\text{NaOCl}] = 100/74.5 = 1.342$$

b) De la disociación iónica, calculamos los pesos equivalentes :



$$\text{Peq} [\text{NaOCl}] = 74.5/1 = 74.5$$

$$\text{Peq} [\text{Na}^+] = 23/1 = 23.0$$

$$\text{Peq} [\text{OCl}^-] = 51.5/1 = 51.5$$

Se cumple :

$$\# \text{ Eq-gr} [\text{NaOCl}] = \# \text{ Eq-gr} [\text{Na}^+] = \# \text{ Eq-gr} [\text{OCl}^-]$$

Entonces :

$$\frac{W[\text{Na}^+]}{\text{Peq}[\text{Na}^+]} = \frac{W[\text{OCl}^-]}{\text{Peq}[\text{OCl}^-]} \rightarrow \frac{W[\text{Na}^+]}{23.0} = \frac{W[\text{OCl}^-]}{51.5} \quad \dots (1)$$

$$\text{También : } W[\text{Na}^+] + W[\text{OCl}^-] = 100 \quad \dots(2)$$

Resolviendo (1) y (2), tenemos:

$$W[\text{Na}^+] = 30.872 \text{ g} \quad \text{y} \quad W[\text{ClO}^-] = 69.128 \text{ g}$$

En conclusión, 1 litro de hipoclorito de sodio al 10%, contiene 69.128 g de ión hipoclorito [OCl⁻]

Relación molar $[\text{ClO}^-]/[\text{CN}^-]$	= 1.4 (Exceso para conversión total)
Peso molecular del $[\text{CN}^-]$	= 26
Peso molecular del $[\text{ClO}^-]$	= 51.5
Peso molecular del $[\text{CNO}^-]$	= 42
Moles de $[\text{CN}^-]$	= $0.940/26 = 0.0362$
Moles de $[\text{CNO}^-]$	= 0.0362 (por relación estequiométrica)
De la relación molar :	
Moles de $[\text{ClO}^-]$	= $1.4 \times 0.0362 = 0.0506$
Peso de $[\text{ClO}^-]$	= moles $[\text{ClO}^-]$ x Peso Molecular = 0.0362×51.5
Peso de $[\text{ClO}^-]$	= 2.6067 g

Se concluye que para neutralizar 940 mg de cianuro $[\text{CN}^-]$ en un litro de solución, se necesitan en la 1ra. reacción 2.6067 g de hipoclorito $[\text{ClO}^-]$.

Además se forman 0.0362 moles de cianato $[\text{CNO}^-]$, que equivale a :

$$w[\text{CNO}^-] = \text{P.M.} \times \text{\#moles}$$

$$w[\text{CNO}^-] = 42 \times 0.0362 = 1.518 \text{ g}$$



Relación molar $[\text{ClO}^-]/[\text{CNO}^-]$	= 3.0 (Exceso para conversión total)
Moles de $[\text{CNO}^-]$	= 0.0362 (de la 1ra. etapa)
Peso molecular del $[\text{ClO}^-]$	= 51.5
De la relación molar	
Moles de $[\text{ClO}^-]$	= $3.0 \times 0.0362 = 0.108$
Peso de $[\text{ClO}^-]$	= moles $[\text{ClO}^-]$ x Peso Molecular = 0.108×51.5
Peso de $[\text{ClO}^-]$	= 5.59 g

Se concluye que para neutralizar 940 mg de cianuro $[\text{CN}^-]$ en un litro de solución, se necesitan en la 2da. reacción 5.59 g de ión hipoclorito $[\text{ClO}^-]$.

$$\text{Moles de } [\text{ClO}^-] = 3 \times 38.462 = 115.385$$

$$\text{Peso de } [\text{ClO}^-] = \text{moles}[\text{ClO}^-] \times \text{PesoMolecular} = 115.385 \times 51.5$$

$$\text{Peso de } [\text{ClO}^-] = 5942.31 \text{ g}$$

Igual que de la relación anterior:

$$\frac{W[\text{Cl}^+]}{35.1} = \frac{W[\text{O}^-]}{16} \quad \dots (1)$$

$$\text{También : } W[\text{Cl}^+] + W[\text{O}^-] = 5942.31 \quad \dots(2)$$

Resolviendo (1) y (2), tenemos:

$$W[\text{Cl}^+] = 4096.16 \text{ g y } W[\text{O}^-] = 1846.16 \text{ g}$$

Por regla de 3 simple :

$$\begin{array}{l} 1 \text{ litro de hipoclorito de sodio } 47^\circ\text{Be} \rightarrow 300 \text{ g Cloro} \\ X \text{ litros} \rightarrow 4096.16 \text{ g Cloro} \end{array}$$

$$\mathbf{X = 13.65 \text{ Litros hipoclorito de sodio } 47^\circ\text{Be.}}$$

d) Volumen total práctico de hipoclorito de sodio de 47°Be para neutralizar 1 kg de cianuro :

$$\mathbf{V_{\text{total}} = 6.37 + 13.65 = 20.02 \text{ Litros.}}$$

e) Siguiendo el procedimientos anteriores, para neutralizar 940 mg/L de cianuro en la primera etapa es:



$$\begin{aligned}
 \text{Peq.}[\text{ClO}^-] &= \text{PM}(\text{ClO}^-)/\text{carga iónica} &= 51.5/1 = 51.5 \\
 \text{Peq.}[\text{Cl}] &= \text{PA}(\text{Cl}^+)/\text{valencia} &= 35.5/1 = 35.5 \\
 \text{Peq.}[\text{O}^-] &= \text{PA}(\text{O}^-)/\text{valencia} &= 16/1 = 16.0
 \end{aligned}$$

Entonces :

$$\frac{W[\text{Cl}^+]}{\text{Peq.}[\text{Cl}^+]} = \frac{W[\text{O}^-]}{\text{Peq.}[\text{O}^-]} \rightarrow \frac{W[\text{Cl}^+]}{35.1} = \frac{W[\text{O}^-]}{16} \dots (1)$$

$$\text{También : } W[\text{Cl}^+] + W[\text{O}^-] = 2773.08 \dots (2)$$

Resolviendo (1) y (2), tenemos:

$$W[\text{Cl}^+] = 1911.54 \text{ g} \quad \text{y} \quad W[\text{O}^-] = 861.54 \text{ g}$$

Por la regla de 3 simple :

$$\begin{array}{lcl}
 1 \text{ litro de hipoclorito de sodio } 47^\circ\text{Be} & \rightarrow & 300 \text{ g de Cloro } (\text{Cl}^+) \\
 X \text{ litros} & & 1911.54 \text{ g de Cloro } (\text{Cl}^+)
 \end{array}$$

$$\mathbf{X = 6.372 \text{ Litros de hipoclorito de sodio } 47^\circ\text{Be.}}$$

c) Cálculo del volumen de hipoclorito de sodio de 47°Be , para la segunda etapa de reacción.



Relación molar $[\text{ClO}^-]/[\text{CNO}^-] = 3$ (Exceso para asegurar conversión total)

Peso molecular del $[\text{CNO}^-] = 42$

Peso molecular del $[\text{ClO}^-] = 51.5$

Moles de $[\text{CNO}^-] = 38.462$ (formados en la 1ra etapa de reacción)

De la relación molar

ANEXO 2 : Cálculo para determinar la cantidad de hipoclorito [OCI] en gramos que se necesitan para convertir 940 mg/L de cianuro a cianato.

a) Partimos de la dosis práctica : Para neutralizar 1 kg de cianuro se necesita 20 litros de hipoclorito de sodio 47°Be, teniendo en cuenta que 1 litro equivale 150 grs. de Cl₂ (300 grs. de cloro monoatómico)

Datos :

Volumen total	175 L
Concentración	5714.29 mg/L
Contenido de cianuro	5714.29 x 175 = 1000g (1 Kg de cianuro CN ⁻)

b) Cálculo del volumen teórico de hipoclorito de sodio de 47°Be, para la primera etapa de reacción.



$$\text{Relación molar } [\text{ClO}^-]/[\text{CN}^-] = 1.4 \text{ (Exceso para conversión total)}$$

$$\text{Peso molecular del } [\text{CN}^-] = 26$$

$$\text{Peso molecular del } [\text{ClO}^-] = 51.5$$

$$\text{Moles de } [\text{CN}^-] = 1000/26 = 38.462$$

De la relación molar

$$\text{Moles de } [\text{ClO}^-] = 1.4 \times 38.462 = 53.846$$

$$\text{Peso de } [\text{ClO}^-] = \text{moles } [\text{ClO}^-] \times \text{Peso Molecular} = 53.846 \times 51.5$$

$$\text{Peso de } [\text{ClO}^-] = 2773.08 \text{ g}$$

Sabemos que se igualan los números de equivalentes gramos:

$$\# \text{ Eq-gr } [\text{ClO}^-] = \# \text{ Eq-gr } [\text{Cl}] = \# \text{ Eq-gr } [\text{O}]$$

Cálculo de los pesos equivalentes:

ANEXO 7 : Pasos para calcular la altura útil del sistema propuesto:

Paso1.- Obtención de datos operativos de sistema propuesto:

Altura (Z)

Densidad del fluido (ρ)

Viscosidad del fluido (μ)

Longitud de tubería (L)

Rugosidad de la tubería (ϵ)

Los valores “k” de los accesorios (válvulas, codos)

Paso2.- Aplicar el balance de energía mecánica en los planos 1 y 2 cuya ecuación es (ver Fig.1)

$$- H_{r-ext} - H_{us} - \Delta \left(\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + Z \right) = 0 \quad \dots\dots (I)$$

Donde :

H_{r-ext} : Pérdida de carga exteriores debido a la tuberías y accesorios.

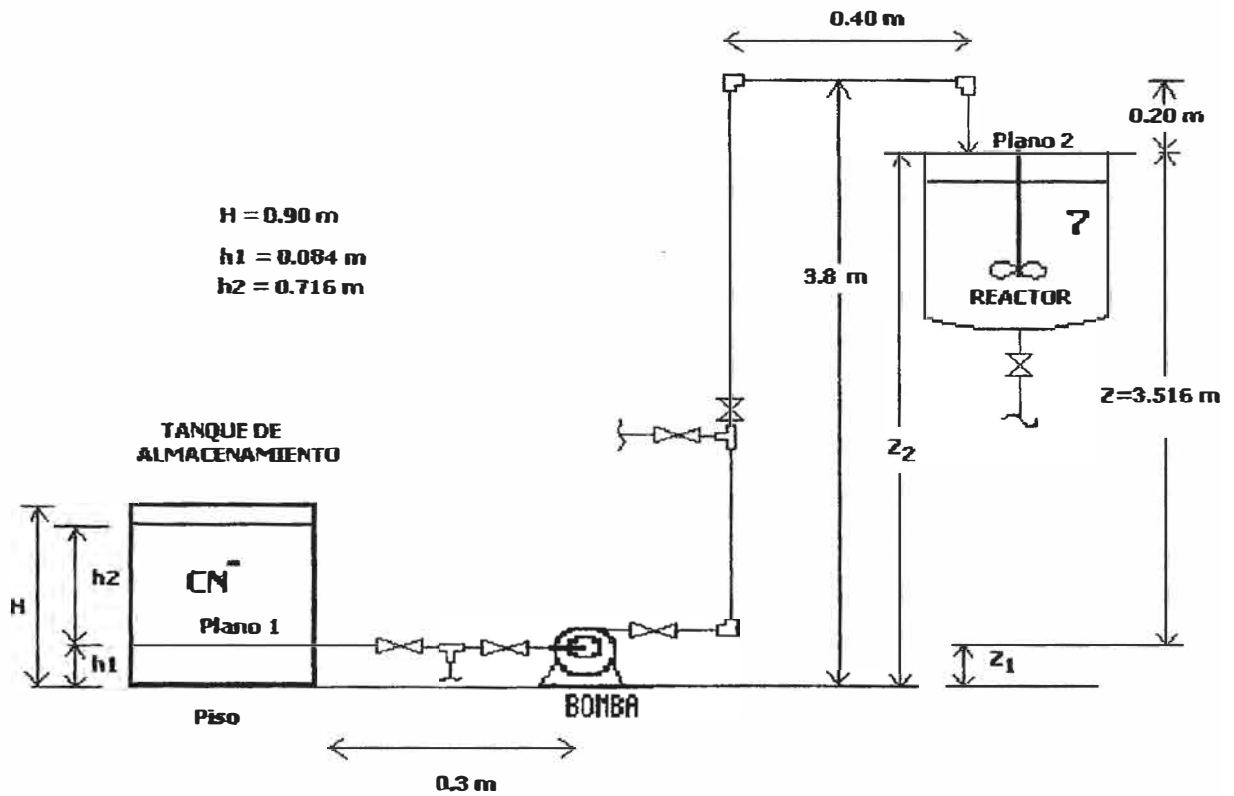
H_{us} : Altura útil del sistema propuesto.

$\Delta \left(\frac{P}{\rho \cdot g} \right)$: Diferencia de presiones ($P_2 - P_1$) dividido entre la densidad del fluido (ρ)

$\Delta(Z)$ Diferencia de alturas ($Z_2 - Z_1$)

$\Delta \left(\frac{v^2}{2g} \right)$: Diferencia de velocidades ($v_2^2 - v_1^2$) dividido entre la constante ($2g$)

Fig. 1 : Balance de Energía Mecánica entre los planos 1 y 2



Paso3.- Asumimos un caudal Q (l/seg) y un diámetro de tubería (d).

Con esto, calculamos $v_2 = 4Q/(\pi \cdot d^2)$

Asumiendo $v_1=0$, $P_2= P_{atm}$ y $P_1 = \rho \cdot g \cdot h_2$,

calculamos el termino : $\Delta(P/\rho \cdot g + Z + v^2/2g)$ de la ec. (I)

Paso4.- Calcular el término H_{r-ext} , que son las pérdidas carga de la tubería + accesorios del sistema propuesto.

$$H_{r-ext} = H_{r-tub.} + H_{r-acces.} \quad \dots\dots (II)$$

Donde :

$$H_{r-tub.} = k_{tub.} \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad \dots\dots (III)$$

$$k_{\text{tub.}} = 4 \cdot f \cdot \left(\frac{L}{d} \right)$$

y :

$$H_{r \text{ acces.}} = k_{\text{acces.}} \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad \dots\dots (IV)$$

Pérdida de carga por tubería (Hr tub.):

Datos :

Diámetro (d) de tubería, velocidad ($v_2 = v$), gravedad y longitud de tubería.

Para calcular el factor de fanning (f), utilizamos la correlación de Churchill :

$$f = 2 \cdot \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right) + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12}$$

$$A = \left[2.457 \cdot \text{Ln} \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)} \right) \right]^{16} \quad B = \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right) \right]^6$$

Donde:

Re : Número de Reynolds.

$\text{Re} = (d \cdot v \cdot \rho) / \mu$ (d=diámetro; v=velocidad; ρ =densidd; μ =viscosidad)

ε : Rugosidad de la tubería.

Reemplazando datos en (III) hallamos $H_{r \text{ tub.}}$.

Pérdidas por accesorios($H_{r \text{ acces.}}$):

Para los accesorios, en nuestro sistema tenemos codos y válvula, cuyos valores “ $k_{\text{acces.}}$ ” están tabulados según el siguiente cuadro:

Codo 45°	k_{acces}	Tipo de Válvula		$k_{\text{acces.}}$
Normal	0.35	Compuerta	100% abierta	0.2
Radio largo	0.2		75% abierta	0.9
Codo 90°			50% abierta	4.5
Normal	0.75		25% abierta	24.0
Radio largo	0.45	Diafragma	100% abierta	2.3
Unión “T”			75% abierta	2.6
Normal	0.40		50% abierta	4.3
			25% abierta	21.0
		Globo	100% abierta	6.4
			50% abierta	9.5

En nuestro sistema, utilizamos:

$$\begin{array}{rcl}
 & & k \\
 3 \text{ codos de } 90^\circ & = 3 \times 0.75 & = 2.25 \\
 3 \text{ válvulas compuertas } 100\% \text{ abierto} & = 3 \times 0.20 & = 0.60 \\
 2 \text{ uniones “T” normal.} & = 2 \times 0.40 & = 0.80 \\
 k_{\text{acces total}} = 2.25 + 0.60 + 0.80 & = & 3.65
 \end{array}$$

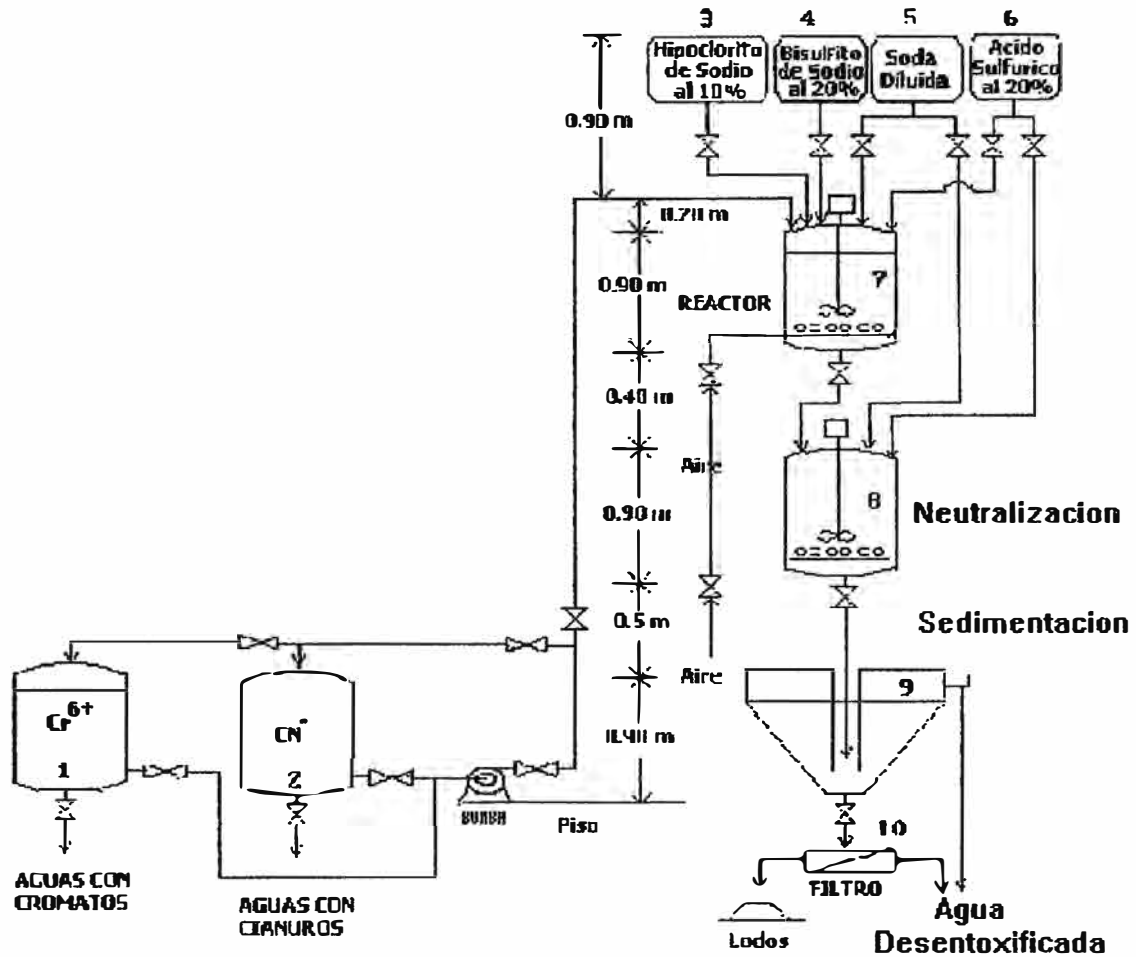
Reemplazando datos en (IV) hallamos $H_{r \text{ acces.}}$.

Con los valores de $H_{r \text{ tub}}$ y $H_{r \text{ acces.}}$, reemplazamos en (II) para obtener $H_{r \text{ ext.}}$. Con el valor de $H_{r \text{ ext.}}$, reemplazamos datos en (I), despejando H_{us} , obtenemos la altura útil del sistema.

Paso5.- Se construyen tres curvas del sistema, a tres valores de diámetro diferentes. Para la curva 1 se fija un diámetro, luego asumir diferentes valores de caudal (Q) para calcular diferentes valores de alturas útiles (H_{us}), según ecuación (I); Se procede de la misma manera para las curvas 2 y 3.

Paso 6.- Ejemplo de cálculo

De nuestro sistema propuesto(esquema siguiente), obtenemos los siguientes datos:



Caudal (Q)	= 0.4 (L/s) = 0.0004 (m ³ /s)
Diámetro tubería(d)	= 2.5" (0.0381 m.)
Altura (Z)	= 3.516 m.
Densidad del fluido (ρ)	= 1000 kg/m ³
Viscosidad del fluido (μ)	= 1 cp (9.31E-05 kg.m/s)
Longitud de tubería	4.416 m
Rugosidad de la tubería (ε)	0.0005 ft (0.0001524)
Valor total "k _{acces} "	3.65
Gravedad (g)	= 9.8 m/s ²
h ₁	= 0.084 m
h ₂	= 0.716 m

Velocidades (m/s)	Alturas(m)	Presiones manométricas (m)
$v_1 = 0$	$Z_1 = 0.084 \text{ m}$	$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_2$
$v_2 = 4Q/(\pi \cdot d^2)$	$Z_2 = 3.60 \text{ m}$	$P_2 = 0$

$$v_2 = 4(0.0004)/(3.1416 \times 0.0381^2) = 0.35 \text{ m/seg.}$$

Reemplazando datos :

$$\begin{aligned} (P_2 - P_1)/\rho \cdot g &= -h_2 = -0.716 \text{ m} \\ (Z_2 - Z_1) &= 3.516 \text{ m.} \\ (v_2^2 - v_1^2)/2g &= 0.006 \text{ m} \end{aligned} \quad \text{Por consiguiente:}$$

$$\Delta(P/\rho \cdot g + Z + v^2/2g) = 2.806 \text{ mt} \quad \dots \text{ (a)}$$

También :

$$\begin{aligned} Re &= (d \cdot v \cdot \rho)/\mu = (0.0381 \times 0.35 \times 1000/9.31 \text{ E-}05) = 13338.95 \\ \epsilon/d &= 0.0001524/0.0381 = 0.0040 \end{aligned}$$

Calculamos "f" por Churchill

$$A = 6.84 \text{ E+}18 \quad \text{y} \quad B = 1.54 \text{ E+}7 \quad \rightarrow \quad f = 0.01768$$

Reemplazando en ($H_r \text{ tub}$) en (II):

$$H_{r \text{ tub}} = 4 \cdot f \cdot (L/d) \cdot (v^2/2g) = 4 \cdot (0.01768) \cdot (4.416/0.0381) \cdot [0.35^2/(2 \times 9.8)]$$

$$H_{r \text{ tub}} = 0.0514 \text{ m.} \quad \dots \text{ (b)}$$

Tambien :

$$H_{r \text{ acces}} = k_{\text{total}} \cdot (v^2/2g) = 3.65 \cdot [0.35^2/(2 \times 9.8)] = 0.0228 \text{ m}$$

$$H_{r \text{ acces}} = 0.0228 \text{ m.} \quad \dots \text{ (c)}$$

Reemplazamos los valores de (a) , (b) y (c) en (I) y despejando la altura útil del sistema (H_{us})

$$-H_{r \text{ ext}} - H_{us} - \Delta \left(\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + Z \right) = 0$$

$$H_{r \text{ ext}} = H_{r \text{ tub}} + H_{r \text{ acces}} = 0.0514 + 0.0228 = 0.0742 \text{ m.}$$

$$-0.0742 - H_{us} - 2.806 = 0$$

$$H_{us} = 2.88 \text{ m}$$

Resultados de Cálculos a diferentes diámetros:

1.- **Curva1** : Diámetro $d = 2.5''$:

<u>Q (L/s)</u>	<u>Hus (m)</u>
0.40	2.88
0.60	2.98
0.80	3.11
1.00	3.27
1.20	3.47
1.46	3.79
1.60	3.98
1.65	4.05
1.70	4.13
1.80	4.29
1.90	4.45

2.- **Curva2** : Diámetro $d = 1''$:

<u>Q (L/s)</u>	<u>Hus (m)</u>
0.4	3.35
0.6	4.01
0.8	4.91
1.00	6.07
1.20	7.49
1.46	9.7

3.- **Curva3** : Diámetro $d = 0.75''$:

<u>Q (L/s)</u>	<u>Hus (m)</u>
0.4	5.04
0.6	7.75
0.8	11.52