

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD
PLANTA DE PRE-TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS
DE PLANTAS DE ÁCIDO SULFÚRICO
INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGISTA

PRESENTADO POR:
RICARDO RAMIREZ CUYA

ASESOR:
ING. EDGAR SEGURA TUMIALAN

LIMA – PERU

2013

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres,
hermanos y a Jacinta. Por su
fortaleza, confianza y cariño.

RESUMEN

El presente informe desarrolla el estudio de pre-factibilidad para el tratamiento de los efluentes líquidos de dos plantas de ácido sulfúrico. Dichas plantas de ácido sulfúrico procesarán las emisiones de dióxido de azufre generados por las fundiciones de concentrados de cobre y plomo.

El diseño de la planta de pre-tratamiento de efluentes líquidos, considera que sus efluentes pre-tratados serán descargados hacia la planta de tratamiento de aguas industriales (en operación). Dicha planta de tratamiento de aguas industriales (PTAI) procesa todos los efluentes líquidos emitidos por la fundición, tales como agua de procesos y escoria, aguas ácidas y aguas de lluvia; por lo tanto, los efluentes pre-tratados deberán contener niveles de impurezas menores a los niveles de los efluentes tratados en la PTAI, las cuales varían entre concentraciones de 14 y 19 mg/l de arsénico, 9 y 23 mg/l de plomo, pH entre 2.9 y 5.9 y un flujo entre 4.3 y 5.4 m³/min; así también otras impurezas como hierro, zinc, entre otros.

Los contenidos metálicos (impurezas) de los efluentes líquidos provenientes de las plantas de ácido sulfúrico contienen concentraciones de hasta 4.5 g/l de arsénico, 170 mg/l de plomo y 50 g/l de acidez; estas concentraciones son reducidas en la planta de pre-tratamiento hasta niveles de 8,5 mg/l de arsénico, 4.3 mg/l de plomo y pH alrededor de 11; niveles de impurezas menores a los tratados en los efluentes de la PTAI.

Estas concentraciones de acidez e impurezas metálicas son tratadas a través de procesos de neutralización y precipitación. El diseño incluye equipos de agitación, separación sólido - líquido y filtración; además del uso de lechada de cal para los procesos de neutralización y precipitación. El diagrama de proceso y los ratios de consumo son detallados en el balance de materia adjunto en el presente informe.

ABSTRACT

This report develops the pre-feasibility study for the treatment of liquid effluents of two acid sulfuric plants. These acid sulfuric plants will process the sulfur dioxide emissions generated by smelters of copper and lead concentrates.

The design of liquid effluents pre-treatment plant, considers that their pre-treated effluent will be discharged to industrial water treatment plant (in operation). This industrial water treatment plant (IATP) processes all liquid effluents from the smelter, such as process water and slag, acidic water and rain water, thus, the pre-treated effluent will contain lower levels of impurities than of treated effluent in IATP which vary between concentrations of 14 and 19 mg/l of arsenic, 9 and 23 mg/l of lead, pH between 2.9 and 5.9 and a flow rate between 4.3 and 5.4 m³/min; as well as other metallic pollutants such as iron, zinc, among others.

The metals content (pollutants) of liquid effluents from the sulfuric acid plants contain concentrations up to 4.5 g/l of arsenic, 170 mg/l of lead and 50 g/l of acidity; these concentrations are reduced in the pre-treatment plant to levels of 8.5 mg/l of arsenic, 4.3 mg/l of lead and pH around 11, lower levels of impurities than treated effluents in IATP.

These concentrations of acidity and metal pollutants are treated by neutralization and precipitation processes. The design includes equipment of agitation, solid-liquid separation and filtration, lime milk is used for neutralization and precipitation processes. The process diagram and rates of consume are detailed in the material balance attached in this report.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
Objetivo general	09
Justificación	09
CAPITULO I: EFLUENTES LIQUIDOS DE PLANTAS DE ACIDO SULFURICO	
1.1 Efluentes ácidos de plantas de ácido sulfúrico	11
1.2 El arsénico en los efluentes ácidos	12
1.3 Técnicas de remoción de Arsénico en soluciones ácidas	13
1.4 Ecuaciones presentes en el consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	15
CAPITULO II: ESTUDIO DE LA INGENIERIA CONCEPTUAL	
2.1 Alcance del Estudio	17
2.2 Datos de Línea Base	18
2.3 Desarrollo Experimental y Alternativas de Diseño	22
2.4 Evaluación de Alternativas – Ingeniería Conceptual	43
CONCLUSIONES	47
BIBLIOGRAFIA	48
ANEXOS	
Balance de materia – Alternativa 1	
Balance de materia – Alternativa 2	
Balance de materia – Planta de cal	
Cronograma de Actividades.	
Presupuestos de las Alternativas.	

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Esquema general de procesos en una planta de ácido sulfúrico	13
Figura 1.2 Flujo de ácido débil en los procesos de producción de ácido sulfúrico	13
Figura 1.3 Solubilidad del Arsénico en medio ácido en función a la temperatura	14
Figura 1.4 Arsénico en solución en función a la relación Fe/As	16
Figura 2.1 Limite de batería – Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Líquidos	18
Figura 2.2 Características de los efluentes tratados en la planta de tratamiento de aguas industriales	19
Figura 2.3 Densidad de los efluentes ácidos – relación entre la densidad y porcentaje de sólidos	22
Figura 2.4 Influencia del pH y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ en la remoción de arsénico de efluentes ácidos – resultado de la pruebas	32
Figura 2.5 Índices de consumos de cal y sólidos en suspensión para las pruebas de neutralización a pH 9, 10 y 11	33
Figura 2.6 Prueba de sedimentación en la etapa de neutralización	34
Figura 2.7 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	35

Figura 2.8 Diagrama de Flujo – Alternativa 1	36
Figura 2.9 Índices de consumos de cal y sólidos en suspensión para las pruebas de neutralización a pH 2	39
Figura 2.10 Prueba de sedimentación en la etapa de neutralización a pH 2	41
Figura 2.11 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación a pH 11.3	42
Figura 2.12 Diagrama de Flujo – Alternativa 2	43

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Oxidación del Arsénico a diferentes pH	15
Tabla 2.1 Registro estadístico – Entrada a la Planta de Tratamiento de Aguas Industriales	19
Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas	20
Tabla 2.3 Variables de entrada para la Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Ácidos – Mezcla de efluentes ácidos	20
Tabla 2.4 Comparación entre las características de la mezcla de efluentes ácidos y los efluentes tratados en la PTAI	21
Tabla 2.5 Relación entre porcentajes de sólidos y densidad de los efluentes ácidos	21
Tabla 2.6 Solución sintética – Neutralización a pH 9 -10	23
Tabla 2.7 Resultados de la Neutralización en pH entre 9 y 10	25
Tabla 2.8 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 9 -10	26
Tabla 2.9 Influencia de Hipoclorito de Sodio y Sulfato Férrico en la Oxidación del Arsénico – Neutralización a pH 9 -10	27
Tabla 2.10 Solución sintética – Neutralización a pH 11	28

Tabla 2.11 Resultados de la Neutralización a pH 11	29
Tabla 2.12 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 11	30
Tabla 2.13 Influencia de Hipoclorito de Sodio y Sulfato Férrico en la Oxidación del Arsénico – Neutralización a pH 11	31
Tabla 2.14 Solución sintética – Tercera evaluación	36
Tabla 2.15 Neutralización a pH 2 – Tercera Evaluación	38
Tabla 2.16 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 2 – Tercera Evaluación	38
Tabla 2.17 Neutralización – Precipitación a pH 11.3 – Tercera Evaluación	40
Tabla 2.18 Análisis comparativo de Alternativas de Diseño	44

NOMENCLATURA

UNIDAD	SIMBOLO
Metro	m
Pies	ft
Tonelada métrica	TM
Tonelada corta	TC
Kilogramo	kg
Gramo	g
Miligramo	mg
Día	d
Hora	h
Minutos	min
Litro	l
Porcentaje	%
Porcentaje en Peso	%w
Toneladas Métricas por Día	TMD
Metros cúbicos	m ³
Total Sólidos en Suspensión	TSS
Peso Molecular	PM

INTRODUCCIÓN

Objetivo General

Definir el esquema de pre-tratamiento de los efluentes ácidos generados por plantas de ácido sulfúrico, que procesan los gases SO_2 de fundiciones de cobre y plomo; de tal modo que dichos efluentes pre-tratados se incorporen a los efluentes tratados por la planta de tratamiento de aguas industriales (PTAI), sin alterar el proceso final de remoción de impurezas. Para ello, dichos efluentes ácidos deben alcanzar niveles de impurezas, similares o por debajo a los niveles que presentan los efluentes tratados por la PTAI.

La ingeniería conceptual desarrollada en este estudio debe contribuir con la continuidad operativa de la PTAI, la cual debe cumplir con el compromiso suscrito con el Estado Peruano, referente a los límites máximos permisibles de emisiones líquidas en operaciones minero – metalúrgicas.

Justificación

Los efluentes de las plantas de ácido sulfúrico se caracterizan principalmente por su alto contenido de ácido, arsénico y plomo, como producto de la limpieza y refrigeración de gases SO_2 , provenientes de fundiciones de cobre y plomo. Donde la mayor presencia de arsénico se encuentra en los concentrados de cobre, debido a su asociación mineralógica.

Los impactos serán generados principalmente por las elevadas masas de metales (impurezas) que serán producidas por las nuevas plantas de ácidos, en especial aquellas relativas al arsénico y plomo. Las nuevas masas metálicas resultarán en

aumentos significativos en las concentraciones de Pb y As en los efluentes, cuya magnitud convierte a sus correspondientes remociones imposibles de ser realizadas en una sola etapa de tratamiento, dentro de los niveles compatibles con el patrón de emisión.

La planta de tratamiento de aguas industriales (PTAI), en operación, no tiene los parámetros suficientes para procesar estos nuevos efluentes con altos contenidos de arsénico, plomo y acidez. La comparación de impurezas y acidez entre los efluentes procesados por la PTAI y estos efluentes ácidos se encuentran indicadas en la Tabla 3.3.

El aumento de caudal por estos efluentes ácidos no es significativo y no perjudica la operatividad de la PTAI, ya que los flujos totales no exceden las capacidades instaladas de las bombas. La actual planta de tratamiento de aguas industriales está operando a un 78% de su capacidad máxima.

CAPITULO I

EFLUENTES LÍQUIDOS DE PLANTAS DE ÁCIDO SULFÚRICO

El informe trata acerca de un estudio de pre-factibilidad de una planta de tratamientos de efluentes líquidos procedentes de una planta de ácido sulfúrico de una fundición de cobre y una planta de ácido sulfúrico de una fundición de plomo. Esta planta que se denominará Planta de Pre-tratamiento de Efluentes descargará hacia una planta existente de tratamiento de aguas industriales (PTAI).

La PTAI no tiene la capacidad de tratar los altos contenidos de arsénico, plomo, zinc, hierro y acidez de los efluentes de las plantas de ácido sulfúrico; este informe evalúa las alternativas de proceso para reducir los niveles de impurezas hasta los niveles de los efluentes tratados en la PTAI. La evaluación de las alternativas nos dará la ingeniería conceptual para el tratamiento de estos efluentes altamente ácidos y serán base de desarrollo para la ingeniería básica y de detalle.

1.1 Efluentes ácidos de plantas de ácido sulfúrico

Las emisiones gaseosas de una fundición de concentrados (sulfuros) son principalmente material particulado (bajo 10 micrones), óxidos de azufre y humos de arsénico, plomo, cadmio, mercurio, antimonio, entre otros. Las emisiones se producen en los hornos (secado, fusión, conversión, refinación), y de emisiones fugitivas durante las operaciones de traspaso y manejo de material.

Una práctica extendida para remover el SO_2 de los gases primarios de alta concentración en SO_2 es convertirlo en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Sin embargo, esto requiere que se elimine previamente el material particulado del efluente gaseoso, y que la concentración de SO_2 se mantenga en al menos 3%. Las plantas de ácido

sulfúrico denominadas de contacto simple, convierten típicamente entre un 96% del SO_2 , y las de doble contacto remueven hasta un 99.8% del SO_2 .

En la figura 1.1 se muestra el esquema general de los procesos de producción de ácido sulfúrico y la generación de efluentes líquidos con altos contenidos de acidez e impurezas (ácido débil).

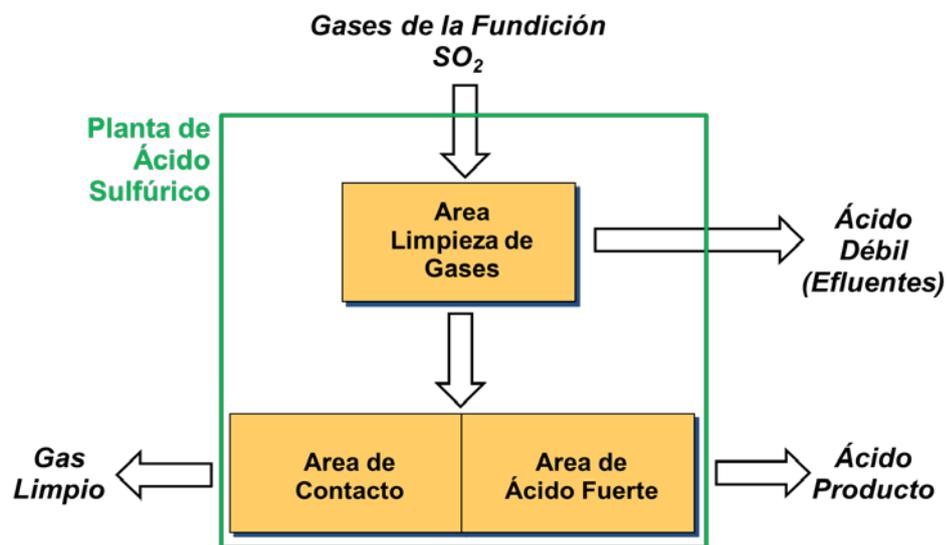


Figura 1.1 Esquema general de procesos en una planta de ácido sulfúrico

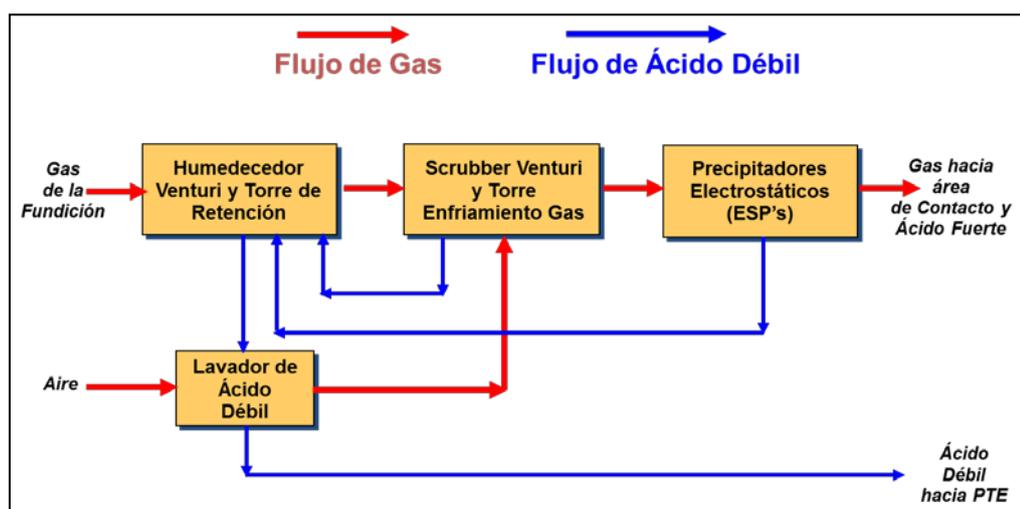


Figura 1.2 Flujo de ácido débil en los procesos de producción de ácido sulfúrico

1.2 El arsénico en los efluentes ácidos

El arsénico está presente en los gases residuales de las plantas de ácido sulfúrico como As_2O_3 , el cual se disuelve en medio ácido como HAsO_2 (As^{+3}). La generación del ácido arsénico H_3AsO_4 (As^{+5}) es mínima por la presencia de SO_2 . El arsénico no disuelto puede estar presente como As_2O_3 , As_4 y As_2S_3 .

La figura 1.3, muestra la solubilidad del arsénico en soluciones de ácido sulfúrico en función a la temperatura. El arsénico es muy soluble a bajas concentraciones de ácido y a altas temperaturas.

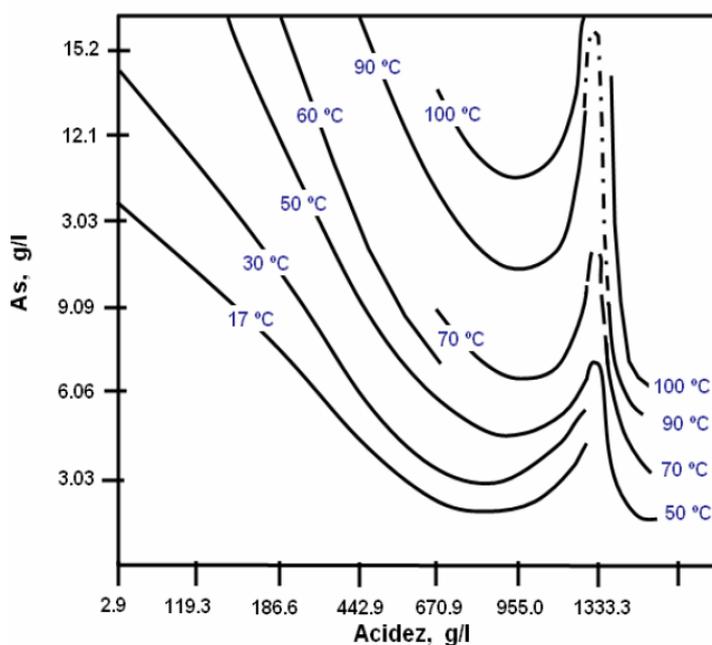


Figura 1.3 Solubilidad del Arsénico en medio ácido en función a la temperatura.

1.3 Técnicas de remoción de Arsénico en soluciones ácidas

1.3.1 Oxidación del arsénico

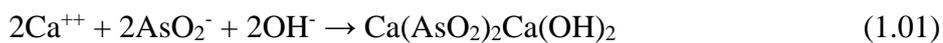
Oxidación del As^{+3} a As^{+5} con el uso de oxidantes como el O_2 , KMnO_4 , H_2O_2 , NaOCl , $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, según las siguientes reacciones:

Tabla 1.1 Oxidación del Arsénico a diferentes pH

Rango de pH	Reacción
pH < 0	$\text{AsO}^+ + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
$1 < \text{pH} < 0$	$\text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
$3 < \text{pH} < 8$	$\text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{AsO}_4^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
$7 < \text{pH} < 10$	$\text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HAsO}_4^{-2} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
$8 < \text{pH} < 13$	$\text{AsO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HAsO}_4^{-2} + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
pH < 12	$\text{AsO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AsO}_4^{-3} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

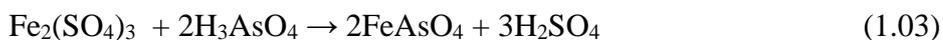
1.3.2 Precipitación con Oxido de Calcio

Método para precipitar arsénico y metales pesados, según las reacciones siguientes y bajo el pH mayor a 10.5



2.3.3 Coprecipitación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

El $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ se emplea como coagulante y coprecipitador de impurezas remanentes. Regulador del pH final de la solución tratada ($\text{pH} \leq 9,0$).



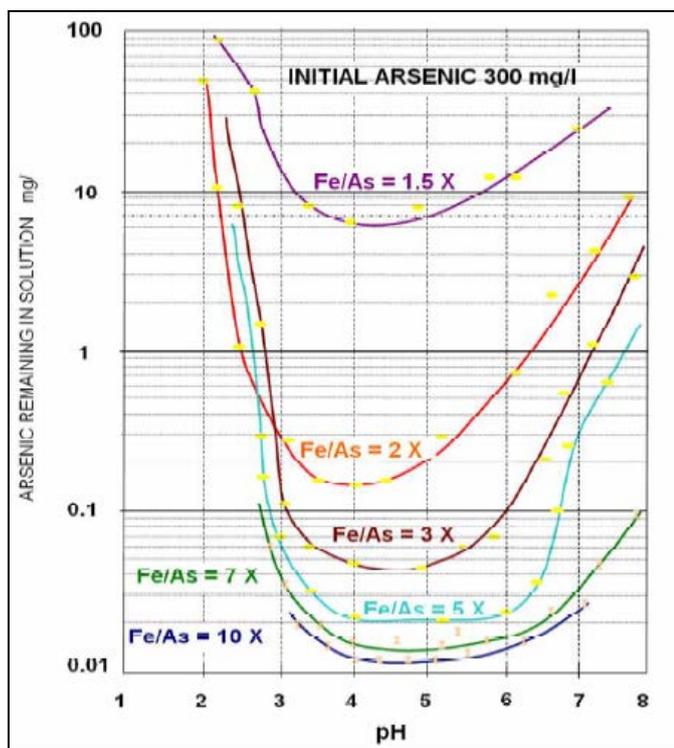


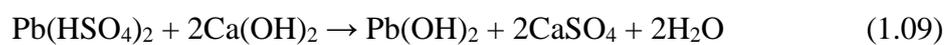
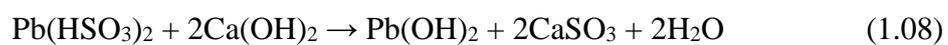
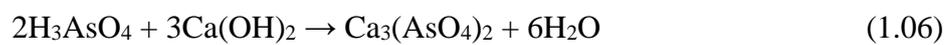
Figura 1.4 Arsénico en solución en función a la relación Fe/As
(Concentración inicial de Arsénico= 300 mg/l)

El arsenato férrico es un compuesto muy estable. La solubilidad decrece rápidamente por aumento de la relación Fe/As en un intervalo amplio de pH (3,0 a 7,0). En la Figura 1.4 se observa que a pH 4, permanece en la solución aproximadamente 7,2 mg/l de arsénico con una relación molar Fe/As de 1,5. El aumento de la relación Fe/As a 2,0 causa una reducción significativa de arsénico en la solución hasta 0,15 mg/l aproximadamente. La reducción de arsénico a 0,02 mg/l puede obtenerse con una proporción Fe/As de 5,0. Los datos graficados en la Figura 1.4 representan condiciones de equilibrio.

1.4 Ecuaciones presentes en el consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

A continuación se presentan las reacciones involucradas en efluentes ácidos con contenidos de arsénico y plomo, principalmente, debido al proceso de neutralización – precipitación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.





CAPITULO II

ESTUDIO DE LA INGENIERIA CONCEPTUAL

2.1 Alcance del estudio

El alcance del presente estudio corresponde al diseño del pre-tratamiento de efluentes ácidos con altos contenidos de impurezas (principalmente arsénico y plomo), es importante aclarar que las plantas de ácido sulfúrico y planta de tratamiento de aguas industriales definen el límite de batería del presente estudio.

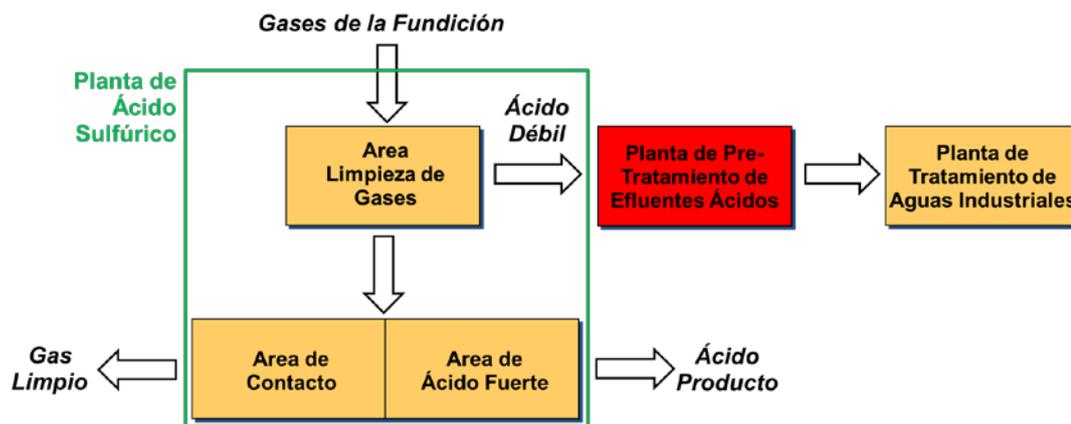


Figura 2.1 Limite de batería – Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Líquidos

Es por ello que los parámetros esenciales para el desarrollo del estudio son las características de los efluentes ácidos emitidos por las plantas de ácido sulfúrico (ácido débil), así también, las características de los efluentes recepcionados en la planta de tratamiento de aguas industriales.

2.2 Datos de línea Base

2.2.1 Condiciones actuales de operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Industriales (PTAI)

Se realizó un análisis estadístico del registro de los efluentes emitidos a la planta de tratamiento de aguas industriales para determinar las características de los efluentes que buscamos alcanzar con los procesos del presente estudio, a fin de no perjudicar los parámetros de procesos ya definidos en la PTAI.

Tabla 2.1 Registro estadístico – Entrada a la Planta de Tratamiento de Aguas Industriales

Mes	Arsénico	Plomo	Fierro	Zinc	Caudal	pH
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	m ³ /min	
Mes 1	14.82	13.44	53.41	196.76	5.32	3.95
Mes 2	18.57	15.50	34.61	154.37	4.67	5.88
Mes 3	14.40	14.87	56.66	211.74	4.98	4.08
Mes 4	15.23	9.95	39.39	133.70	4.51	4.39
Mes 5	18.90	22.70	44.86	145.80	4.40	3.37
Mes 6	14.26	10.61	37.75	137.08	4.37	2.90

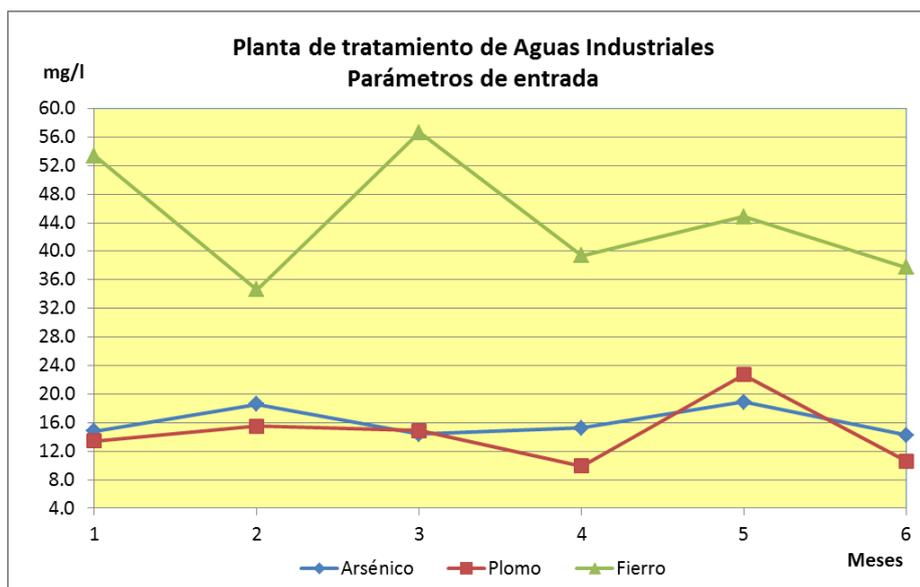


Figura 2.2 Características de los efluentes tratados en la planta de tratamiento de aguas industriales.

Con esta información podemos observar que la PTAI opera efluentes con contenidos de arsénico entre 14 y 19 mg/l, plomo entre 9 y 23 mg/l, Fierro entre 34 y 57 mg/l, zinc entre 133 y 212 mg/l, pH entre 2.9 y 5.9 y un flujo entre 4.3 y 5.4 m³/min (la PTAI tiene una capacidad máxima de 7 m³/min).

Con estos parámetros de entrada, la PTAI debe operar y emitir efluentes que cumplan los límites máximos permisibles de efluentes líquidos para actividades minero-metalúrgicas (ver tabla 2.2 y anexos).

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM / R.M. N° 011-96-EM/VMM)

Año Reglamento	pH	As (mg/l)	Pb (mg/l)	Fe (mg/l)	Zn (mg/l)
2006	6 - 9	0.5	0.2	2	3
2010	6 - 9	0.1	0.2	2	1.5

2.2.2 Caracterización de los Efluentes de las Plantas de Ácido Sulfúrico de las Fundiciones de Cobre y Plomo

De acuerdo a los estudios realizados en la ingeniería de detalle de las plantas de ácido sulfúrico, para los gases provenientes de las fundiciones de concentrados de cobre y plomo, se obtuvo las siguientes condiciones de efluentes a tratar (ver tabla 2.3)

Tabla 2.3 Variables de entrada para la Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Ácidos – Mezcla de efluentes ácidos.

Variable	unid.	Pta. ácido Cu	Pta. ácido Pb	Mezcla Efluente Ácido
Arsénico	mg/l	5,250.00	946.20	4,558.26
Plomo	mg/l	200.00	9.60	169.40
Fierro	mg/l	43.13	25.69	40.33
Zinc	mg/l	120.00	41.50	107.38
Caudal	m ³ /min	0.72	0.14	0.86
pH		< 1	< 1	< 1

Tabla 2.4 Comparación entre las características de la mezcla de efluentes ácidos y los efluentes tratados en la PTAI.

Variable	unid.	Mezcla Efluente Ácido	Max. Entrada PTAI
Arsénico	mg/l	4,558.26	18.90
Plomo	mg/l	169.40	22.70
Fierro	mg/l	40.33	56.66
Zinc	mg/l	107.38	211.74
Caudal	m ³ /min	0.86	5.32
pH		< 1	2.9 - 5.9

En la Tabla 2.4, se observa que la acidez, y contenidos de arsénico y plomo de la mezcla de efluentes ácidos son los principales factores a analizar para conseguir su reducción a los valores que opera la PTAI. Entre ambas plantas de ácido sulfúrico, es la de cobre que contiene altos niveles de arsénico y plomo, que alcanza a 5.3 g/l y 200 mg/l respectivamente. El caudal tampoco es un factor a considerar, debido a que la PTAI tiene una capacidad máxima de 7 m³/min.

2.2.3 Densidad de los Efluentes Ácidos

Los siguientes datos fueron suministrados por la ingeniería de detalle de las plantas de ácido sulfúrico.

Tabla 2.5 Relación entre porcentajes de sólidos y densidad de los efluentes ácidos

Sólidos wt%	Densidad Kg/m ³
12.9	1,092
24.0	1,321
25.0	1,338
60.0	1,840

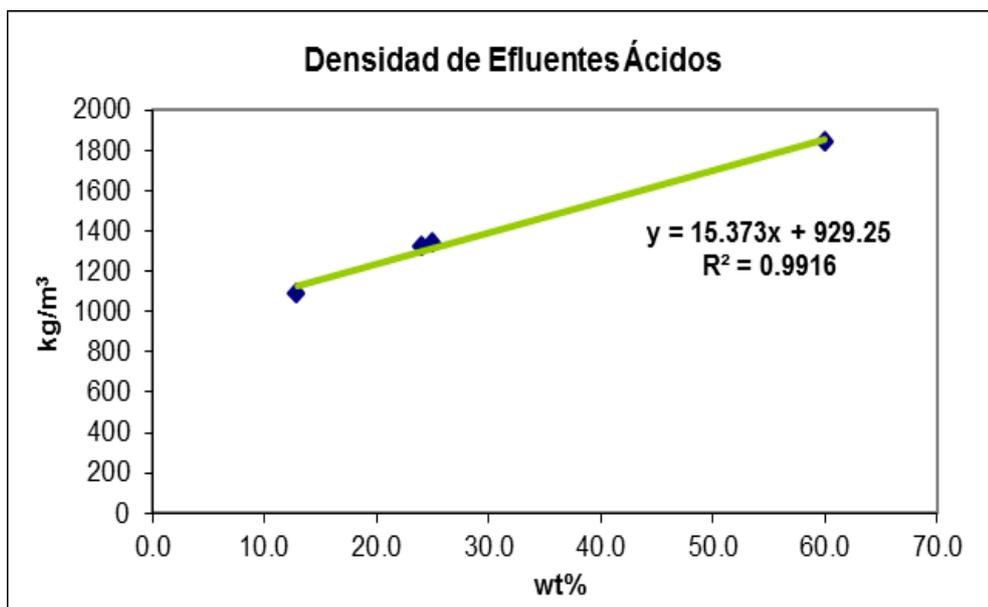


Figura 2.3 Densidad de los efluentes ácidos – relación entre la densidad y porcentaje de sólidos.

2.2.4 Parámetros de la Planta de Cal

La reacción global de lechada de cal es como sigue:



Se dispone de una planta de cal con un alimento de caliza de 11.1 TMD y agua de 110.9 TMD. Con un factor de reacción del 85%.

	<u>Unidad</u>	CaO	+	H₂O	=	Ca(OH)₂
PM	g/gmol	56.0		18.0		74.0
Ingreso	TMD	11.1		110.9		0.0
Consumo	TMD	11.1		3.6		0.0
Genera	TMD	0.0		0.0		14.6
Salida	TMD	0.0		107.4		14.6

De acuerdo a los cálculos descritos en el análisis anterior, tenemos una capacidad de lechada de cal de 14.6 TMD

Calculando el porcentaje en peso de Ca(OH)₂ en la lechada de cal, tenemos:

$$\text{Wt\%} = \frac{\text{Ca(OH)}_2}{[\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O}]} = \frac{14.6}{[14.6 + 107.4]} = 12\%$$

2.3 Desarrollo Experimental y Alternativas de Diseño

2.3.1 Neutralización a pH entre 9 y 10

2.3.1.1 Preparación de la solución sintética de Efluentes Ácidos

Para las evaluaciones, inicialmente se prepararon soluciones sintéticas con los niveles de acidez y contenidos metálicos de acuerdo a las características que presentarían la mezcla de los efluentes de las plantas de ácido de cobre y plomo (Ver Tabla 2.6).

De acuerdo a la información proporcionada, el efluente de la planta de ácido de cobre presentaría un mayor contenido de arsénico, que en su mayor parte se encontraría en forma iónica. Bajo esta consideración, la solución sintética a tratar fue preparada adicionando el As_2O_3 previamente calentado a una temperatura de 300 °C, a una solución acidulada con 70,0 g/l. Luego se agregó soluciones de cloruro de plomo y sulfato de zinc para fijar los contenidos de plomo y zinc respectivamente y se dejó reaccionar por espacio de una hora.

El contenido de ácido en la solución sintética fue de 68,0 g/l. En lo que se refiere al contenido de arsénico disuelto en la solución sintética, mediante la técnica empleada se ha logrado solubilizar hasta un porcentaje mayor a lo que podría presentar la mezcla de los efluentes ácidos.

Tabla 2.6 Solución sintética – Neutralización a pH 9 -10

Solucion Sintetica						
Prueba	Acidez	Ensayes, mg/l				
N°	g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO_4^{-2}
P-11	68.0	12,200.0	6.0	177.0	1.2	8,148.0
P-13	68.0	11,300.0	5.7	210.0	7.2	68,041.0
P-17	68.0	13,500.0	6.7	179.0	9.9	9,895.0
P-19	68.0	14,100.0	10.6	170.0	12.2	4,197.0
P-21	68.0	11,000.0	7.2	181.0	46.3	11,641.0
P-14	68.0	10,000.0	8.1	167.0	9.5	71,292.0
P-15	68.0	9,500.0	6.4	161.0	10.6	70,038.0

2.3.1.2 Neutralización a pH entre 9 y 10

Se evaluó la remoción de los contenidos de arsénico y plomo, principalmente, por efecto del pH en un rango de 9,0 a 10. En la tabla 2.6, se presentan las características de las soluciones sintéticas empleadas en las pruebas, las cuales presentaron contenidos de arsénico total entre 10,2-15,7 g/l; y arsénico disuelto entre 9,5-14,1 g/l.

Los resultados mostrados en la tabla 2.7 indican que a pH 9,0 se logra remover el arsénico desde 12,2 g/l hasta 47,8 mg/l (Prueba P-11); sin embargo, en las pruebas siguientes no se logró reproducir este resultado, obteniéndose soluciones con niveles de arsénico entre 2,4 a 5,0 g/l. El plomo experimento una reducción desde 5,7-10,6 mg/l hasta 0,2-0,8 mg/l.

Las demás impurezas tales como zinc y fierro fueron removidos hasta niveles permisibles. El consumo de cal estuvo entre 55,7 a 56,9 g/l.

A pH 10,0 se logra un ligero incremento en la remoción de arsénico. La solución tratada presento niveles de arsénico entre 1,6-1,9 g/l. El plomo se redujo de 6,4-8,1 mg/l a 0,3-0,4 mg/l. En tanto que elementos como el zinc y fierro se precipitaron eficientemente. El consumo de cal estuvo entre 58,7 a 60,7 g/l.

Tabla 2.7 Resultados de la Neutralización en pH entre 9 y 10

Prueba	Solucion						Residuos						
	CaO		pH		Ensayes, mg/l		S.S		Ensayes, %				
	g/l	Fin	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²	g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²
P-11	56.4	9.2	47.8	0.8	0.4	0.2	1,991.0	148.1	9.6	0.1	1.3	0.1	44.0
P-13	56.9	9.3	2,400.0	0.3	0.2	0.3	1,899.0	152.5	8.8	0.2	1.2	0.1	46.2
P-17	55.9	9.1	2,600.0	0.4	0.3	0.4	1,562.0	144.6	8.5	0.2	0.1	0.1	46.6
P-19	56.2	9.1	3,800.0	0.4	1.2	0.6	2,107.0	146.6	8.0	0.2	0.1	0.1	48.4
P-21	55.7	9.0	5,000.0	0.2	2.3	1.1	2,086.0	142.2	6.7	0.1	0.1	0.1	47.0
P-14	60.7	10.0	1,900.0	0.4	0.1	0.2	1,181.0	156.2	9.0	0.2	1.4	0.1	46.7
P-15	58.7	10.0	1,600.0	0.3	0.2	0.3	1,078.0	153.7	8.5	0.1	0.1	0.1	42.7

Tabla 2.8 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 9 -10

Prueba	Neutralización						
	Indices	Indices	As (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	SO ₄ ⁻² (%)
N°	CaO/H ₂ SO ₄	S.S/H ₂ SO ₄	Solucion	Solucion	Solucion	Solucion	Solucion
P-11	0.8294	2.18	0.39	13.33	0.23	16.67	24.44
P-13	0.8368	2.24	21.24	5.26	0.10	4.17	2.79
P-17	0.8221	2.13	19.26	5.97	0.17	4.04	15.79
P-19	0.8265	2.16	26.95	3.77	0.71	4.92	50.20
P-21	0.8191	2.09	45.45	2.78	1.27	2.38	17.92
P-14	0.8926	2.30	19.00	4.94	0.06	2.11	1.66
P-15	0.8632	2.26	16.84	4.69	0.12	2.83	1.54

Se efectuaron pruebas con la solución filtrada proveniente de la primera etapa con la finalidad de evaluar la influencia del hipoclorito de sodio y sulfato férrico en el proceso de oxidación del arsénico y co-precipitación de arsénico y plomo.

En la Tabla 2.9, se muestran los resultados alcanzados a pH 9,0-9,3. Debido a los altos contenidos iniciales de arsénico no se logra remover este elemento en su totalidad de la solución tratada, ya que presenta contenidos de 1,4-4,2 g/l. El empleo de hipoclorito de sodio no influye mayormente en el proceso.

Tabla 2.9 Influencia de Hipoclorito de Sodio y Sulfato Férrico en la Oxidación del Arsénico – Neutralización a pH 9 -10

Prueba N°	Coprecipitación - Ajuste de pH										Solución Tratada					
	pH Inicial	H ₂ SO ₄ Fin	Tiempo min	NaOCl ml/l	Tiempo min	Fe ₂ (SO ₄) ₃ Fin	Tiempo min	Cal g	Tiempo min	pH Final	Residuo g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²
P-11	9.05 8.98	- -	- -	1.0 -	5.0 -	1.0 1.0	10.0 15.0	0.6 0.6	5.0 5.0	9.2 9.3	0.6 0.7	1.10 1.30	0.40 0.30	0.50 0.10	0.50 0.80	1,823.00 1,722.00
P-13	9.80 9.80	0.1 0.1	2.0 2.0	0.5 -	5.0 -	0.5 0.5	10.0 15.0	- -	- -	9.0 9.0	0.8 0.8	2,100.00 2,000.00	0.28 0.28	0.06 0.13	2.50 3.80	1,403.00 1,385.00
P-17	9.95 9.95	0.2 0.2	2.0 2.0	1.0 -	10.0 -	1.0 1.0	20.0 30.0	- -	- -	9.3 9.4	0.7 1.4	2,100.00 2,000.00	0.41 0.40	0.10 0.08	4.70 4.50	2,145.00 1,669.00
P-19	9.07 9.07	0.1 0.1	2.0 2.0	1.0 -	5.0 -	1.0 1.0	10.0 20.0	0.8 0.7	5.0 5.0	9.0 9.1	2.2 1.9	3,000.00 3,200.00	0.47 0.40	0.17 0.16	1.30 1.70	1,397.00 1,610.00
P-21	9.10 9.10	- -	- -	1.0 -	5.0 -	1.0 1.0	10.0 20.0	0.4 0.4	5.0 5.0	9.0 9.0	2.0 2.0	4,200.00 4,200.00	0.37 0.37	0.21 0.21	8.80 8.80	1,714.00 1,714.00
P-14	10.01 10.04	- -	- -	0.5 -	5.0 -	0.5 0.5	10.0 15.0	0.4 0.4	1.0 1.0	9.0 9.0	0.6 0.7	1,600.00 1,600.00	0.29 0.29	0.08 0.21	8.40 12.00	2,004.00 1,755.00
P-15	9.90 9.90	0.2 0.2	2.0 2.0	0.5 -	5.0 -	0.5 0.5	10.0 15.0	- -	- -	9.2 9.3	0.7 0.7	1,400.00 1,400.00	0.32 0.42	0.15 0.25	3.60 4.10	1,348.00 1,340.00

2.3.2 Neutralización a pH 11

2.3.2.1 Preparación de la solución sintética de Efluentes Ácidos

En base a las experiencias anteriores donde se observa una ligera influencia del incremento del pH sobre la remoción de arsénico, se realizaron pruebas experimentales hasta alcanzar un pH final de 11,0 en la etapa de neutralización y precipitación.

En la Tabla 2.10, se presentan las características de las soluciones sintéticas tratadas, las condiciones y resultados logrados. Las soluciones sintéticas presentaron contenidos de arsénico total entre 6,5-13,9 g/l; arsénico disuelto entre 6,3-13,4 g/l. Con un consumo de 70,2 g/l de cal en forma de lechada (Prueba P-10), se logró alcanzar un pH de 11,0 con un tiempo de residencia de 90 minutos. La solución tratada presentó un contenido de arsénico de 7,2 mg/l; 0,5 mg/l de plomo; 0,3 mg/l de zinc; 0,1 mg/l de hierro y 1 123 mg/l de sulfato. El residuo generado fue de 179,8 g/l.

Tabla 2.10 Solución sintética – Resultados de la Neutralización a pH 11

Solucion Sintetica						
Prueba	Acidez	Ensayes, mg/l				
N°	g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²
P-10	68.0	10,700.0	7.6	160.0	17.0	43,750.0
P-12	68.0	13,400.0	8.7	189.0	11.4	16,200.0
P-16	68.0	12,100.0	7.9	160.0	10.2	71,800.0
P-18	68.0	6,300.0	7.3	159.0	9.7	17,224.0
P-20	68.0	9,100.0	7.7	166.0	10.4	15,074.0

2.3.2.2 Neutralización a pH 11

Se hicieron réplicas de pruebas alcanzándose un pH final de 11,0-11,2 obteniéndose resultados similares en cuanto a la remoción de impurezas, el consumo de cal varió entre 60,0-61,6 g/l. Los niveles de arsénico en solución tratada reportaron niveles de 8,8-12,0 mg/l y niveles de plomo entre 0,4-3,2 mg/l. Los pesos de los residuos generados en la etapa de neutralización variaron entre 147,2 y 152,8 g/l.

Tabla 2.11 Resultados de la Neutralización a pH 11

Prueba	Solucion						Residuos						
	pH		Ensayes, mg/l				S.S		Ensayes, %				
	CaO g/l	Fin	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²	g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²
P-10	70.2	11.0	7.2	0.5	0.3	0.1	1,123.0	179.8	8.0	0.1	1.1	0.1	40.9
P-12	61.5	11.2	8.8	1.8	0.6	0.2	1,113.0	150.3	9.9	0.2	1.2	0.1	45.3
P-16	61.6	11.0	12.0	0.6	0.3	0.1	1,252.0	152.8	9.8	0.1	0.1	0.1	43.9
P-18	61.3	11.0	10.2	0.4	0.2	0.1	1,340.0	149.8	10.3	0.1	0.1	0.1	43.2
P-20	60.0	11.0	9.6	3.2	1.0	0.2	2,015.0	147.2	9.0	0.1	0.1	0.1	47.0

Asimismo en la Tabla 2.11, se presenta la composición química de los residuos generados donde se aprecia un nivel de arsénico de 8,0-10,3%; plomo de 0,12-0,16%; zinc de 0,12-1,2%; fierro de 0,06-0,08%; sulfato de 40,9-47,0%.

Tabla 2.12 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 11

Prueba	Neutralización						
	Indices	Indices	As (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	SO ₄ ⁻² (%)
N°	CaO/H ₂ SO ₄	S.S/H ₂ SO ₄	Solucion	Solucion	Solucion	Solucion	Solucion
P-10	1.0324	2.64	0.07	6.58	0.19	0.59	2.57
P-12	0.9044	2.21	0.07	20.69	0.32	1.75	6.87
P-16	0.9059	2.25	0.10	7.59	0.19	0.98	1.74
P-18	0.9015	2.20	0.16	5.48	0.13	1.03	7.78
P-20	0.8824	2.16	0.11	41.56	0.60	1.92	13.37

Con relación a la última etapa de tratamiento de co-precipitación con el empleo de sulfato férrico líquido al 46,5% en peso (184 g/l de concentración de fierro), las condiciones y resultados de las pruebas, se presentan en la Tabla 2.13. Inicialmente se ajustó el pH con una adición mínima de ácido sulfúrico y luego se adiciono el sulfato férrico (Fe₂(SO₄)₃), lográndose reducir los niveles de arsénico entre 0,5-2,0 mg/l y los niveles de plomo entre 0,37-0,64 mg/l para un pH final de 9,0-9,1.

Los residuos generados en esta etapa fueron de 0,2-0,8 g/l. Con el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl) se registra un ligero incremento en la remoción de arsénico, las soluciones presentaron contenidos de arsénico de 0,1-1,8 mg/l y 0,34-0,65 de plomo.

Tabla 2.13 Influencia de Hipoclorito de Sodio y Sulfato Férrico en la Oxidación del Arsénico – Neutralización a pH 11

Prueba N°	Coprecipitación - Ajuste de pH										Solución Tratada					
	pH Inicial	H ₂ SO ₄ Fin	Tiempo min	NaOCl ml/l	Tiempo min	Fe ₂ (SO ₄) ₃ Fin	Tiempo min	Cal g	Tiempo min	pH Final	Residuo g/l	As	Pb	Zn	Fe	SO ₄ ⁻²
P-10	12.50	0.2	2.0	1.0	5.0	1.0	10.0	0.4	5.0	9.1	0.5	1.60	0.40	0.10	0.20	2,407.00
	12.53	0.2	2.0	-	-	1.0	15.0	0.4	5.0	9.1	0.5	2.00	0.40	0.30	0.30	2,312.00
P-12	11.52	0.1	2.0	1.0	5.0	1.0	10.0	0.5	5.0	9.1	0.4	0.10	0.40	0.10	0.30	1,866.00
	11.61	0.1	2.0	-	-	1.0	15.0	0.4	5.0	9.1	0.4	0.50	0.40	0.30	0.20	1,722.00
P-16	11.56	0.1	2.0	1.0	10.0	1.0	20.0	0.5	5.0	9.0	0.6	0.80	0.40	0.10	0.30	1,655.00
	11.56	0.1	2.0	-	-	1.0	20.0	0.4	5.0	9.1	0.5	2.00	0.40	0.10	0.60	1,745.00
P-18	11.58	0.1	2.0	1.0	10.0	1.0	20.0	0.4	5.0	9.1	0.6	1.80	0.34	0.20	0.12	1,689.00
	11.58	0.1	2.0	-	-	1.0	20.0	0.5	5.0	9.0	0.6	0.29	0.37	0.12	0.10	1,719.00
P-20	11.20	0.1	2.0	1.0	10.0	1.0	20.0	0.6	3.0	9.1	0.6	0.78	0.65	0.10	0.46	2,209.00
	11.20	0.1	2.0	-	-	1.0	20.0	0.4	3.0	9.0	0.8	0.93	0.64	0.10	0.32	2,200.00

De acuerdo a las 2 primeras evaluaciones se puede determinar que el contenido de arsénico y plomo se reducen significativamente con el incremento del pH, a través de un proceso de neutralización y precipitación, utilizando CaO. La adición de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ como segunda etapa de precipitación reduce aun mas las concentraciones de arsenico y plomo en las soluciones tratadas.

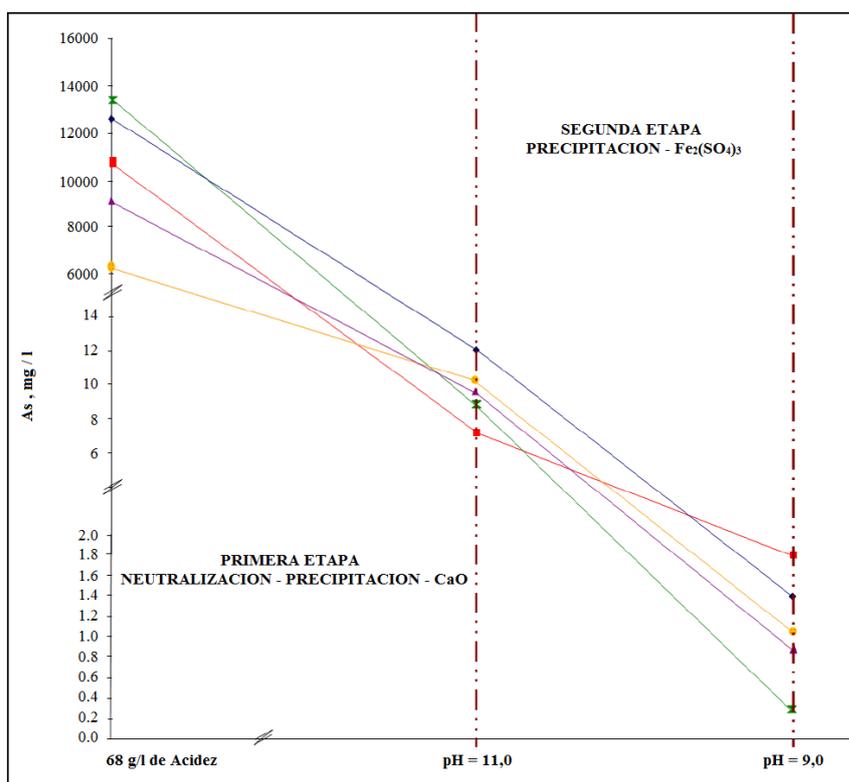


Figura 2.4 Influencia del pH y sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) en la remoción de arsénico de efluentes ácidos – resultado de la pruebas.

Ademas se puede concluir que el indice de consumo de cal y solidos en suspensión se mantuvo cercano durante la neutralizacion a pH 9, 10 y 11 como lo muestra la figura 2.5

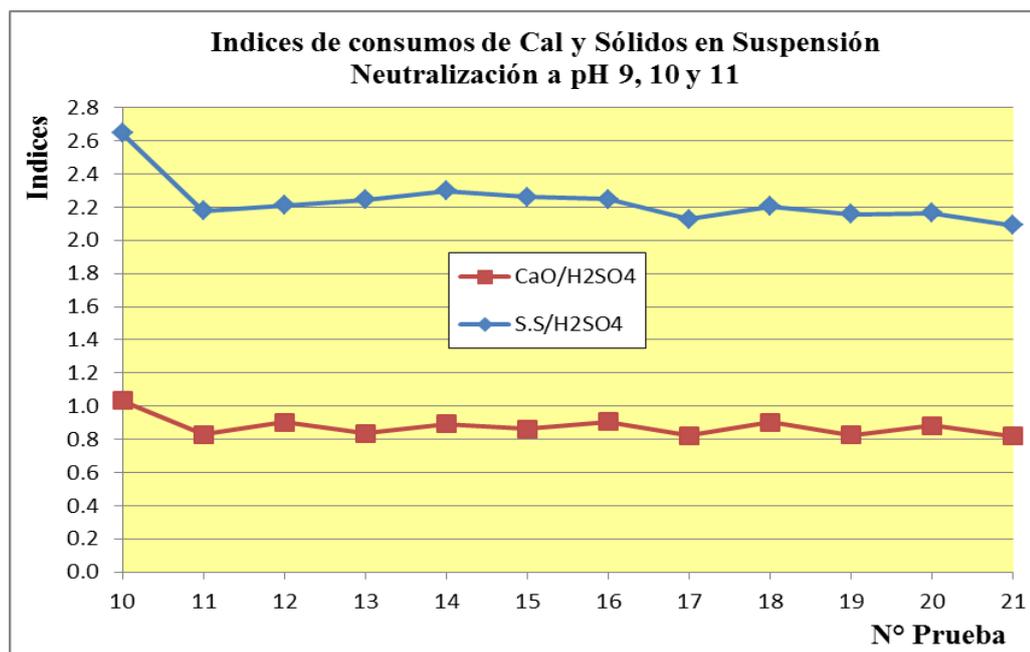


Figura 2.5 Índices de consumos de cal y sólidos en suspensión para las pruebas de neutralización a pH 9, 10 y 11.

2.3.3 Pruebas de sedimentación en las etapas de Neutralización y Precipitación con sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)

Se realizaron pruebas de sedimentación a las pulpas obtenidas en los procesos de neutralización a pH 11 y la precipitación con sulfato férrico, para poder determinar la curva de sedimentación de la pulpa en cada proceso y considerar sus resultados para el diseño de los espesadores.

2.3.3.1 Prueba de sedimentación en la etapa de Neutralización

Para el estudio tomaremos la pulpa resultante de la muestra P-16 (ver tabla 2.11), se utilizó 1.0 ml de floculante Flopam PHP-50 PLUS.

Peso sólido seco: 152.8 g

Densidad de pulpa: 1,092 g/l

pH: 11

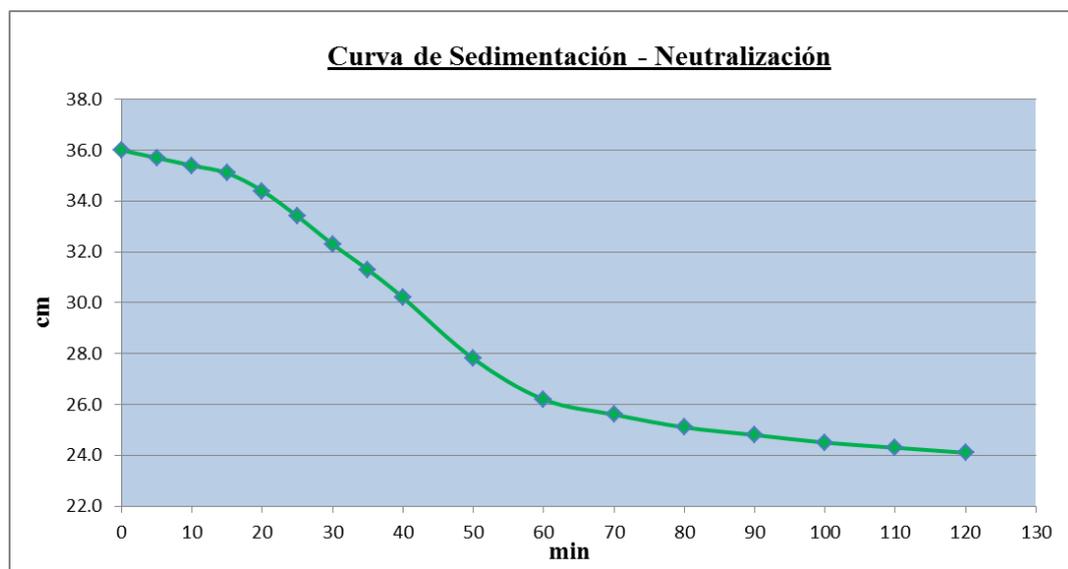


Figura 2.6 Prueba de sedimentación en la etapa de neutralización

En la figura 2.6 se grafica la velocidad de sedimentación vs el tiempo empleado, de la pulpa obtenida en el proceso de neutralización a pH 11. Se puede observar que el punto de quiebre para la zona de compresión está determinada por un tiempo promedio de 60 minutos.

2.3.3.2 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación con sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)

Para el estudio tomaremos la pulpa resultante de la muestra P-16 (ver tabla 2.13), se utilizó 1.0 ml de floculante Flopam PHP-50 PLUS.

Peso sólido seco: 0.5 g

Densidad de pulpa: 1,001 g/l

pH: 6 – 8

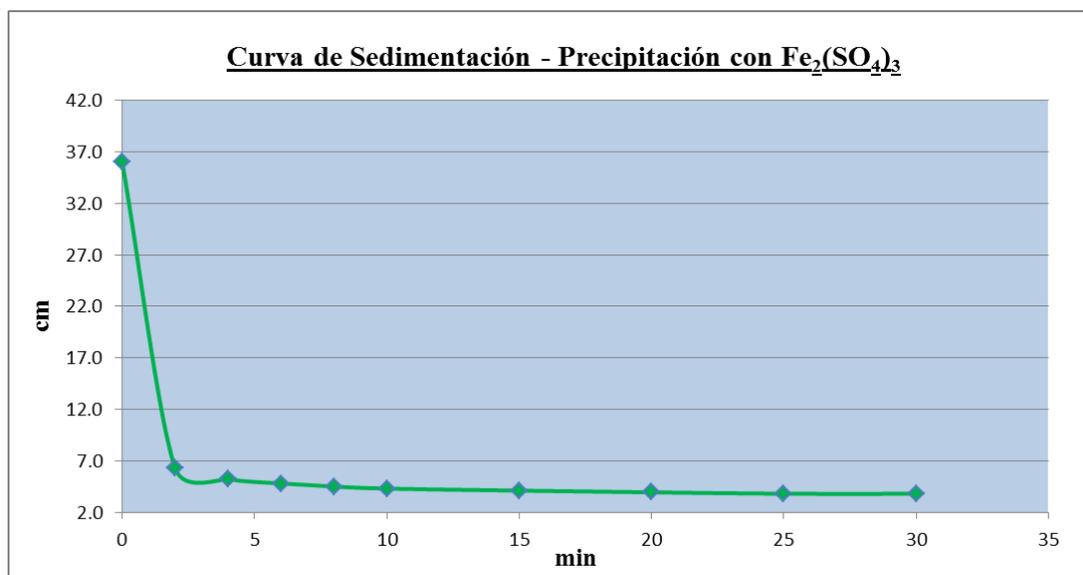


Figura 2.7 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

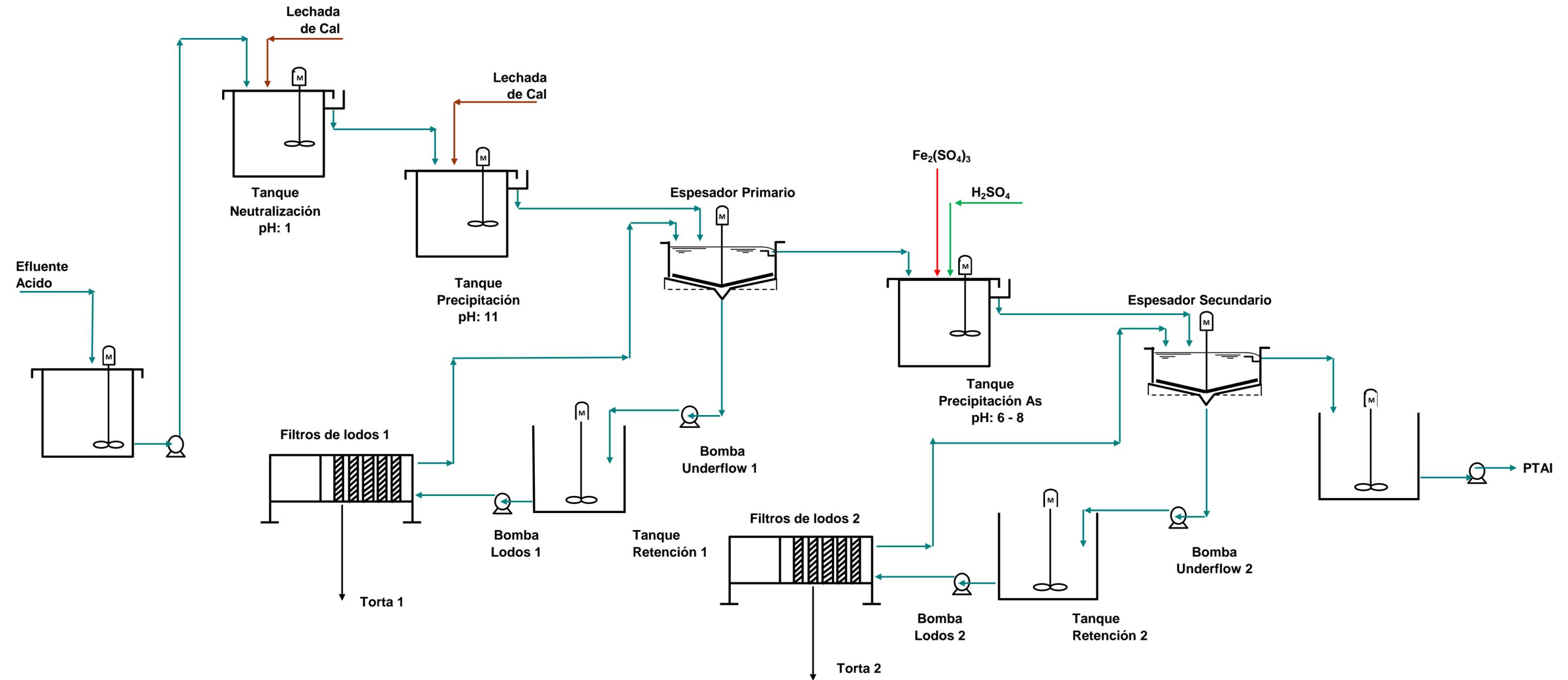
En la figura 2.7 se grafica la velocidad de sedimentación vs el tiempo empleado, de la pulpa obtenida en el proceso de precipitación usando sulfato férrico. Se puede observar que el punto de quiebre para la zona de compresión está determinada por un tiempo promedio de 2 minutos, debido principalmente al efecto coagulante del sulfato férrico, el cual promueve la formación de flóculos de mayor tamaño que precipitan a mayor velocidad.

2.3.4 Primera Alternativa

Considerando los resultados de las pruebas anteriores, se plantea una primera propuesta de diseño conceptual que consiste principalmente en dos etapas de proceso, la primera de neutralización – precipitación con cal a pH 11, y la segunda de precipitación con sulfato férrico a pH entre 6 y 8. El diseño considera también procesos de separación sólido – líquido usando espesadores y filtros prensa, donde las soluciones filtradas son recirculadas al proceso. Los niveles deseados de contenido de arsénico y plomo, así como las demás impurezas, están dentro del rango de operación de la planta de tratamiento de aguas industriales (ver anexo 1).

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la alternativa 1:

PRE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS
DIAGRAMA DE FLUJO
ALTERNATIVA 1



2.3.5 Neutralización a pH 2 y pH 11

Con los antecedentes de la primera evaluación, se realizaron nuevas pruebas considerando algunas conclusiones de las anteriores. Las características físico-químicas de las soluciones sintéticas de esta prueba fueron similares a las de las dos primeras evaluaciones. No se evaluó nuevos ratios de consumo de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ni NaOCl para poder determinar si, solo el uso de lechada de cal nos ayudaría a alcanzar los niveles deseados de contenido de arsénico y demás impurezas dentro del rango de operación de la planta de tratamiento de aguas industriales.

2.3.5.1 Neutralización a pH 2

Al evaluar el proceso de neutralización alcanzando solo un pH de 2 y favorecer el proceso con inyección de aire, buscamos encontrar un óptimo consumo de cal con la máxima disminución del contenido de metales (impurezas) para este proceso. Luego de ello vamos a realizar el proceso de separación sólido – líquido, y llevarlo a pH mayores (más básicos) con menos contenidos de metales en la solución y determinar las condiciones finales del efluente, que será procesado en la PTAI.

Tabla 2.14 Solución sintética – Tercera evaluación

Solucion Sintetica				
Prueba	Acidez	Ensayes (mg/l)		
N°	g/l	As	Pb	Zn
PA-16	68.00	10,900	10.80	215
PA-17	68.00	10,400	6.80	190
PA-22	68.00	11,900	3.70	186
PA-24	68.00	11,900	5.60	190

En la tabla 2.14 se observa que se mantiene el nivel de acidez de las pruebas anteriores, así como el alto contenido de arsénico en la solución.

Tabla 2.15 Neutralización a pH 2 – Tercera Evaluación

Neutralización									
Prueba	Solucion					Residuos			
	CaO	pH	Ensayes (mg/l)			S.S	Ensayes (%)		
N°	g/l	Fin	As	Pb	Zn	g/l	As	Pb	Zn
PA-16	45.00	1.90	8,300.00	2.80	149.00	127.50	2.90	0.05	0.02
PA-17	45.30	2.00	9,200.00	2.60	148.00	115.50	3.40	0.05	0.03
PA-22	45.00	1.90	8,300.00	3.60	139.00	125.50	2.90	0.07	0.04
PA-24	44.00	1.90	8,300.00	1.40	140.00	113.50	3.40	0.05	0.03

Observamos que la neutralización de las soluciones ácidas a un pH cercano a 2, obtenemos una reducción considerable (aunque no lo suficiente para ser evacuado a la PTAI) del contenido de arsénico, que llega en promedio a 8.3 g/l, una reducción aproximada del 30% con respecto al contenido inicial. En cambio, los contenidos de plomo y zinc, en el efluente neutralizado a pH 2, alcanzan los valores necesarios para ser tratados en la PTAI. El consumo promedio de cal fue de 45 g/l.

Tabla 2.16 Índices y porcentajes de contenidos metálicos en solución, después de la neutralización a pH 2 – Tercera Evaluación

Prueba	Neutralización				Precipitación	
	Indices	Indices	As (%)	Pb (%)	As (%)	Pb (%)
N°	CaO/H ₂ SO ₄	SS/H ₂ SO ₄	Solucion	Solucion	Solucion	Solucion
PA-16	0.6618	1.88	76.15	25.93	0.36	92.86
PA-17	0.6662	1.70	88.46	38.24	0.40	200.00
PA-22	0.6618	1.85	69.75	97.30	0.29	15.28
PA-24	0.6471	1.67	69.75	25.00	0.27	10.00

Al comparar los índices obtenidos por consumo de cal y sólidos en suspensión, de las diferentes pruebas, observamos que mantienen una cercanía en sus valores para la neutralización a pH 2, como se puede ver la figura 2.9

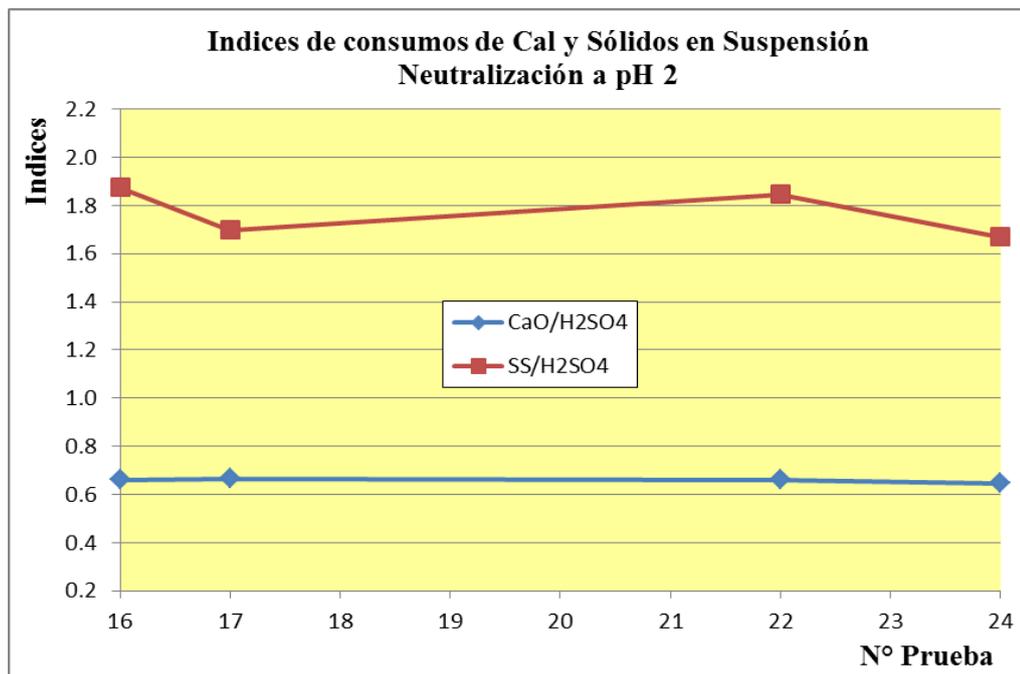


Figura 2.9 Índices de consumos de cal y sólidos en suspensión para las pruebas de neutralización a pH 2

2.3.5.2 Neutralización – Precipitación de Metales a pH 11.3

Las soluciones filtradas de las muestras de la prueba anterior (neutralización a pH 2) son llevadas a pH mayores cercanos a 11.3 donde después de un tiempo de agitación con aire y consumo de cal, observamos que los contenidos de arsénico, plomo y demás impurezas alcanzan reducciones satisfactorias a las condiciones que estamos buscando. La reducción de los contenidos de arsénico y plomo alcanzan porcentajes mayores al 95% con concentraciones promedio de 25 mg/l de arsénico y 0.5 mg/l de plomo, con lo cual el efluente pre-tratado alcanza las condiciones necesarias para ser evacuado y procesado en la planta de tratamiento de aguas industriales.

Tabla 2.17 Neutralización – Precipitación a pH 11.3 – Tercera Evaluación

Precipitación									
Prueba	Solucion					Residuos			
	CaO	pH	Ensayes (mg/l)			S.S	Ensayes (%)		
N°	g/l	Fin	As	Pb	Zn	g/l	As	Pb	Zn
PA-16	17.50	11.80	29.90	2.60	6.40	43.00	29.30	0.01	0.44
PA-17	16.00	12.20	36.50	5.20	5.00	37.00	24.00	0.01	0.38
PA-22	16.00	11.50	24.40	0.55	0.40	33.50	26.70	0.02	1.00
PA-24	14.00	11.40	22.30	0.14	0.40	32.50	28.00	0.02	0.48

2.3.6 Pruebas de sedimentación en las etapas de Neutralización a pH 2 y Precipitación a pH 11.3

Se realizaron pruebas de sedimentación a las pulpas obtenidas en los procesos de neutralización a pH 2 y neutralización- precipitación a pH 11.3, usando cal para ambos procesos; estas pruebas nos permitirán obtener la curva de sedimentación de la pulpa en cada proceso y considerar sus resultados para el diseño de los espesadores.

2.3.6.1 Prueba de sedimentación en la etapa de Neutralización a pH 2

Para el estudio tomaremos la pulpa resultante de la muestra P-24 (ver tabla 2.15), se utilizó 2.0 ml de floculante Flopam PHP-50 PLUS.

Peso sólido seco: 113.5 g

Densidad de pulpa: 1,095 g/l

pH: 2

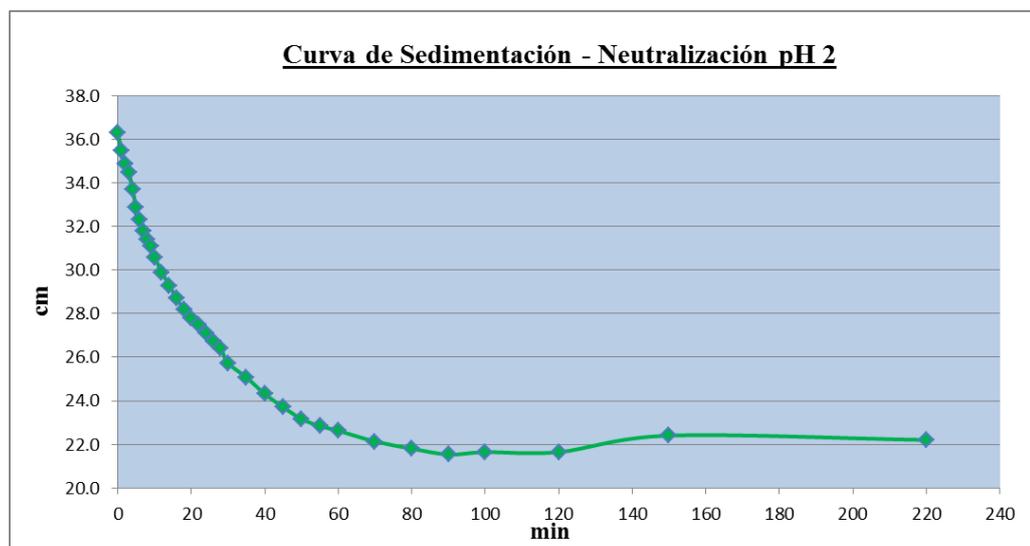


Figura 2.10 Prueba de sedimentación en la etapa de neutralización a pH 2

En la figura 2.10 se grafica la velocidad de sedimentación vs el tiempo empleado, de la pulpa obtenida en el proceso de neutralización a pH 2. Se puede observar que el punto de quiebre para la zona de compresión está determinada por un tiempo promedio de 50 minutos.

2.3.6.2 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación a pH 11.3

Para el estudio tomaremos la pulpa resultante de la muestra P-24 (ver tabla 2.17), se utilizó 1.5 ml de floculante Flopam PHP-50 PLUS.

Peso sólido seco: 32.5 g

Densidad de pulpa: 1,040 g/l

pH: 11.3

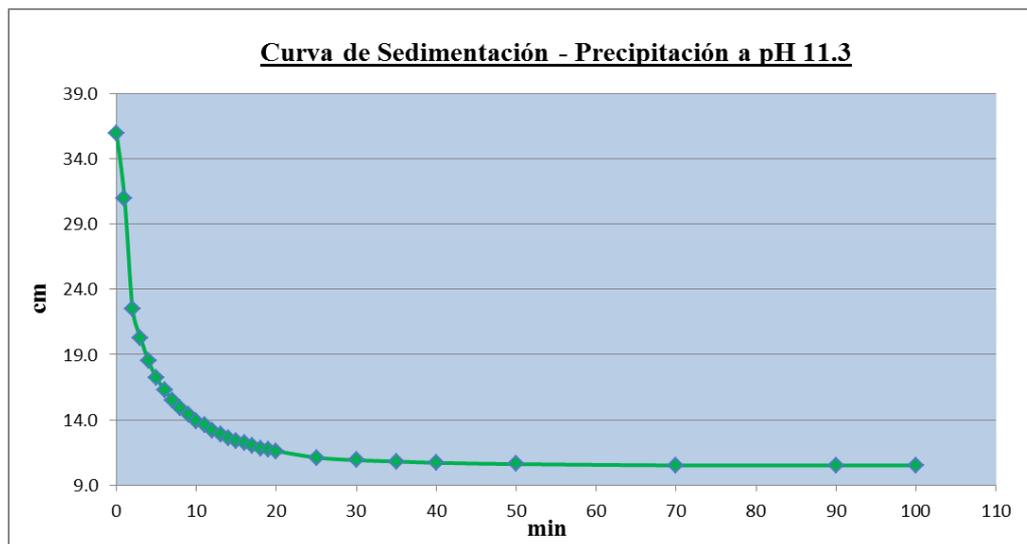


Figura 2.11 Prueba de sedimentación en la etapa de Precipitación a pH 11.3

En la figura 2.11 se grafica la velocidad de sedimentación vs el tiempo empleado, de la pulpa obtenida en el proceso de neutralización-precipitación a pH 11.3. Se puede observar que el punto de quiebre para la zona de compresión está determinada por un tiempo promedio de 9 minutos.

2.3.7 Segunda Alternativa

Considerando los resultados de las pruebas anteriores, se plantea una segunda propuesta de diseño conceptual que consiste principalmente en dos etapas de proceso, la primera de neutralización con cal a pH 2, y la segunda neutralización-precipitación con cal a pH 11.3; ambos procesos con inyección de aire. El diseño considera también procesos de separación sólido – líquido usando espesadores y filtros prensa, donde las soluciones filtradas son recirculadas al proceso. Los niveles deseados de contenido de arsénico y plomo, así como las demás impurezas, están dentro del rango de operación de la planta de tratamiento de aguas industriales (ver anexo 2).

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la alternativa 2:

**PRE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS
DIAGRAMA DE FLUJO
ALTERNATIVA 2**

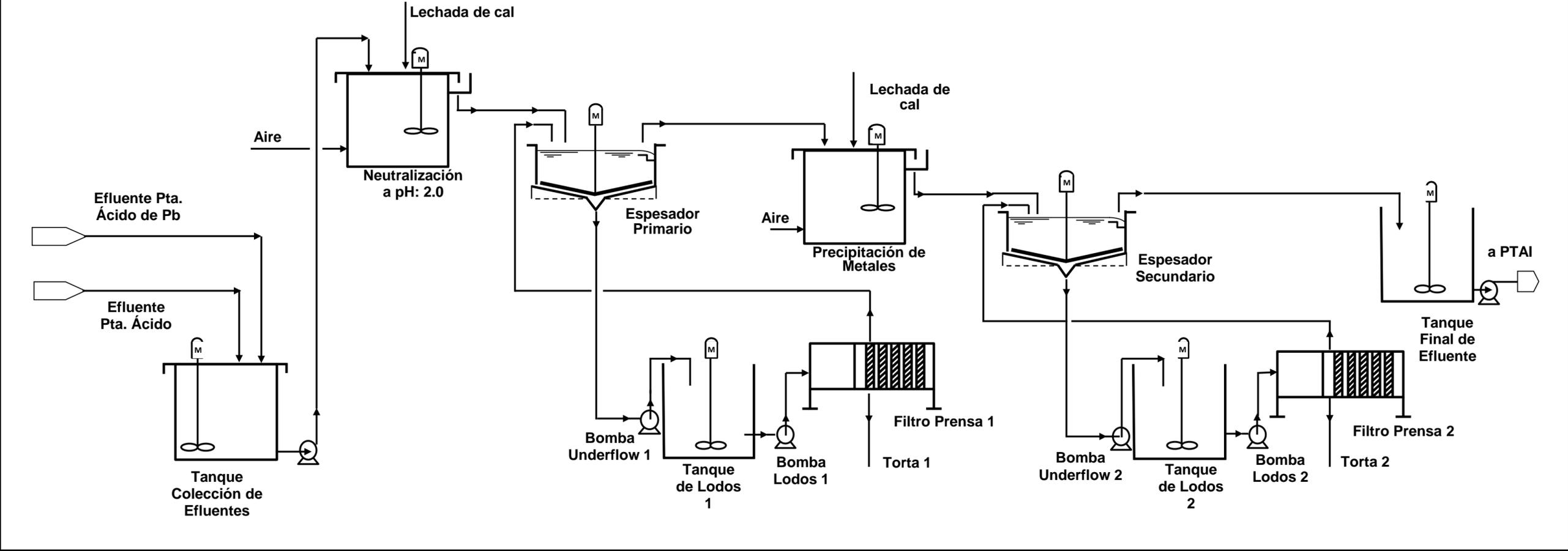


Figura 2.12 Diagrama de Flujo - Alternativa 2

2.4 Evaluación de Alternativas – Ingeniería Conceptual

Para la determinación de la Ingeniería Conceptual de la planta de pre-tratamiento de efluentes líquidos de las plantas de ácido sulfúrico debemos de comparar los resultados de parámetros de proceso obtenidos en los balances de materia para ambas alternativas de diseño (ver anexo 1 y 2).

Tabla 2.18 Análisis comparativo de Alternativas de Diseño

Parámetros de proceso	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Max. Entrada PTAI
Flujo Final	m ³ /h	63.98	63.34	100.8
Disposición de Sólidos	TMD	143.30	139.63	-
Consumo de cal	TMD	56.09	53.94	-
Consumo de Fe ₂ (SO ₄) ₃	TMD	0.85	-	-
Arsénico (disuelto)	mg/l	4.15	8.54	18.9
Plomo (disuelto)	mg/l	11.43	4.23	22.7

De la tabla 2.18 podemos concluir, principalmente, que el flujo y los contenidos de arsénico y plomo en los efluentes pre-tratados son menores a los valores de los efluentes tratados en la planta de tratamiento de aguas industriales (Max. Entrada PTAI) y por lo tanto ambos diseños cumplen el objetivo del presente estudio.

Sin embargo, debemos de tener en consideración factores esenciales para la operación de la planta, tales como: la disposición de emisiones solidas (filtros prensa) y mayor consumo de reactivos. Es importante considerar que los efluentes solidos del proceso contienen compuestos de sulfato de calcio e hidróxidos de los metales en estudio, con porcentajes de arsénico y plomo, así como compuestos de arseniato de calcio con mayor contenido de arsénico en su composición; de tal forma que estos serán almacenados en depósitos diseñados especialmente para la conservación de estos compuestos.

Por lo tanto, de acuerdo a las consideraciones señaladas anteriormente, se concluye que el diseño propuesto en la alternativa 2, nos permitirá tener menor cantidad de

efluentes sólidos a manipular y almacenar, además de tener un menor consumo de cal por su optimización en el proceso de neutralización y precipitación; y el efluente procesado cumple con los valores requeridos para ser tratado en la planta de tratamiento de aguas industriales. El diseño considerado y los cálculos estudiados en la alternativa 2 será considerada como la ingeniería conceptual de la planta de pre-tratamiento de efluentes líquidos de las plantas de ácido sulfúrico.

2.4.1 Descripción del tratamiento planteado para la mezcla de efluentes de las Plantas de Ácido Sulfúrico

2.4.1.1 Descripción del proceso

Los efluentes líquidos ácidos provenientes de las plantas de ácido de cobre y plomo serán recepcionados en un tanque colector de efluentes con sistema de agitación. Mediante bombas centrifugas el efluente homogenizado será entregado en cantidades controladas a la siguiente etapa del proceso.

2.4.1.2 Neutralización

El proceso de neutralización del efluente se lleva a cabo en un tanque metálico con revestimiento antiácido y sistema de agitación, el cual dispone de líneas de ingreso de lechada de cal y aire de proceso.

El efluente ingresante con un promedio de acidez de 48,2 g/l será neutralizado mediante la adición de lechada de cal equivalente al 12% en peso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, alcanzando un pH final de 2, con un tiempo de procesamiento de 60 minutos y una agitación de 85 RPM. El aire de proceso será inyectado al interior del tanque para prevenir la acumulación de sólidos en el fondo y para promover la oxidación del As^{+3} a As^{+5} , facilitando su precipitación.

El efluente neutralizado es transferido por rebose hacia un espesador primario metálico, el cual dispone de un sistema de transmisión y control automático de torque; se adiciona floculante para lograr la sedimentación de los sólidos, obteniéndose una solución de rebose (overflow) que pasa a la siguiente etapa del

proceso y una pulpa densa (underflow) que será extraída mediante un sistema de filtrado.

2.4.1.3 Precipitación

El overflow del espesador primario es transferido por rebose hacia un tanque metálico con revestimiento antiácido, en donde se realiza el proceso de precipitación de metales pesados mediante lechada de cal hasta alcanzar un pH de 11.3, logrando la precipitación de los hidróxidos metálicos y del arsénico en forma de arsenatos con un tiempo de procesamiento de 60 minutos. Aire de proceso también será inyectado en el interior del tanque.

La pulpa es transferida por rebose hacia un espesador secundario metálico, obteniéndose una solución clarificada (overflow) que constituye el efluente final de la planta, el cual es almacenado en un tanque metálico para finalmente ser enviado mediante una bomba centrífuga a la Planta de Tratamiento de Aguas Industriales; mientras que el underflow del espesador será enviado al sistema de filtrado.

2.4.1.4 Filtración en la Neutralización

Un sistema filtrado compuesto por las bombas de evacuación de lodos del espesador primario, un tanque de lodos con sistema de agitación, las bombas de alimentación al filtro y el compresor para abastecimiento de aire es requerido para esta etapa. El residuo obtenido conformado por sulfato de calcio (Gypsum - CaSO_4), con una humedad aproximada de 45% y un contenido de As de 1.5% el cual será transportado a una nueva poza impermeabilizada para su almacenamiento final, mientras que la solución filtrada es retornada al espesador primario.

2.4.1.5 Filtración en la Precipitación

Un sistema filtrado compuesto por las bombas de evacuación de lodos del espesador secundario, un tanque de homogenización con un sistema de agitación, las bombas de alimentación al filtro y el compresor para abastecimiento de aire, es requerido para esta etapa. El residuo obtenido conformado por arseniato de calcio con una humedad aproximada de 45% y un contenido de As de 14.1%, el cual será

transportado hacia las pozas de almacenamiento de VADO, mientras que la solución filtrada es retornada al espesador secundario.

2.4.2 Monitoreo ambiental para la planta de pre-tratamiento de efluentes líquidos de las Plantas de Ácido Sulfúrico

El monitoreo ambiental para la planta de pre-tratamiento constara básicamente en el control de los niveles de impurezas de sus efluentes, las cuales serán los sólidos filtrados y el efluente líquido pre-tratado que será descargado a la PTAI; las soluciones filtradas serán recirculados al sistema y no permitirá emisiones fugitivas.

El diseño de la planta considera instrumentos de control que aseguran el control de los niveles de impurezas en los efluentes líquidos, así mismo permiten que la operación cumpla con emitir un efluente líquido con las condiciones adecuadas para que sea tratado en la PTAI. Los sólidos serán almacenados en espacios impermeabilizados y construidos especialmente para el almacenamiento de solidos con altos contenidos de arsénico y plomo.

La planta de pre-tratamiento de efluentes ácidos contribuirá a que la PTAI emita efluentes líquidos de acuerdo a las normas establecidas en el Decreto Supremo para límites máximos permisibles de efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM).

El presente estudio no detalla el plan de manejo ambiental para la planta de pre-tratamiento, debido que esto se desarrollará a profundidad en la ingeniería de detalle y etapa construcción, previo a las pruebas de arranque de planta.

CONCLUSIONES

1. El tratamiento previo o pre-tratamiento de los efluentes líquidos de las plantas de ácido sulfúrico consistirá en procesos de neutralización a PH 2,0 (en un periodo de 60 minutos) y neutralización-precipitación a pH 11,3 (en un periodo de 60 minutos). El proceso también incluirá etapas de separación solido-líquido y filtrado, para el manejo de los efluentes sólidos (precipitación de impurezas), las soluciones filtradas serán recirculadas al proceso.
2. La planta de pre-tratamiento de efluentes líquidos de las plantas de ácido sulfúrico procesará efluentes con altas concentraciones de acidez e impurezas, niveles de 4.5 g/l de arsénico, 170 mg/l de plomo y 50 g/l de acidez; estas concentraciones son reducidas en la planta de pre-tratamiento hasta niveles de 8,5 mg/l de arsénico, 4.3 mg/l de plomo y pH alrededor de 11; los efluentes pre-tratados contiene niveles de impurezas menores a los efluentes tratados en la PTAI. El flujo de la planta de pre-tratamiento es de 63.3 m³/h y no es un factor condicionante en la recepción de efluentes de la PTAI, ya que la capacidad de recepción, adicional a la actual, es de 100.8 m³/h.
3. Los niveles de plomo, zinc y fierro son eficazmente reducidos en la etapa de neutralización a pH 2, óptimos para el procesamiento en la planta de tratamientos de aguas industriales. El proceso de precipitación a pH de 11,3 es principalmente para la precipitación del arsénico en la solución. Se descarta el uso de sulfato férrico o hipoclorito de sodio para la precipitación del arsénico, las pruebas determinaron que el uso de lechada de cal al 12%, fue suficiente para alcanzar los valores de arsénico disueltos en la solución, necesarios para ser tratados en la planta de tratamiento de aguas industriales.
4. Los precipitados generados en la planta de pre-tratamiento serán enviados a las pozas especiales de almacenamientos, diseñados para residuos de efluentes ácidos con altas concentraciones de impurezas como arsénico y plomo.

BIBLIOGRAFIA

S.H. Castro, F. Vergara y M.A. Sanchez. Departamento de Ingeniería Metalúrgica –
Universidad de Concepción, Chile

Tecnología Limpia para la Industria Minero Metalúrgica

Exposiciones de Medio Ambiente y Minería (9-12 Junio 1997) pag.59

Primer Simposio Nacional de Medio Ambiente y Seguridad Minera

Colegio de Ingenieros del Perú

E. Vircikova, P. Palfy. Faculty of Metallurgy - Technical University Kosice,
Slovakia

Arsenic Abatement from Smelter Gases

Effluent Treatment in the Mining Industry, Charter 4 Pag. 163

Department of Metallurgical Engineering

University of Concepción – Chile

Ramana G. Reddy, V. Ramachandran.

Arsenic Metallurgy

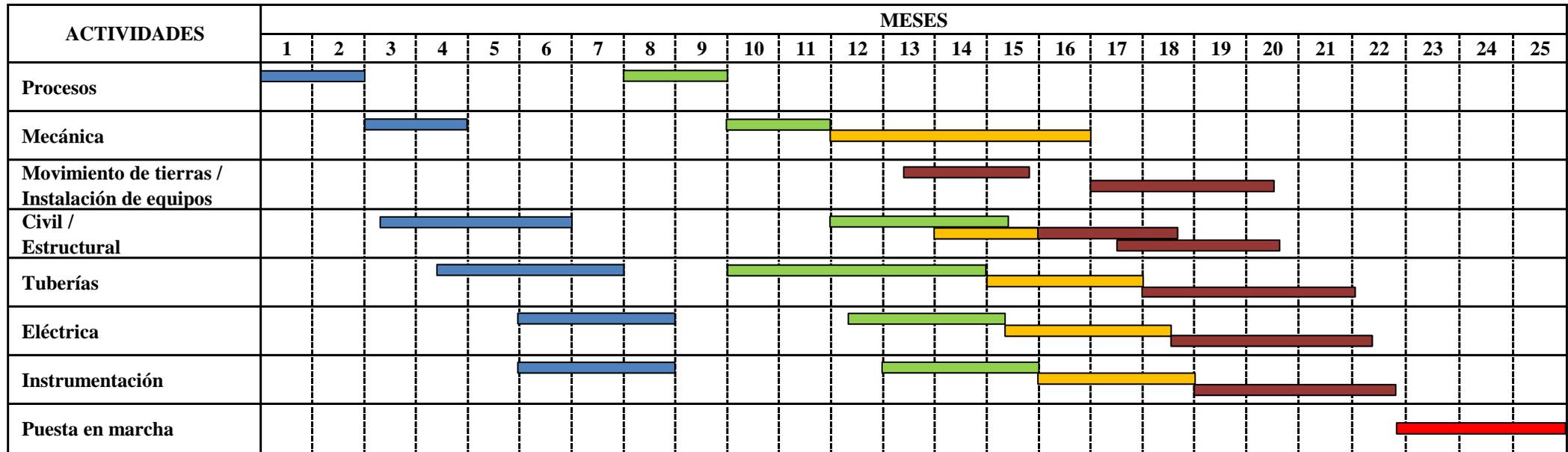
Editorial Publication of the Minerals, Metal & Materials Society. 2005

Pedro A. Sanhueza H.

Evaluación de Beneficios de una Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre

Febrero, 2012. Pag. 24

Cronograma de Actividades
Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Líquidos de Plantas de Ácido Sulfúrico



- Ingeniería Básica
- Ingeniería de Detalle
- Procura
- Construcción
- Comisionamiento

Estimación de Presupuesto - Alternativa 1

Proyecto:

Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Líquidos de Plantas de Ácido Sulfúrico

Componente	Costo
Costos Directos	\$ 6,673,145
Obras civiles + Estructuras	\$ 798,217
Equipos Mecánicos	\$ 4,954,574
Instrumentación y Control	\$ 225,565
Tuberías, valvulas y accesorios	\$ 192,168
Equipos Eléctricos	\$ 294,436
Ladrillos y Morteros antiácidos	\$ 208,184
Costos Indirectos	\$ 2,710,083
Ingeniería	\$ 412,160
Costos del dueño	\$ 134,553
Embalaje	\$ 704,991
Transporte internacional e impuestos	\$ 881,239
Transporte local	\$ 469,994
Almacen, comunicaciones	\$ 107,145
Total Costos Directos e Indirectos	\$ 9,383,228
Contingencia	\$ 2,814,968
Total Inversión	\$ 12,198,196

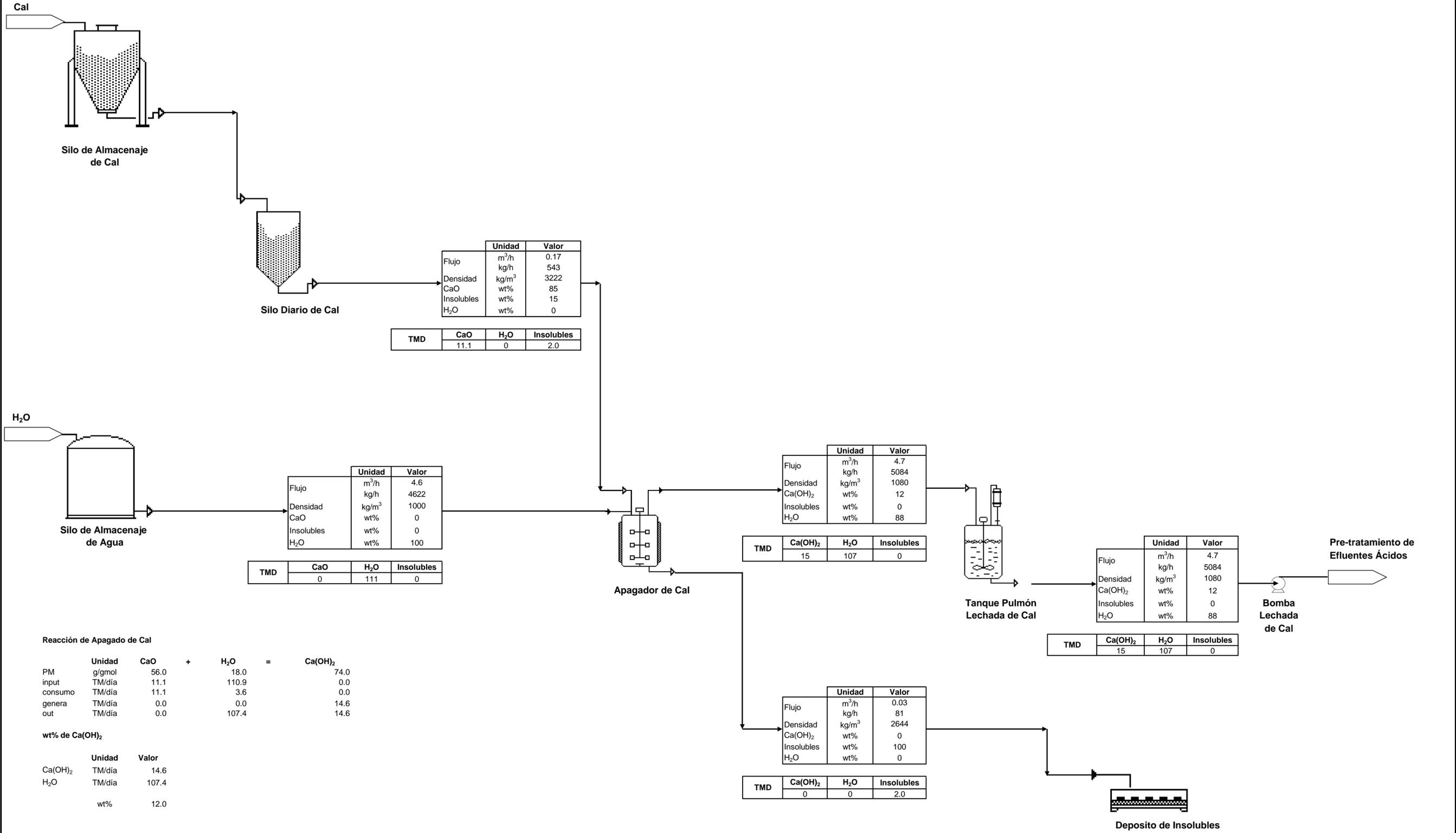
Estimación de Presupuesto - Alternativa 2

Proyecto:

Planta de Pre-Tratamiento de Efluentes Líquidos de Plantas de Ácido Sulfúrico

Componente	Costo
Costos Directos	\$ 6,228,128
Obras civiles + Estructuras	\$ 744,986
Equipos Mecánicos	\$ 4,624,165
Instrumentación y Control	\$ 210,523
Tuberías, valvulas y accesorios	\$ 179,353
Equipos Eléctricos	\$ 274,801
Ladrillos y Morteros antiácidos	\$ 194,300
Costos Indirectos	\$ 2,529,354
Ingeniería	\$ 384,674
Costos del dueño	\$ 125,580
Embalaje	\$ 657,977
Transporte internacional e impuestos	\$ 822,471
Transporte local	\$ 438,651
Almacen, comunicaciones	\$ 100,000
Total Costos Directos e Indirectos	\$ 8,757,482
Contingencia	\$ 2,627,245
Total Inversión	\$ 11,384,727

PLANTA - PREPARACIÓN LECHADA DE CAL
 DIAGRAMA DE FLUJOS
 BALANCE DE MATERIA



Reacción de Apagado de Cal

	Unidad	CaO	+	H ₂ O	=	Ca(OH) ₂
PM	g/gmol	56.0		18.0		74.0
input	TM/día	11.1		110.9		0.0
consumo	TM/día	11.1		3.6		0.0
genera	TM/día	0.0		0.0		14.6
out	TM/día	0.0		107.4		14.6

wt% de Ca(OH)₂

	Unidad	Valor
Ca(OH) ₂	TM/día	14.6
H ₂ O	TM/día	107.4
	wt%	12.0

**PRE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS
BALANCE DE MATERIA - ALTERNATIVA 2**

