

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**“INCORPORACIÓN DE NUEVA ALTERNATIVA  
TECNOLÓGICA, EN PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES, DIVISIÓN EL  
TENIENTE”.**

Alumno: **Miguel González V.**  
Profesor: **Horacio Aros M.**

**SEPTIEMBRE 2007**

## RESUMEN

Las Plantas de Tratamiento de Efluentes (PTE), de la Fundición Caletones, procesan los residuos líquidos de las Plantas de Limpieza de Gases (PLG), de forma de estabilizar las impurezas contenidas y generar residuos que cumplan con las regulaciones medioambientales.

Actualmente, se encuentra en vigencia un nuevo reglamento ambiental (Decreto 148), el cual indica que los residuos sólidos, que son generados por las PTE, son considerados como peligrosos, por lo que estos desechos deben ser externalizados para su inertización, generando gastos importantes por este concepto. Por otro lado, además, se han identificado una serie de inconvenientes operacionales, que llevan que las capacidades de ambas Plantas se vean sobrepasadas debido a la falta de holguras para flexibilizar la operación.

Este trabajo de titulación, nace a partir de estos requerimientos y por tal razón se ha orientado a conocer, analizar y proponer acciones para la adecuación de las PTE con el objeto de detectar oportunidades de mejora al proceso. Como primer paso, se estructuró un modelo de balance de masa para ambas Plantas, que permitió simular el comportamiento operacional actual, analizar los efectos de modificar las variables claves e inferir posibles resultados al intervenir el proceso. Adicionalmente, se incorporó una alternativa similar a la empleada en la Planta de Efluentes de Huelva, España, que tiene la particularidad de generar un residuo no peligroso potencialmente comercializable, y otro con las impurezas del efluente ácido.

Según lo anterior, es posible hacer una extracción del 65% del total de los lodos generados en la actualidad, lo cual permitiría bajar los costos de tratamiento en un 56%. Para llevar a cabo la iniciativa, se requiere una inversión de kUS\$ 5.455 produciendo cerca de 19 kton/año de yeso. Los indicadores económicos del proyecto de un VAN de kUS\$ 2.386 y una TIR 17%, indican lo atractivo de la materialización de la nueva incorporación en las Plantas de Efluentes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a dar este paso, y así comenzar una etapa aún más enriquecedora.

No es fácil llegar, se necesita ahínco, lucha y deseo, pero sobre todo voluntad de superación ante las diversas situaciones, que nos pone la vida, y que para poder superarlos es necesario contar con convicción en nuestros ideales.

Agradezco primeramente a Dios, y la Virgen, por entregarme la fortaleza, y ayudarme a levantar en los momentos difíciles, acompañándome en este largo camino.

El paso a través de la Universidad, no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia. Gracias a mis padres, Maria y Miguel, por su infinito esfuerzo realizado, y por inculcarme valores para ser una persona de bien. A mi hermano Esteban, quien me entregó, todo su apoyo en todo sentido, y que sin su ayuda no habría sido posible, lograr mi objetivo. A mi hermano Claudio, por su cariño y alegría.

Al Profesor Horacio Aros, por asesorarme, y acompañarme en este camino, que hoy culmina, y cuyos comentarios y críticas me enseñaron más allá de lo meramente académico.

A la Escuela de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, representada por todos sus docentes y funcionarios, que me otorgaron su apoyo en los años de estudio.

A Don Jorge Godoy y las personas pertenecientes a Codelco-Chile, División El Teniente, quienes me brindaron su ayuda desinteresada, para desarrollar mi Trabajo de Titulación.

# INDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	4
1.3 ALCANCES Y METODOLOGÍA	5
1.4 ANTECEDENTES GENERALES DE FUNDICIÓN CALETONES	6
1.4.1 <i>Sistema de Manejo de Gases</i>	9
1.4.2 <i>Tratamiento de los gases en Plantas de Limpieza de Gases</i>	12
1.4.3 <i>Plantas de tratamiento de efluentes</i>	15
<b>CAPITULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE ÁCIDO</b>	<b>18</b>
2.1 GENERACIÓN DE POLVOS EN FUNDICIÓN	19
2.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS EN EL EFLUENTE	20
2.2.1 <i>Comportamiento de Elementos relevantes</i>	21
2.3 ANÁLISIS DE SOLUBILIDAD	29
<b>CAPITULO 3 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES</b>	<b>32</b>
3.1 ETAPAS PRINCIPALES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	33
3.1.1 <i>Preparación de Lechada de Cal</i>	33
3.1.2 <i>Neutralización del Ácido Sulfúrico</i>	33
3.1.3 <i>Precipitación de los iones metálicos</i>	34
3.1.4 <i>Precipitación final de Arsénico</i>	35
3.1.5 <i>Secado y Calcinación</i>	36
3.2 PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	40
3.2.1 <i>Normativa actual</i>	41
3.2.2 <i>Comparación entre diseño operación</i>	42
3.3 MUESTREOS A LAS PTE'S	48
<b>CAPITULO 4 BALANCES DE MASA Y ENERGIA DE PTE'S</b>	<b>52</b>
4.1 ETAPA DE NEUTRALIZACIÓN PTE N°2	53
4.1.1 <i>Balance de masa</i>	53
4.1.2 <i>Balance de energía</i>	63
4.1.3 <i>Entalpías de Reacción</i>	63
4.2 ETAPA DE CALCINACIÓN	64
4.3.1 <i>Resultados Balance PTE 2</i>	66
4.3.2 <i>Resultados balance PTE 1</i>	68
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	69

<b>CAPITULO 5 ANÁLISIS DE CONDICIONES ACTUALES DE LAS PTE'S .....</b>	<b>71</b>
5.1 BASES DE DATOS.....	72
5.2 DATOS OPERATIVOS .....	74
5.2.1 <i>Flujos de las PTE's</i> .....	74
5.2.2 <i>pH de operación</i> .....	76
5.3 COMPORTAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	78
5.4 SIMULACIÓN DE LAS PLANTAS ACTUALES .....	83
<b>CAPITULO 6 ANÁLISIS DE PROCESOS ALTERNATIVOS .....</b>	<b>87</b>
6.1 DESCRIPCIÓN DE PLANTA ATLANTIC COOPER .....	88
6.1.1 <i>Instalaciones de Planta Huelva</i> .....	91
6.1.2 <i>Estudio del Proceso Huelva</i> .....	93
6.2 FUNDICIÓN CUMERIO.....	98
6.2.1 <i>Descripción de Planta Cumerio</i> .....	100
<b>CAPITULO 7 ANÁLISIS DE ADECUACIÓN A LAS PTE'S.....</b>	<b>102</b>
7.1 EVALUACIÓN PRELIMINAR .....	103
7.2 COMPARACIÓN ENTRE FUNDICIÓN ATLANTIC COOPER Y CALETONES.....	105
7.3 ANÁLISIS DE MODIFICACIONES BUSCADAS.....	106
7.4 ESTUDIO PREELIMINAR DE MODIFICACIONES.....	110
7.4.1 <i>Producto obtenido</i> .....	110
7.4.2 <i>pH de operación</i> .....	113
7.5 MUESTREOS DE PRECIPITACIÓN DE YESO .....	116
<b>CAPITULO 8 MODELACIÓN DE LAS PTE'S ADECUADAS .....</b>	<b>119</b>
8.1 ESTRUCTURA GENERAL DE MODIFICACIÓN .....	120
8.2 BALANCES DE MASA A PRODUCCIÓN DE YESO .....	123
8.3 RESULTADOS DE LA MODIFICACIÓN .....	129
8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	131
<b>CAPITULO 9 ESTIMACIÓN DE EQUIPOS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA .....</b>	<b>133</b>
9.1 DIMENSIONAMIENTO GENERAL DE EQUIPOS.....	134
9.2 COSTOS ASOCIADOS .....	138
9.2.1 <i>Capital de Inversión</i> .....	138
9.2.2 <i>Costos de Producción</i> .....	139
9.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	140
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>145</b>
<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>148</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>150</b>

**ABREVIATURAS.....152**

ANEXO 1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO .....	154
A.1.1 <i>Muestreo a la Planta</i> .....	154
A.1.2 <i>Muestreo a Planta para ajuste de modelo</i> .....	156
A.1.3 <i>Muestreo a Calcinado para comparación de Test EPA (PTE 1)</i> .....	157
A.1.4 <i>Muestreo a Calcinado para comparación de Test EPA (PTE 2)</i> .....	158
A.1.5 <i>Muestreo a Calcinado en PTE's</i> .....	159
A.1.6 <i>Resultados de muestreos de producción de yeso</i> .....	160
A.1.7 <i>Imágenes de las muestras tomadas</i> .....	161
ANEXO 2 AJUSTES REALIZADOS AL MODELO DE LA PTE 2 .....	165
ANEXO 3 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PTE 2 .....	167
ANEXO 4 COTIZACIONES.....	174
ANEXO 5: RESUMEN BALANCES DE MASA Y ENERGÍA.....	179
A.5.1 <i>Balance de Masa Etapa de Neutralización PTE 2</i> .....	179
A.5.2 <i>Balance de Masa Etapa de Calcinación PTE 2</i> .....	186
A.5.3 <i>Balance de Energía Neutralización PTE 2</i> .....	189
A.5.4 <i>Balances de Masa Etapa de Precipitación de Yeso</i> .....	196

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE EFLUENTE PLG N°2.....	20
TABLA 2-2: PORCENTAJES DE AS EN EFLUENTE.....	23
TABLA 2-3: DATOS TERMODINÁMICOS.....	29
TABLA 2-4: DATOS TERMODINÁMICOS DE $PbSO_4$ .....	30
TABLA 3-1: CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMITIDAS PARA EL TEST EPA.....	42
TABLA 3-2: COMPARACIÓN SITUACIÓN DISEÑO CON ACTUAL (PTE 1).....	43
TABLA 3-3: COMPARACIÓN SITUACIÓN DISEÑO CON ACTUAL (PTE 2).....	43
TABLA 3-4: RESULTADOS DE MUESTREOS A PLANTAS.....	48
TABLA 3-5: DISTRIBUCIÓN DE PLOMO EN EFLUENTE DE LAS PLG'S.....	50
TABLA 3-6: RESULTADOS MUESTRA DE TEST EPA DE PTE 1.....	51
TABLA 3-7: RESULTADOS MUESTRA DE TEST EPA DE PTE 2.....	51
TABLA 4-1: ANTECEDENTES DE DISEÑO DE LA PTE 2.....	53
TABLA 4-2: : RELACIONES ENTRE CAL Y COMPUESTOS.....	57
TABLA 4-3: ENTALPÍAS ESTÁNDAR DE REACCIÓN DE ETAPA DE NEUTRALIZACIÓN.....	64
TABLA 4-4: ENTALPÍAS ESTÁNDAR DE REACCIÓN DE ETAPA DE CALCINACIÓN.....	66
TABLA 4-5: COMPARACIÓN AGUA TRATADA (PTE2).....	67
TABLA 4-6: COMPARACIÓN CALCINADO (PTE 2).....	67
TABLA 4-7: COMPARACIÓN INSUMOS (PTE 2).....	68
TABLA 4-8: COMPARACIÓN AGUA TRATADA Y CALCINADO (PTE 1).....	68
TABLA 4-9: COMPARACIÓN INSUMOS (PTE 1).....	69
TABLA 5-1: PROMEDIO ANALISIS TEST EPA, 2006.....	78
TABLA 5-2: PROMEDIO ANALISIS QUIMICO A CALCINADO, 2006.....	80
TABLA 5-3: RESULTADOS COMPARACIÓN DATOS REALES VS MODELO, PTE1.....	84
TABLA 5-4: RESULTADOS COMPARACIÓN DATOS REALES VS MODELO, PTE2.....	85
TABLA 6-1: PARÁMETROS PLANTA DE PRODUCCIÓN DE YESO, HUELVA.....	92
TABLA 6-2: PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN EN PLANTA DE EFLUENTES, HUELVA.....	96
TABLA 6-3: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A PARTIR DE VARIAS CONCENTRACIONES.....	97
TABLA 6-4: TIEMPO DE RESIDENCIA.....	97
TABLA 6-5: TEMPERATURA DE REACCIÓN.....	98

TABLA 7-1: COMPARACIÓN ENTRE FUNDICIÓN ATLANTIC COOPER Y CALETONES .....	105
TABLA 7-2: PARÁMETROS DE OPERACIÓN PTE 2, 2005 .....	111
TABLA 7-3: CANTIDAD DE YESO TEÓRICO EN FUNCIÓN DEL PH .....	111
TABLA 7-4: PARÁMETROS DE OPERACIÓN PTE's, 2005 .....	114
TABLA 7-5. RESULTADOS DE ESTIMACIONES REALIZADAS PARA EL PH .....	114
TABLA 7-6: RESULTADOS DE MUESTREO DE EFLUENTE FILTRADO.....	117
TABLA 7-7: RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN DE YESO .....	118
TABLA 8-1: CARACTERÍSTICAS DEL YESO OBTENIDO .....	130
TABLA 8-2: RESULTADOS DEL EFLUENTE ENVIADO A LAS PTE'S.....	130
TABLA 8-3: RESULTADOS AGUA TRATADA DE LAS PTE'S.....	130
TABLA 8-4: RESULTADOS DE CALCINADO DE LAS PTE'S .....	131
TABLA 8-5: RESULTADOS DE INSUMOS DE PTE'S .....	131
TABLA 9-1: COSTO DE NUEVAS ADQUISICIONES .....	138
TABLA 9-2: COSTOS ASOCIADOS A LOS EQUIPOS .....	138
TABLA 9-3: COSTO CAPITAL FIJO INDIRECTO .....	139
TABLA 9-4: COSTOS DE PRODUCCIÓN DIRECTOS .....	139
TABLA 9-5: COSTOS DE PRODUCCIÓN INDIRECTOS .....	140
TABLA 9-6: FLUJO DE CAJA DE ALTERNATIVA ESTUDIADA ([KUS\$]) .....	142
TABLA 9-7: INDICADORES ECONÓMICOS DE ALTERNATIVA EVALUADA .....	143



## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1: ESQUEMA DEL PROCESO ACTUAL DE FUNDICIÓN CALETONES.....	8
FIGURA 1-2: ESQUEMA GENERAL DEL MANEJO DE GASES (MAGA).....	11
FIGURA 1-3: DIAGRAMA GENERAL DE PLANTA DE LIMPIEZA DE GASES N°1.....	13
FIGURA 1-4: DIAGRAMA GENERAL DE PLANTA DE LIMPIEZA DE GASES N°2.....	14
FIGURA 1-5: DIAGRAMA GENERAL DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES N°1 .....	16
FIGURA 1-6: DIAGRAMA GENERAL DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES N°2 .....	17
FIGURA 2-1: SOLUBILIDAD DE $As_2O_3$ EN ÁCIDO SULFÚRICO A DISTINTAS TEMPERATURAS <sup>4</sup> ...	22
FIGURA 2-2: DIAGRAMA EQUILIBRIO POTENCIAL – PH DEL SISTEMA ARSÉNICO-AGUA .....	23
FIGURA 2-3: DIAGRAMA EQUILIBRIO POTENCIAL – PH DEL SISTEMA COBRE-AGUA.....	25
FIGURA 2-4: DIAGRAMA EQUILIBRIO POTENCIAL – PH DEL SISTEMA FIERRO-AGUA .....	26
FIGURA 2-5: DIAGRAMA EQUILIBRIO POTENCIAL – PH DEL SISTEMA ZINC-AGUA .....	27
FIGURA 2-6: DIAGRAMA EQUILIBRIO POTENCIAL – PH DEL SISTEMA PLOMO-AGUA.....	28
FIGURA 3-1: PH V/S CONCENTRACIÓN DE AS EN SOLUCIONES DE $Ca(OH)_2$ .....	35
FIGURA 3-2: PH VS CONCENTRACIÓN DE AS A DISTINTAS RAZONES DE FE:AS.....	36
FIGURA 3-3: DIAGRAMA DE ESTABILIZACIÓN DEL ARSÉNICO MEDIANTE CALCINACIÓN .....	38
FIGURA 3-4: DIAGRAMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES EN FUNDICIÓN CALETONES.....	39
FIGURA 4-1: BALANCE DE MASA A ESTANQUE COLECTOR.....	54
FIGURA 4-2: BALANCE DE MASA A ESTANQUE DE NEUTRALIZACIÓN .....	55
FIGURA 4-3: BALANCE DE MASA A ESTANQUE DE PRECIPITACIÓN .....	56
FIGURA 4-4: VARIACIÓN DE LA SOLUBILIDAD DE LA CAL RESPECTO EL PH.....	59
FIGURA 4-5: BALANCE DE MASA A ESPESADOR PRIMARIO .....	60
FIGURA 4-6: BALANCE DE MASA A ESTANQUE DE PRECIPITACIÓN DE AS .....	61
FIGURA 4-7: BALANCE DE MASA A ESPESADOR SECUNDARIO.....	62
FIGURA 4-8: BALANCE DE MASA A SECADOR-CALCINADOR .....	64
FIGURA 5-1: FLUJO PTE 1, 2005-2006, DIARIO.....	78
FIGURA 5-2: DISTRIBUCIÓN DE FLUJO DE ENTRADA A LA PTE 1.....	78
FIGURA 5-3: FLUJO PTE 2, 2005-2006, DIARIO.....	79
FIGURA 5-4: DISTRIBUCIÓN DE FLUJO DE ENTRADA A LA PTE 2.....	79
FIGURA 5-5: PH EN ETAPA DE NEUTRALIZACIÓN.....	81

FIGURA 5-6: PH EN ETAPA DE PRECIPITACIÓN.....	81
FIGURA 5-7: PH EN ETAPA DE PRECIPITACIÓN DE AS, 2005-2006.....	82
FIGURA 5-8: APROBACIÓN DE TEST EPA AS Y Pb, 2006.....	83
FIGURA 5-9: RECHAZO DE TEST EPA AS Y Pb, 2006.....	83
FIGURA 5-10: APROBACIÓN DE TEST EPA VS CONCENTRACIÓN EN CALCINADO PTE 1.....	85
FIGURA 5-11: APROBACIÓN DE TEST EPA VS CONCENTRACIÓN EN CALCINADO PTE 2.....	85
FIGURA 6-1: DIAGRAMA PLANTA DE EFLUENTES DE HUELVA, ESPAÑA .....	89
FIGURA 6-2: VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN YESO A DISTINTOS PH .....	94
FIGURA 6-3: VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN ÁCIDO RESIDUAL .....	95
FIGURA 6-4: DIAGRAMA DE PLANTA DE EFLUENTES DE CUMERIO, BULGARIA.....	101
FIGURA 7-1: ALTERNATIVA DE MEJORAMIENTO EN LAS PTE'S.....	107
FIGURA 7-2: INFLUENCIA DE TEMPERATURA EN SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO. ...	109
FIGURA 7-3: COMPARACIÓN DE YESO EN CALCINADO RESPECTO DEL FLUJO .....	112
FIGURA 7-4: VARIACIÓN DE CALCINADO CON EXTRACCIÓN DE YESO .....	113
FIGURA 7-5: ESQUEMA DE ESTIMACIÓN REALIZADA .....	114
FIGURA 7-6: PORCENTAJE DISMINUCIÓN DE QUEQUE HÚMEDO RESPECTO DEL PH DE PRECIPITACIÓN.....	115
FIGURA 7-7: DIAGRAMA DE FLUJO DE ALTERNATIVA EN ESTUDIO.....	115
FIGURA 7-8: ESQUEMA DE MEDICIONES A PRODUCCIÓN DE YESO .....	118
FIGURA 8-1: DIAGRAMA DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE YESO.....	122
FIGURA 8-2: BALANCE DE MASA A ESTANQUE DE HOMOGENIZACIÓN .....	124
FIGURA 8-3: BALANCE DE MASA A MICROFILTRO.....	125
FIGURA 8-4: BALANCE DE MASA A ESTANQUE DE PRECIPITACIÓN DE YESO .....	126
FIGURA 8-5: BALANCE DE MASA A HIDROCICLÓN.....	127
FIGURA 8-6: BALANCE DE MASA A FILTRO BANDA .....	128
FIGURA 8-7: BALANCE DE MASA A INTERCAMBIADOR DE CALOR .....	129
FIGURA 9-1: FLUJO DE CAJA ACUMULADO .....	143

## **CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN**

La Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) es una empresa minera estatal industrial y comercial orientada a la exploración y explotación de yacimientos mineros, principalmente de Cobre, cuya producción se comercializa internacionalmente. Está comprometida en realizar una gestión empresarial que proteja la integridad física, salud y calidad de vida de sus trabajadores, colaboradores directos y otras personas, que pueden verse afectadas por sus operaciones, comprometiéndose además, responsablemente en respetar el medioambiente y promover el fortalecimiento de sus relaciones con la comunidad y así, mantener el Cobre como un material ambientalmente sustentable, contribuyendo a reducir los posibles impactos negativos de su producción y uso en todos su ciclo de vida.

El cobre juega un rol importante en el desarrollo de las sociedades actuales, ya que posee una alta conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión y durabilidad. Por otro lado en diversas investigaciones, se ha determinado, que el cobre es esencial para los seres vivos. Hoy en día han aparecido nuevas tecnologías de manera de lograr extracciones más eficientes y sustentables, que permiten acceder a depósitos, que antes no podían ser explotados, y al mismo tiempo logra cumplir exigencias medioambientales cada vez más estrictas.

La alta producción de Cobre provoca el agotamiento de los depósitos minerales sulfurados de alta ley, que lleva a la explotación de menas y concentrados de menor ley y/o mayor grado de impurezas, entre las cuales el Arsénico juega un papel fundamental, sobretudo en menas sulfuradas de Cobre con concentrados calcopiríticos arsenicales y pirita refractarias. Los tratamientos de estas menas y concentrados por procesos pirometalúrgicos, liberan el Arsénico a la atmósfera acompañado de otros metales.

En el año 1999 se puso en marcha un Plan de Descontaminación de la Fundición Caletones, que trajo consigo la operación de las Plantas de Limpieza de Gases, y las Plantas de Tratamientos de Efluentes. La PTE N°1 es de Tecnología Mitsubishi-Lurgi entrando en operación el año 1998, la PTE N°2 fue diseñada por el Conglomerado Internacional Kvaerner y entró en servicio el año 2000.

La División el Teniente, en la permanente búsqueda de alternativas tecnológicas, que hagan técnica, económica y ambientalmente más eficientes sus operaciones de producción de cobre, requiere realizar adaptaciones, modificaciones y/o cambios necesarios en las Plantas de Tratamiento de Efluente.

Según lo anterior, y dadas las proyecciones del plan minero, que buscan aumentar la capacidad de fusión del concentrado existen una serie de proyectos orientados a modificar las condiciones operacionales actuales, entre las cuales se encuentran: la restitución de la capacidad de la Planta de Limpieza de Gases N°1, y la adecuación de las Plantas de Tratamiento de Efluentes.

El proyecto de adecuación de las Plantas de Tratamiento de Efluentes, tiene entre sus objetivos, estudiar las capacidades operacionales, por otro lado se deberán revisar los actuales procesos, para determinar los puntos de mayor dificultad ante una eventual modificación. En este contexto, el estudio estará focalizado en las Plantas de Tratamiento, de forma de orientar, y tener una visión clara acerca de la operación, y de sus principales dificultades, que llevan a desbordamientos dado que no existe un margen tan amplio de operatividad.

El trabajo está estructurado, inicialmente con un estudio y conocimiento general del proceso, posteriormente cuenta con las condiciones en las que fue realizado el modelo, junto con una evaluación a la situación operacional existente hoy en día. Finalmente, se estructura una adecuación alternativa, y el análisis de viabilidad del proyecto propuesto.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo General

- Evaluar técnicamente mediante modelación, la incorporación de una alternativa, al Proceso de las Plantas de Tratamiento de Efluentes de la Fundición Caletones, para disminuir los gastos por concepto de inertización de sus residuos sólidos.

### Objetivos Específicos

- Identificar de manera conceptual las características físicas y químicas, del proceso de Tratamiento de Efluentes, de manera de poder determinar las transformaciones que experimentan, los compuestos analizados.
- Desarrollar un modelo de Balances de Masa y Energía de las Plantas de Tratamiento de Efluentes, para analizar el comportamiento operacional actual.
- Desarrollar muestreos y análisis, que permitan identificar el actual comportamiento operacional de las Plantas.
- Analizar y proponer acciones para la adecuación de las Plantas de Tratamiento de Efluentes, de forma de detectar oportunidades de mejora al proceso.
- Realizar una evaluación económica con el fin de determinar las características más importantes del estudio realizado.

## **1.2 Justificación del Proyecto**

Dadas las actuales problemáticas existentes en las Plantas de Tratamiento de Efluentes de la Fundición Caletones, que vienen dadas por la entrada en vigencia en julio del 2005, del Decreto Supremo 148, el cual obligó a la División a concordar con la Autoridad un Plan de Manejo de Sólidos Peligrosos, por lo que para inertizar el residuo sólido generado (calcinado), se deben utilizar los servicios externos de la empresa Hidronor, generando un gasto diario de aproximadamente US\$ 12.000 por día, cifra que es significativamente alta, y que motiva la búsqueda de alternativas para reducirla. Además, se han identificado una serie de inconvenientes operacionales, que llevan a que las capacidades se vean sobrepasadas debido a la falta de holguras suficientes para flexibilizar la operación.

Según lo anterior, el proyecto desarrollado busca entregar una alternativa operacional al proceso actual, y con esto proponer acciones para detectar oportunidades de mejora.

.

### 1.3 Alcances y Metodología

El trabajo desarrollado tendrá los siguientes alcances de forma de poder delimitar el objetivo de estudio:

- Como el objetivo de estudio son las Plantas de Tratamientos de Efluentes, se considerará que los datos proporcionados por los Procesos anteriores, corresponden a condiciones de operación típicas, extraídas desde los sistemas de información de las Plantas.
- En el estudio de alternativas de modificación al proceso actual, se consideró, el proceso de producción de yeso, existente en Huelva (España), de forma de focalizar el análisis, y el estudio a ese proceso.

La metodología empleada entrega cuales son las pautas seguidas en el presente estudio, y se explican a continuación:

- La modelación de las Plantas de Efluentes fue trabajada en estado estacionario, mediante planillas Excel.
- Los modelos de ambas Plantas de Efluentes fueron realizados a partir de antecedentes de diseño, para posteriormente validarlos con datos de operación normal.
- Los estudios y mediciones, realizados a las operaciones de las plantas fueron abordados, de manera de considerar condiciones normales de operación.
- Para el análisis de la evaluación de costos se utilizó el Método de Chilton.

## 1.4 Antecedentes Generales de Fundición Caletones

La Fundición Caletones, Figura 1-1, de la División El Teniente está ubicada a 44 km de Rancagua y 1.560 msnm. Su actual ubicación data del año 1922 como reemplazo a la primera fundición construida en Sewell junto con el inicio de las operaciones del Mineral El Teniente.

El proceso inicialmente utilizado en Caletones fue el convencional de la época: Tostadores, Hornos de Reverbero, Convertidores Peirce-Smith y Hornos de Refinación.

El quiebre tecnológico principal se produjo en 1976, con la incorporación del primer Convertidor Teniente, desarrollo propio, el cual permite fundir concentrados sin utilización de combustibles en un proceso continuo, aprovechando el calor de las reacciones exotérmicas de la descomposición y oxidación de sulfuros de cobre y hierro presentes en el concentrado.

El concentrado propio, proveniente de la Planta de Concentración Colón, ingresa a la Fundición a través de una correa transportadora a razón de 3.900 tpd en promedio. En algunas oportunidades, para copar su capacidad, se procesa adicionalmente concentrado de la División Andina, el cual es recepcionado y almacenado en un edificio-bodega (Catedral).

Prácticamente el 100% del concentrado húmedo recibido (6-9% H<sub>2</sub>O, 30-32% Cu, 29-32% S, 24-27% Fe) es procesado por 2 Secadores de Lecho Fluidizado, para reducir su humedad hasta 0,2%. El concentrado seco producto de este proceso, es transportado e inyectado en los 2 Convertidores Teniente (CT) donde se realiza la fusión y conversión de este material, en presencia de aire enriquecido en oxígeno, para producir metal blanco de 75% Cu y una escoria con 6 a 10% Cu, donde se elimina gran parte del hierro en forma de óxido. Además, se inyectan vía Garr-Gun, fundente, formador de escoria fayalítica y carga fría, que ayuda a controlar la



temperatura del horno producto de las reacciones exotérmicas que en él se producen. El proceso ocurre en fase líquida a 1 250°C.

Siguiendo con el proceso de obtención de cobre fino, el metal blanco es alimentado a 3 Convertidores Peirce-Smith (CPS) donde es transformado a cobre Blister (99,3% Cu) mediante oxidación con aire. De acuerdo a los requerimientos del cliente, el Blister es sometido a refinación anódica o a fuego (RAF), para lo cual se dispone de 5 hornos de refinación (3 RAF y 2 Anódicos) obteniendo las formas moldeadas solicitadas: RAF y ánodos.

La escoria producida en los CT es procesada en 4 Hornos de Limpieza de Escoria (HLE), desarrollo propio, cuya función es recuperar el metal blanco arrastrado en ella y generar una escoria final <1% Cu. El metal recuperado es recirculado a los CPS. Una parte de la escoria HLE es granallada y se vende al mercado nacional e internacional como agente abrasivo, utilizado en la limpieza neumática de elementos estructurales.

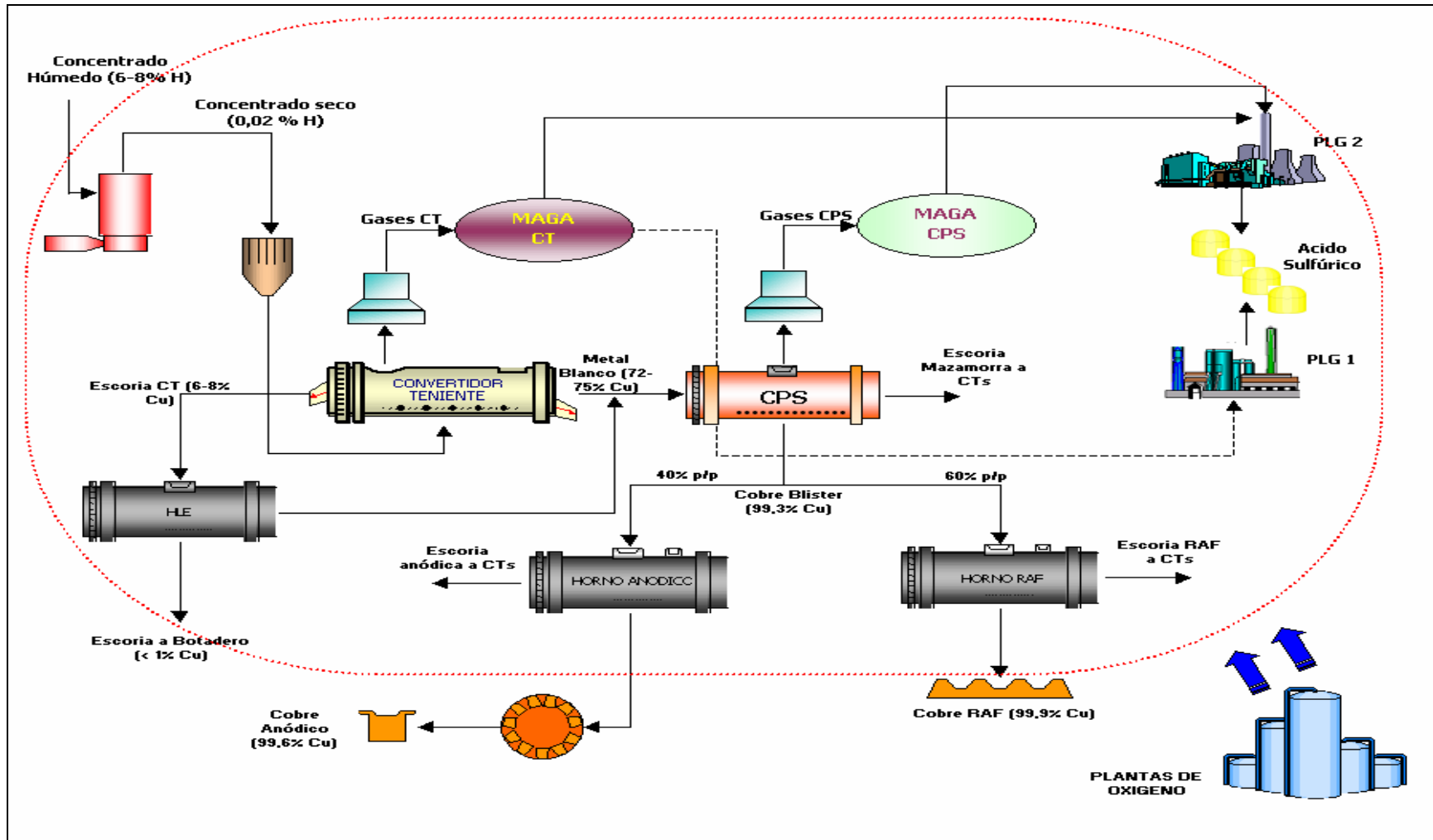


Figura 1-1: Esquema del Proceso actual de Fundición Caletones

#### **1.4.1 Sistema de Manejo de Gases.**

Los gases producidos en los CT y CPS (cuya temperatura es cercana a los 1200°C) son captados por campanas ubicadas en las bocas de los reactores. Figura 1-2. De esta forma son enviados a cámaras de enfriamiento (enfriadores radiativos) donde se produce la primera separación polvo-gas, producto de una disminución de la temperatura hasta aproximadamente los 350°C. El resto del volumen va a los precipitadores electrostáticos secos, en los cuales se depositan polvos más finos que los anteriores y de diferente composición, quedando los gases restantes en SO<sub>2</sub> y arsénico, a una temperatura cercana a los 60°C y con muy pocos sólidos.

Producto de lo anterior, los gases de fundición están acondicionados para su posterior tratamiento en las dos Plantas de Limpieza de Gases, a partir del cual se producen alrededor de 3.200 tpd de ácido sulfúrico de 98,5% de pureza y de 60 tpd de Calcinado con contenido de 5-7% de As.

El sólido colectado en los enfriadores radiativos (fracción gruesa) es enviado a proceso a los CT y CPS, junto a otros materiales (rechazos, fondos de ollas, etc), como carga fría.

El resto de los polvos, la fracción fina, captados por los precipitadores electrostáticos, son enviados a la Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición (PTPF) para su posterior tratamiento.

Los parámetros de operación del sistema de captura, manejo y limpieza de gases de los CT's, son los siguientes:

- Dilución en Campana CT: 100% (respecto a gas en boca)
- Infiltración Cámara Enfriamiento: 3% (respecto a gas entrada cámara de enfriamiento)

- Recuperación Polvos Cámara: 30% (se estima que el tamaño de partícula de estos polvos, es generalmente menor a 50 micrones).
- Infiltración Precipitadores: 3% (respecto a gas entrada Precipitador Electrostático)
- Capacidad Tratamiento Gases PPEE: 195.000 Nm<sup>3</sup>/h por cada unidad
- Recuperación Polvo PPEE:  
Con 3 campos operando: 97 %  
Con 2 campos operando: 88 %  
Valor Promedio: 93 %

Los parámetros de operación del sistema de captura, manejo y limpieza de gases de los Convertidores son los siguientes:

- Dilución Campana CPS: 100% (respecto a gas en boca).
- Infiltración Cámara Enfriamiento: 3% (respecto a gas entrada cámara de enfriamiento)
- Recuperación Polvos Cámara: 25% (se estima que el tamaño de partícula de estos polvos es generalmente mayor a 50 micrones).
- Infiltración Precipitador: 3% (respecto a gas entrada PPEE)
- Recuperación Polvo PPEE: valor promedio 91 %

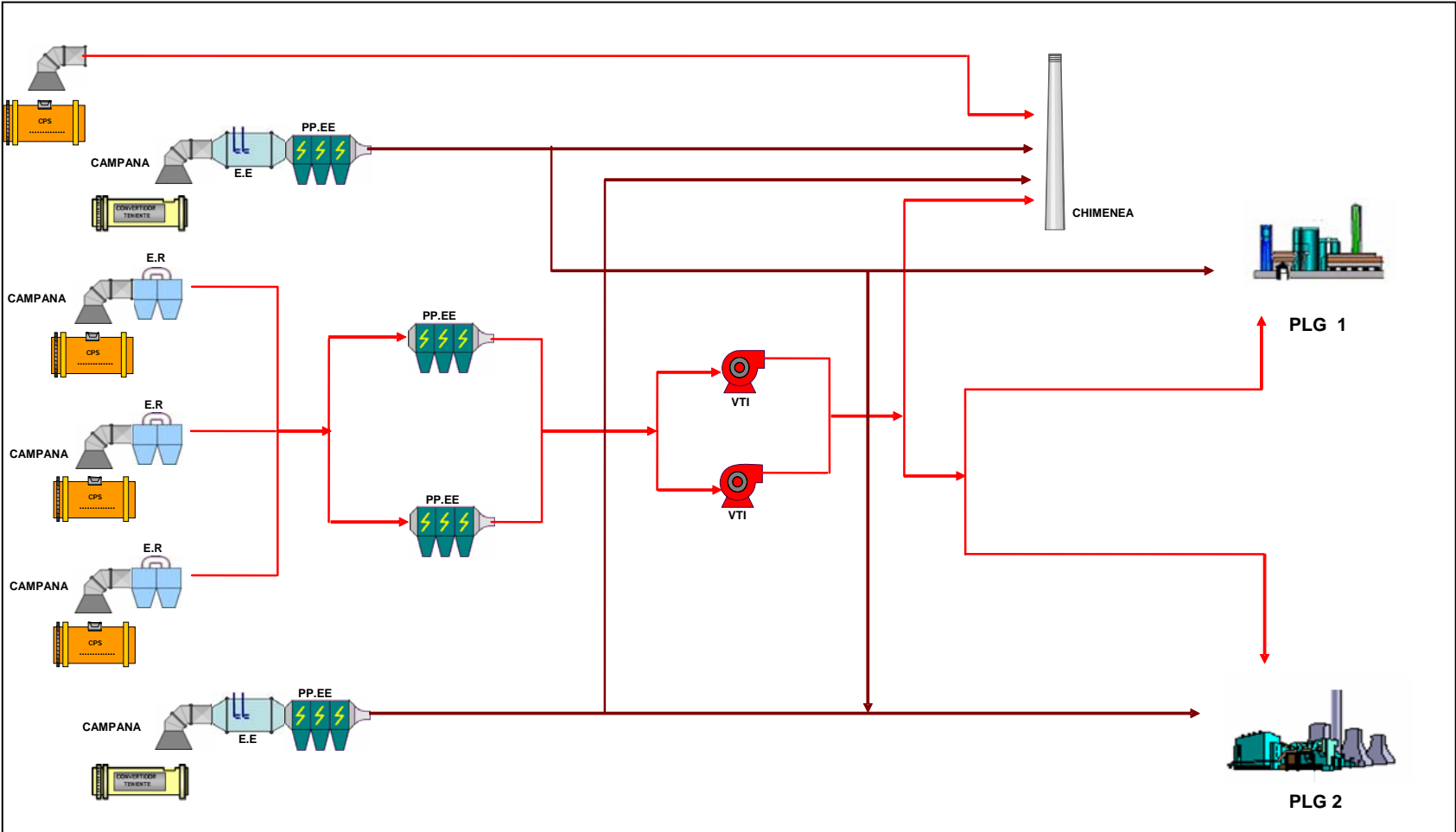


Figura 1-2: Esquema General del Manejo de Gases (MAGA)

### 1.4.2 Tratamiento de los gases en Plantas de Limpieza de Gases

Los gases primarios de los CT's y de los CPS's, una vez que abandonan los precipitadores electrostáticos, son procesados en las PLG's con el propósito de recuperar el anhídrido sulfuroso que contienen y controlar su emisión a la atmósfera.

La PLG N°1, Figura 1-3, fue conceptualizada para procesar los gases de un CT en operación de soplado, para producir 1.500 tpd de ácido sulfúrico. Esta planta fue diseñada considerando las siguientes principales características de los gases:

- Flujo de gases de proceso: 150.000 – 174.000 Nm<sup>3</sup>/h b.h.
- Producción de Ácido Sulfúrico: 1.500 tpd (174.000 Nm<sup>3</sup>/h; 8,7% SO<sub>2</sub> b.h.)

De acuerdo al proyecto “Ampliación Capacidad Fundición Caletones”, esta planta será modificada para alcanzar una capacidad volumétrica de 240.000 Nm<sup>3</sup>/h con una concentración máxima de 12% SO<sub>2</sub> (b.h) y una producción nominal de 2100 tpd H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

El proyecto de construcción de la PLG N° 2, Figura 1-4, se conceptualizó para procesar 280.000 Nm<sup>3</sup>/h de gases, equivalentes a los flujos de gases producidos por 1 CT y 2 CPS en etapa de soplado. Con este esquema, la producción equivalente de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de esta planta alcanzaría inicialmente 2.350 tpd y a 3.100 tpd como capacidad máxima (Nota: para un flujo de gas de 280.000 Nm<sup>3</sup>/h con 9,8 % SO<sub>2</sub>, la producción diaria máxima de ácido sulfúrico resulta ser 2.700 tpd). Esta planta fue diseñada considerando las siguientes principales características de los gases:

- Flujo de gases de proceso: 235.000 – 280.000 Nm<sup>3</sup>/h b.h.
- Producción de Acido: 2.350 tpd

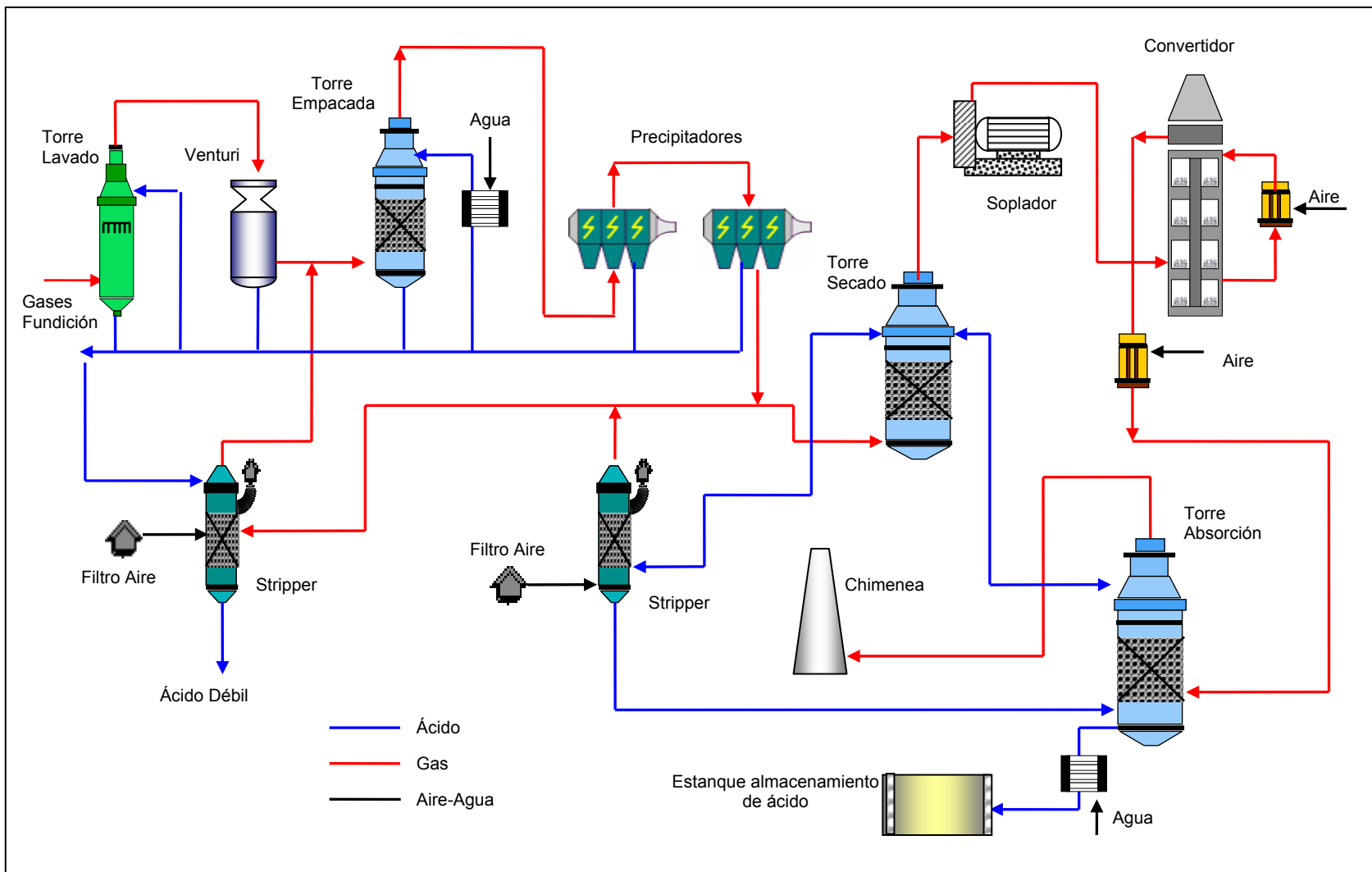


Figura 1-3: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°1

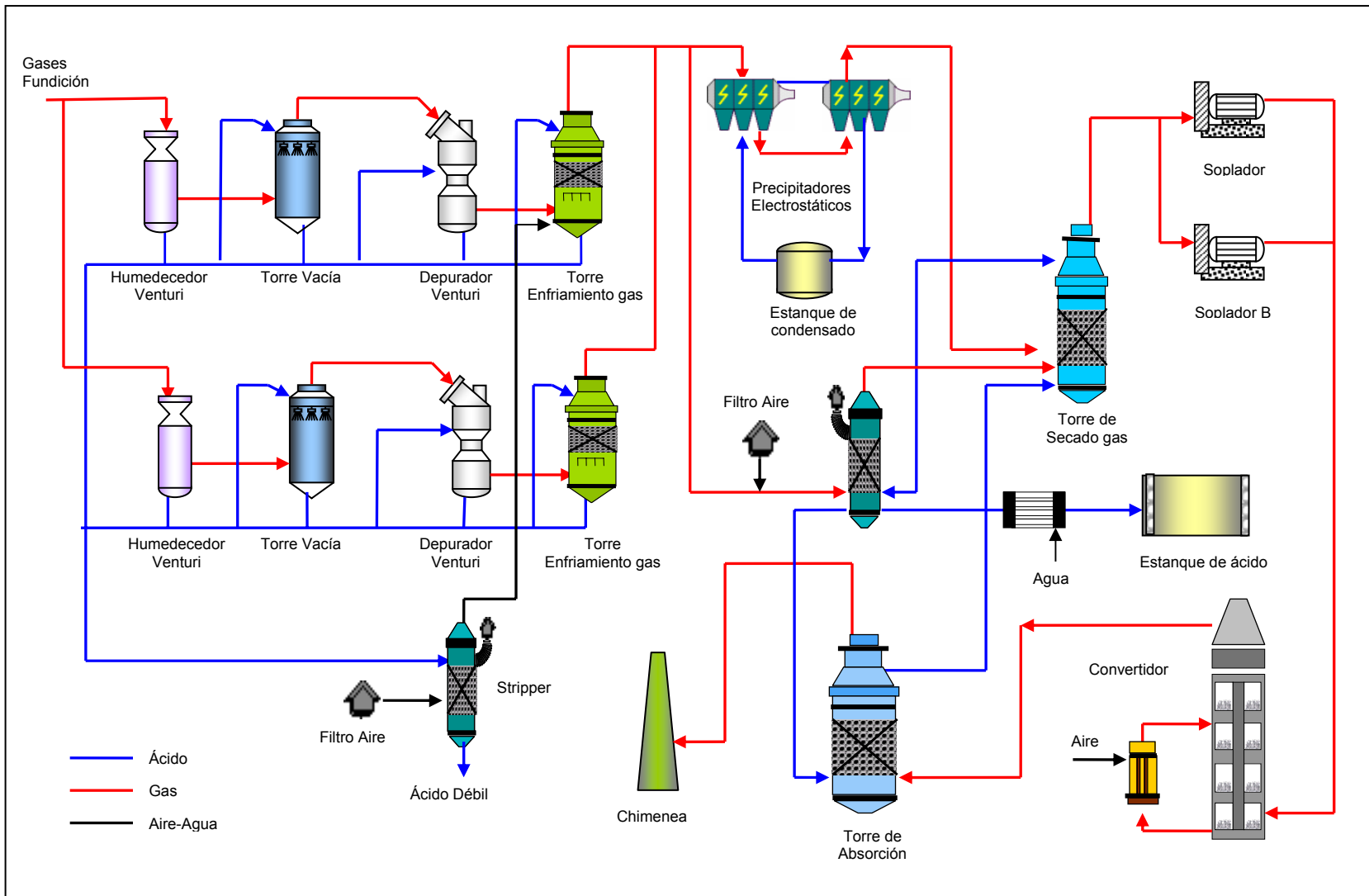


Figura 1-4: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°2



### **1.4.3 Plantas de tratamiento de efluentes**

El tratamiento de los gases de fusión-conversión genera efluentes ácidos que contienen 5-20% de ácido sulfúrico, metales (cobre, hierro, zinc, plomo, etc.) y arsénico. Estos efluentes ácidos son tratados en las plantas de tratamiento de efluentes 1 y 2 (PTE N°1 y N°2), Figura 1-5 y Figura 1-6, para generar residuos sólidos estables y posteriormente eliminarlos del sistema.

Las Plantas de Tratamiento de Efluentes (PTE's), cumplen con el propósito de procesar los efluentes líquidos de la etapa de limpieza de los gases metalúrgicos (en las torres de lavado), de las Plantas de Limpieza de Gases N° 1 y 2 respectivamente.

Las PTE's cuentan con dos Plantas de Lechada de Cal, donde se recibe la cal viva para la preparación de lechada utilizada en ambas plantas de tratamiento.

El efluente proveniente de las PLG's se neutraliza con lechada de cal alcanzando un pH de operación de 11.5; del espesador primario se obtiene un lodo y un agua clara con un contenido de 50 a 100 ppm de arsénico.

El agua clara obtenida del primer espesador se somete a una segunda precipitación, ajustando el pH entre valores de 7 a 8.5, adicionando ion férrico para la precipitación de arsénico remanente. Producto de esto se genera un lodo y agua clara.

Los lodos de ambas precipitaciones son mezclados y luego alimentados a una etapa de filtración donde se retira parte del agua remanente, y se obtiene un queque, el cual es sometido a una etapa de secado y posteriormente calcinación a 750 °C para obtener arseniato de calcio. El residuo sólido calcinado, consiste en arsenito/arseniato de calcio en una matriz de sulfato de calcio, es embolsado en maxisacos.

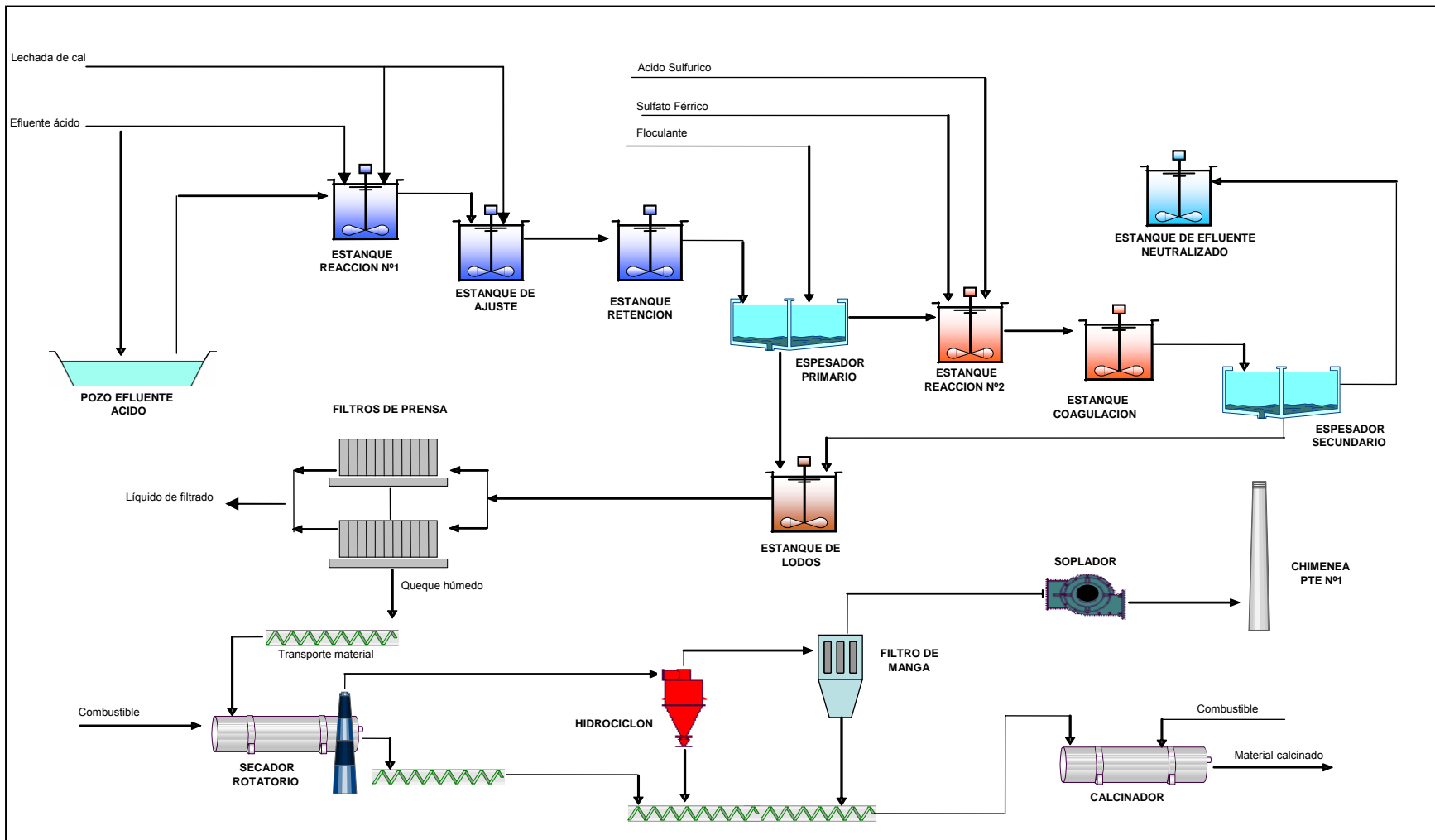


Figura 1-5: Diagrama General de Planta de Tratamiento de Efluentes N°1

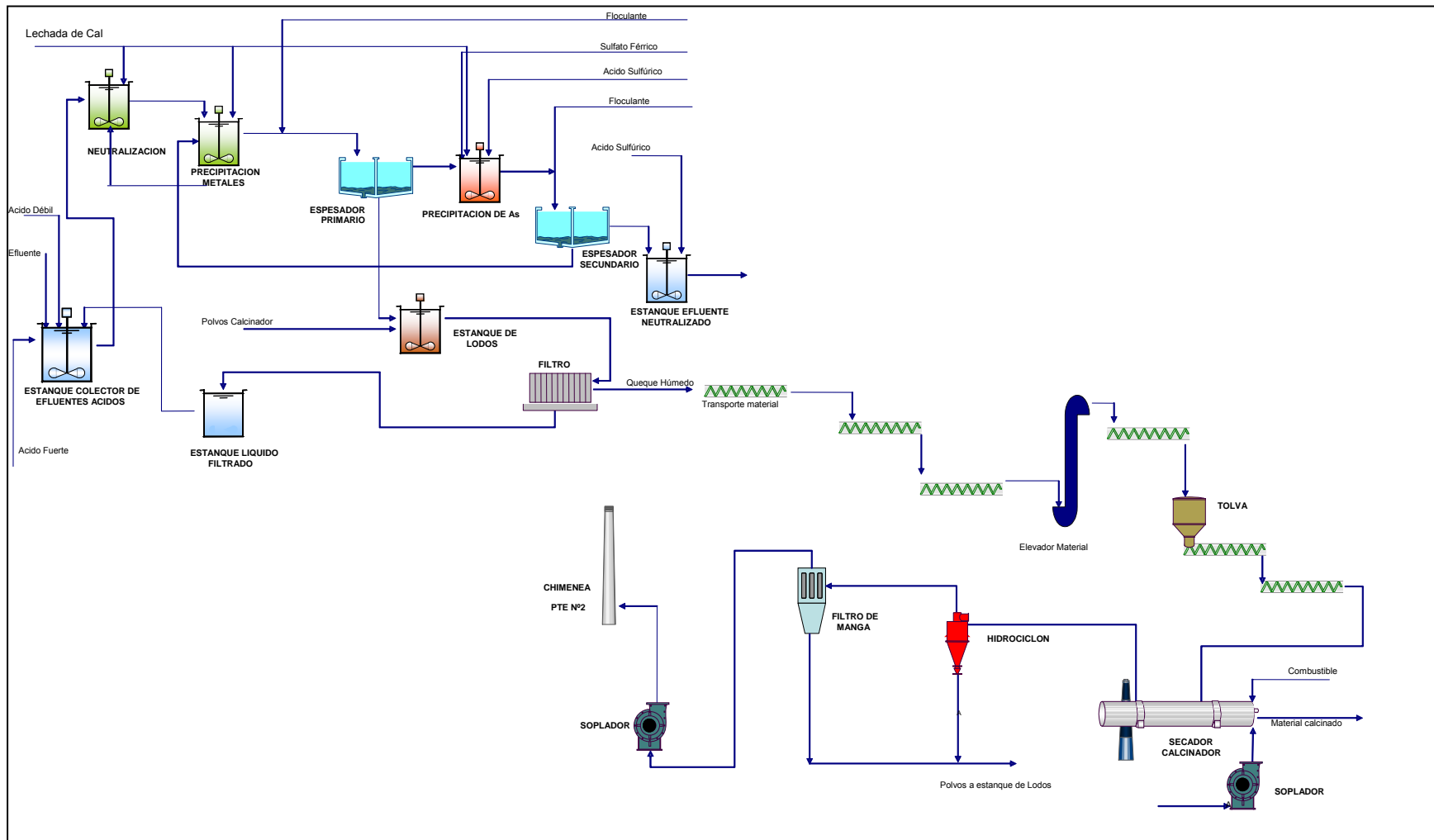


Figura 1-6: Diagrama General de Planta de Tratamiento de Efluentes N°2

## **CAPITULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE ÁCIDO**

El efluente generado en las Plantas de Ácido proviene principalmente del proceso del lavado del gas, el cual contiene  $\text{SO}_3$ . El líquido que es recirculado se acidifica, alcanzando de esta forma contenidos de 5 a 15% de ácido sulfúrico, en el efluente. Este es el comúnmente llamado “ácido débil”, que también contiene especies condensadas, como Arsénico, Antimonio, Cobre, Hierro, Bismuto, Plomo y Zinc así también como Cloruros y Fluoruros, entre otros.

La concentración y características, del ácido débil generado varía entre las Plantas de Acido N° 1 y 2 de la Fundición Caletones, por lo que las mediciones y estudios realizados deben tener en cuenta el medio sobre el cual se está trabajando.

En este capítulo, se entregará una estructura general acerca de la generación del efluente desde las plantas de ácido, junto con una caracterización de los compuestos más relevantes, que posteriormente entregarán las bases del modelo a generar. El efluente será analizado de forma de poder abordar desde una perspectiva más global el comportamiento de los elementos, que serán objeto de análisis. Además es importante tener presente, que el efluente generado en la Plantas de ácido, es muy complejo de analizar debido, a la gran cantidad de especies que contiene.

Según lo anterior, se analizarán mediante diagramas de equilibrio, y datos bibliográficos, que entreguen las bases acerca del comportamiento de los elementos, que serán objeto de análisis. Además se desarrollará un análisis de solubilidad a los compuestos, que se identificaron, de tal manera de abordar de manera rigurosa, el modelo de balances a realizar.

## 2.1 Generación de Polvos en Fundición

Los procesos pirometalúrgicos de fusión y conversión, que tienen lugar en los Convertidores Teniente, y en los Convertidores Peirce-Smith, en la Fundición Caletones dan origen a emisiones de aproximadamente 230 [kton /año] de SO<sub>2</sub>. Para cumplir con las regulaciones ambientales vigentes, se dispone de las Plantas de Limpieza de Gases.

Los gases que provienen de los CT y CPS, son captados y diluidos, con aire atmosférico, en sus campanas y enfriados en las cámaras de enfriamiento radiativo (que no ocupa agua), y evaporativo. El material grueso es devuelto a la fundición, como carga fría para reprocesamiento. En las Figuras 1-3 y 1-4, se muestran los Diagramas de ambas Plantas de Limpieza.

Las partículas finas de los gases de los CT que no han sido retiradas previamente, son recogidas por los precipitadores electrostáticos. Este material es enviado en forma de pulpa a la PTPF, donde son tratados para disponerlos en forma estable y confinarlos de modo de minimizar el impacto ambiental ejercido por ellos. Por su parte, las partículas finas arrastradas por los gases, que han sido capturadas por el precipitador de los CPS son enviadas a una cancha, e incorporados nuevamente como carga fría.

Los gases, formados por SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y además con contenido de polvos, vapor de agua y otras impurezas como arsénico, son tratados por las Plantas de Limpieza de Gases, generando ácido sulfúrico comercial. En estas plantas se genera el efluente, que debe ser tratado por las Plantas de Tratamiento de efluentes.

Parte del ácido diluido del sistema de humidificación, es bombeado hacia una torre stripper o desgasificadora, de forma de retirar el SO<sub>2</sub> residual. Desde este stripper, el ácido diluido es bombeado hacia la Planta de tratamiento de Efluentes. El aire de barrido (captado desde el ambiente), que contiene SO<sub>2</sub> disuelto, es recirculado hacia la corriente gaseosa.

## 2.2 Caracterización de compuestos en el Efluente

En la Tabla 2-1, se muestra un detalle de los elementos y características propias del Efluente ácido generado por la PLG 2<sup>1</sup>.

**Tabla 2-1: Caracterización Química de Efluente PLG N°2**

Elementos		Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Arsénico	As	ppm	16490.0	14725	5790
Aluminio	Al	ppm	25.0	22.3	19
Cadmio	Cd	ppm	21.0	18.9	16
Zinc	Zn	ppm	800.0	598.2	236
Cromo	Cr	ppm	7.0	2	<1
Cobre	Cu	ppm	1270.0	738	120
Calcio	Ca	ppm	40.0	29	21
Magnesio	Mg	ppm	37.0	27.8	22
Molibdeno	Mo	ppm	240.0	186.6	80
Mercurio	Hg	ppm	26.0	14	0
Hierro	Fe	ppm	160.0	108	15
Níquel	Ni	ppm	2.0	1.2	0.8
Plomo	Pb	ppm	509.0	253.6	158.4
Selenio	Se	ppm	105.0	41.6	5
Potasio	K	ppm	465.0	345.3	135
Sodio	Na	ppm	425.0	215.3	110
Antimonio	Sb	ppm	90.0	70	50
Bismuto	Bi	ppm	110.0	84	52
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	ppm	101.0	82515.8	44500
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	ppm	530.0	434.3	295
Sólidos Disueltos		g/l	122.0	86.9	31.3
Sólidos Suspendidos		ppm	4250.2	3768.6	2290
Acido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	145.0	84.5	45.4
Temperatura		°C	36.8	28.3	17.5

Como se puede apreciar en la Tabla 2-1, existe una cantidad importante de elementos, presentes en el efluente, por lo que la caracterización de compuestos se encontrará focalizada sólo en los de mayor preponderancia.

Según lo anterior, como criterio de selección utilizado, para el análisis de cada elemento, se pueden considerar dos puntos relevantes, que se presentan a continuación:

<sup>1</sup> En el caso del efluente de la PLG 1 existen diferencias en las concentraciones.

- La existencia de mayores datos en los Diagramas de Proceso de los elementos seleccionados, que llevan a un resultado global más ajustado.
- El comportamiento, de cada elemento seleccionado según antecedentes recabados, que venían entregados por muestreos, y seguimientos de éstos, a través de las Plantas.

Con los elementos seleccionados, a través de los criterios de selección expuestos, se identificaron los compuestos presentes en solución, y para lo cual se recurrió a los Diagramas de Pourbaix<sup>2</sup>, de forma de ser rigurosos en el análisis. Estos son diagramas de equilibrio termodinámico, y se basan en variables como la actividad de las especies que intervienen, pH de la solución, temperatura, presión y potencial de oxidación.

En general, en los sistemas acuosos, las propiedades predominantes son el pH, y el potencial de oxidación que finalmente son las coordenadas de los Diagramas de Pourbaix. En el caso de los efluentes provenientes de las PLG's, los parámetros característicos<sup>3</sup> vienen dados por un pH de 0-0.5, y un potencial de oxido-reducción se encuentra entre 0.2-0.3 [V].

### 2.2.1 Comportamiento de Elementos relevantes

#### a). Arsénico

La carga de arsénico que ingresa, considerando ambas Plantas de tratamiento bordea los 250 [kg/h], y según proyecciones de la Fundición esta carga debería ser mayor en los próximos años.

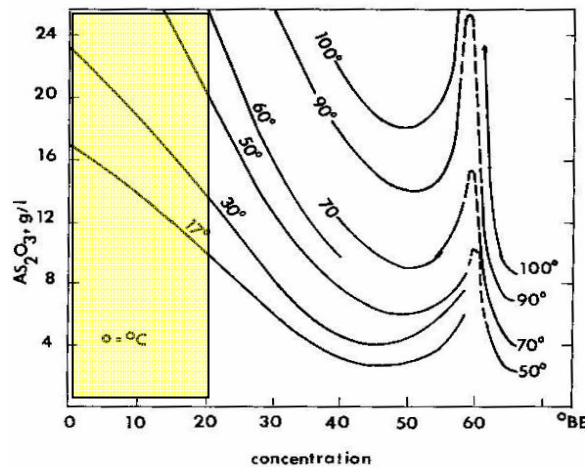
---

<sup>2</sup> Pourbaix Marcel, "Atlas D'Équilibres Electrochimiques", Publication du centre Belge D'Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., 1963. 639 p

<sup>3</sup> Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), "Análisis de la Estabilidad de los Residuos Sólidos arsenicales producidos en la Planta de Tratamiento de Efluentes, División El Teniente (2004)", p.15

De acuerdo a datos bibliográficos<sup>4</sup>, el arsénico normalmente emitido junto a los gases en las operaciones de fundición se encuentra principalmente en la forma de trióxido de arsénico,  $As_2O_3$ , y en menor cantidad como pentóxido de arsénico,  $As_2O_5$ . El trióxido es muy tóxico y letal en dosis de 0,2 a 0,3 gramos. En todos estos casos lo importante es tener clara la concentración de sulfatos, y la temperatura del efluente.

Según bibliografía<sup>5</sup> y pruebas de laboratorio de lixiviación de polvos de fundición, se ha observado que la solubilidad de los óxidos arsenicales se ve disminuida a concentraciones altas de acidez. La solubilidad del  $As_2O_3$  en soluciones ácidas se muestra en la Figura 2-1. El rango, como se aprecia en el recuadro corresponde a concentraciones de ácido de hasta un 20%, el cual es el margen de operatividad de la Plantas de Tratamiento. Una mayor solubilización del trióxido de arsénico es posible a bajas concentraciones de ácido sulfúrico.



**Figura 2-1: Solubilidad de  $As_2O_3$  en ácido sulfúrico a distintas temperaturas<sup>4</sup>**

El óxido arsenioso presente en el efluente de las Plantas de ácido, se encuentra en condiciones de temperatura y concentración de ácido, que lo condicionan a estados de solubilidad. Así también, existen periodos operativos en los cuales las condiciones

<sup>4-5</sup> A. Kontopoulos and M. Stefanakis, "Production of environmentally acceptable arsenites-arsenates from solid arsenic trioxide", Arsenic metallurgy fundamentals and applications, J. Hendrix, P. Queneau and R.G. Reddy, The TMS society, p.292-293, (1988)



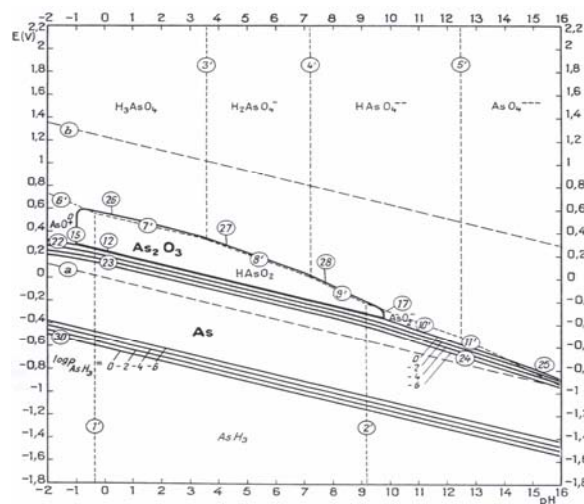
de temperatura varían fuertemente, generando problemas de incrustaciones, dada la precipitación del óxido de arsénico presente.

De acuerdo a los antecedentes bibliográficos<sup>6</sup>, que se manejan teóricamente, el arsénico estaría presente en mayor cantidad en su estado de oxidación +3 ( $\text{As}^{+3}$ ), y en un porcentaje menor en su estado de oxidación +5 ( $\text{As}^{+5}$ ). Los rangos se muestran a continuación en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2: Porcentajes de As en Efluente**

Especie	Porcentaje del As total
$\text{As}^{+3}$	75-90%
$\text{As}^{+5}$	10-15%

Lo anterior podría ser explicado por la presencia de  $\text{SO}_2$ , en el efluente, que tendería a reducir la especie de arsénico de mayor estado de oxidación. Como se aprecia en el Diagrama de Pourbaix de la Figura 2-2, los compuestos principales que se presentarían en el Efluente Ácido, según el rango pH de entrada y potencial de oxidación son el ácido arsenioso ( $\text{HAsO}_2$ ) y el ácido arsénico ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ).



**Figura 2-2: Diagrama equilibrio potencial – pH del sistema arsénico-agua<sup>7</sup>**

<sup>6</sup> J. Donnelly, D. Anderson, C. Evans, “Arsenic Control in Effluents from Copper Smelter Acid Plant”. Air & Waste Management Association Annual Meeting, Salt Lake City, June 2000

<sup>7</sup> Pourbaix Marcel, “Atlas D’Équilibres Electrochimiques”, Publication du centre Belge D’Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., p (520)

Para poder determinar el porcentaje de cada especie de arsénico existente en el Efluente Ácido, se tomaron algunas muestras<sup>8</sup>. En la PTE 1, el porcentaje de Arsénico +3 bordea el 98%. Por otro lado en la PTE 2, el As+3 es cercano al 99%.

La explicación de esta tendencia tan clara vendría dada por las condiciones altamente reductoras del medio. Por otro lado es importante mencionar, que la mayor presencia de Arsénico +3, hace más difícil precipitar estos compuestos, dada la alta solubilidad que presenta, por lo que el As+5 es el estado, que se desea para precipitar y alcanzar una mayor estabilidad del compuesto formado. Para lograr este propósito en algunas etapas del proceso se inyecta oxígeno.

---

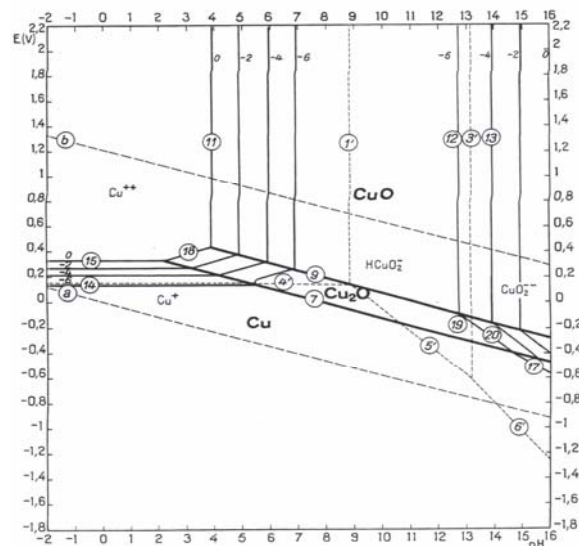
<sup>8</sup> En Anexo A.1.1 y A.1.2, se encuentran los resultados de los muestreos tomados

b). Cobre

Considerando ambas Plantas de Efluentes, la carga de cobre que ingresa bordea los 38 [kg/h], por lo que la cantidad de cobre, que se está eliminando es importante. Por esto último, cabe mencionar que en caso del cobre, sería importante estudiar algún tipo de alternativa, que pueda ser viable para una posible recuperación. Así también, podrían ser extraídos algunos otros metales de interés presentes en el efluente ácido, lo que debería ser objeto de estudio, dadas las condiciones del efluente, y las concentraciones encontradas.

Entre algunos mecanismos de extracción del Cobre a partir de soluciones acuosas, se puede encontrar el intercambio iónico con resinas, capaces de captar la mayor cantidad de iones en solución, pero la limitante en esta alternativa sería el elevado flujo.

Según los parámetros enunciados anteriormente y de acuerdo al Diagrama de Pourbaix, de la Figura 2-3, el cobre estaría presente como  $\text{Cu}^{+2}$ , en condiciones más oxidantes se podría esperar la presencia de  $\text{Cu}^+$ , pero en estudios anteriores se ha llegado a determinar la presencia sólo del estado de oxidación más alto. Según lo anterior, se supondrá que el cobre forma sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) en el efluente.

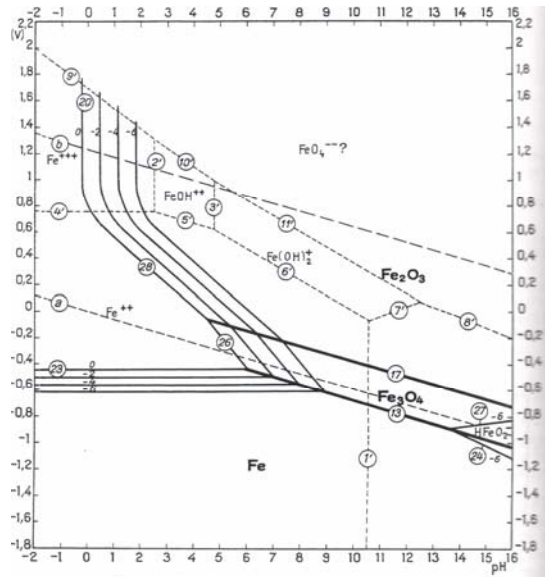


**Figura 2-3: Diagrama equilibrio potencial – pH del sistema Cobre-agua<sup>9</sup>**

<sup>9</sup> Pourbaix Marcel, “Atlas D’Équilibres Electrochimiques”, Publication du centre Belge D’Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., p (82)

c). Fierro

Según el Diagrama de equilibrio mostrado en la Figura 2-4, y con los antecedentes explicados previamente, el Fierro presente en el efluente, se debería encontrar en un estado de oxidación +3. Además se manejan antecedentes previos, que indican la tendencia expuesta. Por lo tanto el compuesto de Fierro presente en el efluente será Sulfato férrico ( $\text{FeSO}_4$ ).



**Figura 2-4: Diagrama equilibrio potencial – pH del sistema Fierro-agua<sup>10</sup>**

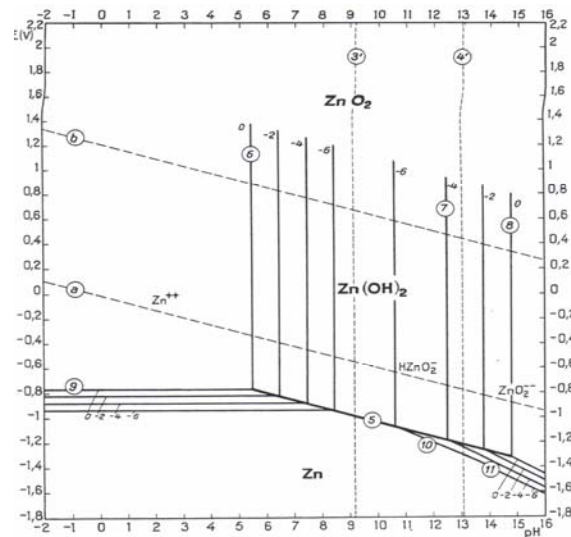
La carga de fierro, enviada desde las Plantas de Ácido, a las Plantas de Tratamiento de Efluentes es cercana a 6.3 [kg/h]. En la actualidad existen diversos mecanismos destinados a extraer, el fierro inorgánico disuelto, en los cuales se pueden encontrar:

- Oxidación, que tiende a formar óxidos relativamente insolubles, teniendo una velocidad de reacción muy dependiente del pH. La aireación es el método de remoción más económico.
- Precipitación química con cal, que tiende a formar hidróxidos férricos, seguida de una filtración.
- Intercambio iónico usando zeolitas de sodio.
- Biorremoción, usando algún microorganismo específico.

<sup>10</sup> Pourbaix Marcel, "Atlas D'Équilibres Electrochimiques", Publication du centre Belge D'Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., p (88)

d). Zinc

El Zinc proveniente de los polvos de fundición, y que ingresa a la Planta de Ácido, forma parte de un óxido. De acuerdo a los antecedentes presentados acerca de las condiciones de Potencial y pH del efluente ácido de las PLG's, el Zinc se debería encontrar en su estado de oxidación +2, tal como se muestra en la Figura 2-5. Por lo tanto el compuesto formado en el efluente, sería Sulfato de Zinc ( $ZnSO_4$ ).



**Figura 2-5: Diagrama equilibrio potencial – pH del sistema Zinc-agua<sup>11</sup>**

La carga de Zinc total, que es enviada a las Plantas de Tratamiento de Efluentes desde el descarte de las PLG's bordea los 21 [kg/h].

Para extraer el Zinc desde medios acuosos, el método más comúnmente utilizado es la precipitación con hidróxido, las condiciones de un rendimiento óptimo indican que a valores de pH entre 9 y 11. Posterior a la precipitación es precisa una etapa de remoción de sólidos suspendidos por medio de clarificación por gravedad y/o filtración. El otro método de extracción, utilizado es por medio de columnas de intercambio iónico.

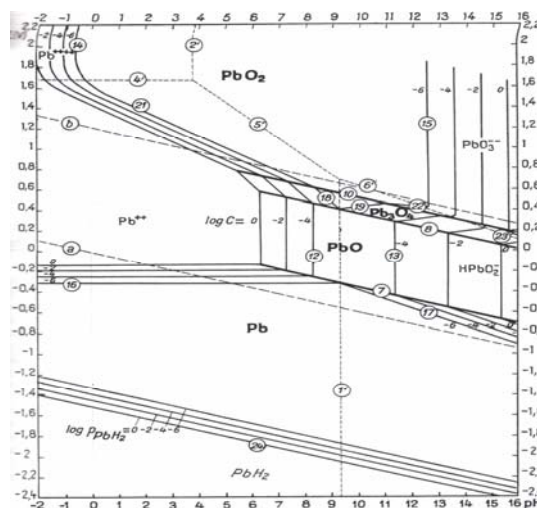
<sup>11</sup> Pourbaix Marcel, "Atlas D'Équilibres Electrochimiques", Publication du centre Belge D'Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., p (102)

Estos métodos enunciados, deben ser estudiados de manera de contar con un respaldo que avale algún mecanismo de extracción propuesto, para cada elemento.

e). Plomo

De acuerdo con la Figura 2-6, el plomo estaría presente como  $Pb^{+2}$ . El plomo proveniente de los polvos de la Etapa de Fusión, se presenta en la Planta de ácido como óxido de plomo ( $PbO$ ), y posiblemente al ponerse en contacto con los sulfatos presentes formaría sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) en el efluente.

Para ser más rigurosos en este análisis, en Capítulos posteriores se desarrollaron diferentes muestreos, que tenían como objetivo, encontrar las condiciones principales en las que se presentaba el plomo en el efluente.



**Figura 2-6: Diagrama equilibrio potencial – pH del sistema Plomo-agua<sup>12</sup>**

En la actualidad en la Fundición de Caletones, incluidas las Plantas de Tratamiento, se están realizando diversos estudios orientados al analizar la distribución del plomo residuos generados, ya que genera problemas medio ambientales, especificados en la nueva normativa vigente.

<sup>12</sup> Pourbaix Marcel, "Atlas D'Équilibres Electrochimiques", Publication du centre Belge D'Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., p (325)

La carga de Plomo enviada desde las PLG's hacia las PTE's, es cercana a 6 [kg/h], encontrándose periodos en lo que la concentración en el efluente es mucho mayor, a la media normal, y por lo tanto mayor la carga total de este elemento.

### 2.3 Análisis de Solubilidad

Dadas las condiciones de entrada del efluente, desde la Planta de Limpieza de gases, se desarrollará un análisis preeliminar de solubilidad, con tal de poder caracterizar el comportamiento de cada compuesto. El rango de temperatura considerado, se encuentra entre 20 y 30°C. Cabe mencionar que este análisis fue realizado de manera teórica<sup>13</sup> en un medio acuoso, y sin interferencia de los iones presentes en el efluente ácido, por lo que podrían existir algunas diferencias con respecto a la realidad.

**Tabla 2-3: Datos termodinámicos**

	Temp. [°C]	$\Delta G$ [kcal]	Constante Equilibrio de Disociación
FeSO <sub>4</sub>	20	-2.9	1.40E+02
	30	-2.4	5.20E+01
CuSO <sub>4</sub>	20	-4.5	2.40E+03
	30	-4.1	8.70E+02
ZnSO <sub>4</sub>	20	-4.8	3.90E+03
	30	-4.3	1.30E+03

Debido al medio ácido presente en el efluente fue apropiado realizar un análisis para determinar la existencia de algún compuesto insoluble. Como se puede apreciar en la Tabla 2-3, ninguno de los compuestos está en condiciones termodinámicas de formar un precipitado. Según lo anterior los resultados muestran, que las constantes de equilibrio no son tan bajas, y la Energía libre de Gibbs es menor que cero, por lo que la tendencia indicaría la presencia de los iones en solución.

El otro compuesto que queda por analizar es el Plomo, teóricamente debería estar presente como Sulfato de Plomo (PbSO<sub>4</sub>) un compuesto insoluble, y para

<sup>13</sup> Software HSC Chemistry 5.0, Outokumpu Research, Pori, Finland, Licence Codelco El Teniente, SN:50163

demostrarlo se analizarán los valores de Energía Libre y constante de Equilibrio mostrados en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4: Datos Termodinámicos de PbSO<sub>4</sub>**

	Temp. [°C]	ΔG [kcal]	K
PbSO <sub>4</sub>	20	11.3	3.7E-9
	30	11.6	4.5E-9
	40	11.9	5.1E-9

Según estos datos se puede apreciar que el PbSO<sub>4</sub> no tendería a una descomposición en el medio acuoso, ya que la Energía Libre de Gibbs es positiva, y la constante de equilibrio es bastante baja. Considerando el compuesto inicial del que forma parte el plomo (PbO), algunos datos bibliográficos<sup>14</sup> indican que es escasamente soluble en agua, pero soluble en ácidos.

Considerando que el efluente viene a la temperatura promedio 28.3°C (según mediciones realizadas), se asume linealidad del Kps del Sulfato de Plomo respecto de la temperatura, obteniendo:

$$Kps_{28.3} = 4.29 * 10^{-9} [M^2] \quad (M = \text{Molaridad})$$

Es importante mencionar que éste análisis es sólo preeliminar, ya que por los alcances del trabajo no se evaluarán las influencias del resto de los iones en solución, que pueden modificar este resultado.

La reacción a considerar queda:  $PbSO_4 \rightarrow Pb^{+2} + SO_4^{-2}$  (2.1)

Para encontrar la cantidad mínima de ión plomo (+2) que debe existir en solución, se realizará el cálculo respectivo con el Kps evaluado. La ecuación general queda:

$$Kps = |Pb^{+2}| * |SO_4^{-2}|$$

La concentración de plomo y sulfato en solución es:  $|Pb^{+2}| = |SO_4^{-2}|$

Reemplazando:  $\sqrt[2]{Kps} = |Pb^{+2}|$

El resultado es  $|Pb^{+2}| = \sqrt[2]{4.29E-9} = 6.54E-5 [M]$

<sup>14</sup> David R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", CRC press, 84<sup>th</sup> Edition, Section 5, (2003-2004)



También  $|Pb^{+2}| = 6.54E - 5 [M] * 207.1 * 1000 = 13.56 \text{ ppm}$

Según la concentración de diseño en la entrada del Efluente en la PTE 2, éste se encontraría con una concentración de 6 [ppm]. Por lo que considerando el resultado anterior el plomo no formaría parte de un compuesto insoluble.

Para comprobar la concentración de plomo real que proviene en el efluente de cada planta, se realizaron una serie de muestreos<sup>15</sup>. Según los resultados obtenidos, la concentración de plomo en el efluente que ingresa a la PTE 1, bordea los 200 [ppm], en el caso de la PTE 2 es cercano a 240 [ppm].

Por lo tanto, como se pudo identificar con las muestras analizadas, no se cumple, por ningún motivo, la concentración planteada en el diseño original de la PTE N°2. Dado que el límite de solubilidad estaba dado en 13.56 ppm, se puede asumir, que gran parte del plomo se presentaría como un insoluble.

Lo interesante de este análisis resulta ser la conformación de los compuestos, y sus respectivas solubilidades para que en Capítulos posteriores se identifiquen en los balances, con las respectivas reacciones en el proceso Químico-Físico de las Plantas de Tratamiento de Efluentes. Por otro lado es importante tener en consideración, que tal como se mostró en el caso del plomo al pertenecer a un compuesto insoluble, que se pudiera extraer, de forma que no afecte los productos finales de descarte, de las Plantas.

---

<sup>15</sup> Resultados de muestreos en Anexo A.1.1 y A.1.2

## CAPITULO 3 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

La fundición de Caletones cuenta con dos Plantas de Tratamiento de Efluentes, PTE 1 y PTE 2. Estas plantas trabajan en dos trenes de operación, o sea la PTE 1, recibe los efluentes generados por la Planta de Limpieza de Acido Sulfúrico 1 (PLG 1), y la PTE 2 por la Planta de Limpieza de Acido Sulfúrico 2 (PLG 2). Las dos plantas trabajan bajo el mismo concepto físico en el tratamiento de efluentes, y las diferencias radican en los equipos utilizados.

El propósito principal de las Plantas de Tratamiento de Efluentes es recibir los efluentes de desecho de ácido desde la Planta de Limpieza, con el objeto de tratarlos, obteniendo de esta forma residuos sólidos y líquidos, que sean seguros desde el punto de vista de su manejo, y que cumplan con los reglamentos medioambientales. Los residuos líquidos emitidos por las plantas de efluentes deben contener menos de 1 mg/l de arsénico, un máximo<sup>16</sup> de 50 ppm de SO<sub>2</sub> (Dióxido de azufre) y menos de 50 ppm de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Acido Sulfúrico). Por su parte los residuos sólidos en su forma de Arseniato de Calcio encapsulado en una matriz de sulfato de Calcio no contendrán más de 5 mg/l de arsénico (soluble). La estabilidad de este último tendrá que ser verificada a través del test EPA TCLP<sup>17</sup>.

Actualmente existen diversas problemáticas en las plantas, que disminuyen su capacidad de procesamiento, por lo que se deben buscar formas de lograr una mayor adaptabilidad ante las variaciones surgidas en la etapas anteriores.

En el presente Capítulo se entregarán los fundamentos operativos y químicos del proceso de las Plantas de Tratamiento de Efluentes. Además se analizarán algunas de las principales problemáticas existentes hoy en día y que afectan la búsqueda de una productividad mayor que la actual.

---

<sup>16</sup> Según Decreto Supremo 90, de Descargas de Efluentes Líquidos

<sup>17</sup> Test EPA TCLP: Test de Toxicidad por Lixiviación, para determinar el grado de solubilidad de elementos en residuos.

### 3.1 Etapas Principales de las Plantas de Tratamiento de Efluentes

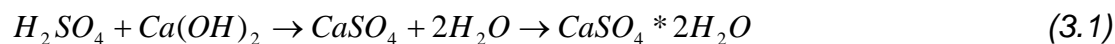
#### 3.1.1 Preparación de Lechada de Cal

En ambas plantas el reactivo utilizado para neutralizar las soluciones ácidas es la lechada de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), la cual es preparada en una planta especialmente diseñada para tal propósito, que posee una capacidad y un sistema de distribución capaz de satisfacer las necesidades de ambas plantas.

#### 3.1.2 Neutralización del Ácido Sulfúrico

En esta etapa, el ácido débil de la limpieza de gases y otras fuentes (efluente ácido) es alimentado a un Estanque de Neutralización (Figura 3-4), en donde se pone en contacto con la lechada de cal empezando así la formación de cristales de yeso (Sulfato de Calcio). El pH de precipitación existente en este estanque se encuentra en un valor cercano a 3, aunque en el caso de la PTE 2, no se logra en muchos periodos. Lo importante es promover el tiempo de residencia necesario para que crezcan estos cristales los que servirán de matriz encapsuladora para el arsenito y arseniato de calcio, a su vez el efluente ácido contiene otras impurezas como el Arsénico, Zinc, Hierro, etc., que también reaccionan con la lechada de cal, dependiendo del pH, que exista en el estanque. Los estanques son insuflados con aire para ayudar con la oxidación del arsénico hasta su forma de  $\text{As}^{+5}$  que es más fácil de precipitar que su forma de  $\text{As}^{+3}$ .

La reacción principal de esta etapa se presenta a continuación



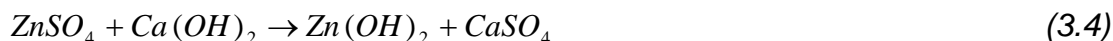
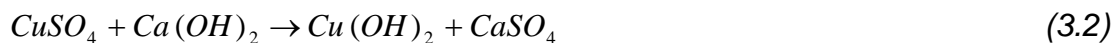
De los estanques de neutralización la pulpa de yeso rebalsa hacia el estanque de precipitación donde ocurre la decantación del resto de los compuestos, dado que en este estanque se aumenta el pH, lo que facilita la precipitación de estos compuestos.

### 3.1.3 Precipitación de los iones metálicos

En esta etapa existe un aumento del pH en comparación al existente en el estanque de neutralización, esto se regula con la adición de lechada de cal. El pH tiene un valor de control cercano a 11.5. Promoviendo la precipitación de una gran parte de los iones metálicos de arsénico como hidróxidos de metal. El estanque al igual que el estanque de neutralización contiene agitadores con el objeto de mantener los sólidos en suspensión.

Los iones metálicos tales como Cu, Fe y Zn inician su precipitación como hidróxidos a pH 5.3, 2 y 7 respectivamente, logrando su disminución en el líquido principalmente en esta etapa, dado el pH de control existente.

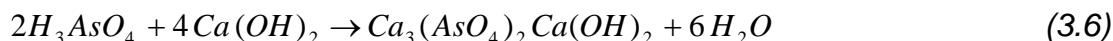
Las reacciones principales de la precipitación de cada metal es:



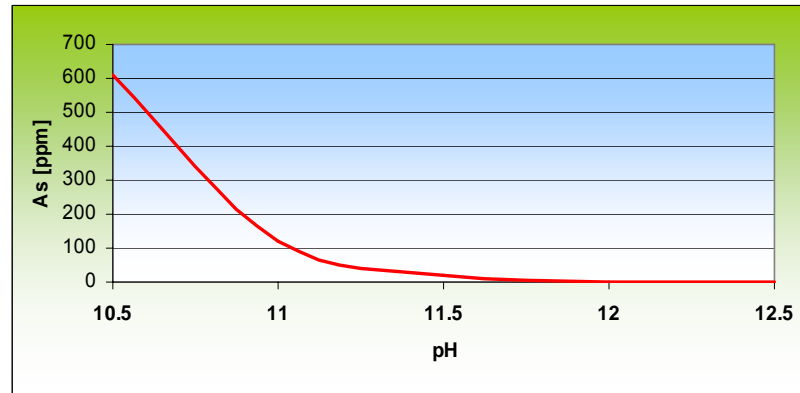
Para el caso del arsénico presente, el ácido arsenioso reacciona con la cal según:



Así también el ácido arsénico presente reacciona con la cal:



Como se puede apreciar en la Figura 3-1, existe una disminución de la solubilidad del arsénico a medida que es aumentado el pH, alcanzando un valor menor al pH de operación del Estanque de Precipitación.



**Figura 3-1: pH v/s Concentración de As en soluciones de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**

Del estanque de precipitación o de ajuste por rebalse se envía la pulpa (que contiene aproximadamente un 9% de sólidos, según diseño) hacia el Espesador primario, donde se pone en contacto con aditivos químicos conocidos como floculantes o polímeros, los cuales promueven la unión de las pequeñas sólidas para su decantación. De esta operación se obtienen dos corrientes:

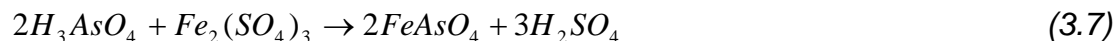
- Corriente Sólida: Precipitados de Arsénico, metales y Sulfato
- Corriente Líquida: Efluente neutro con Arsénico disuelto

El líquido que rebalsa desde el espesador primario fluye hacia el estanque precipitación (PTE 2) de arsénico (Figura 3-4), conteniendo aún aproximadamente entre 25 a 30 ppm de arsénico en solución, donde ocurre la precipitación final de arsénico.

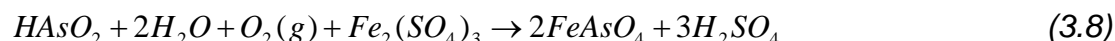
### 3.1.4 Precipitación final de Arsénico

La forma más estable de precipitación de arsénico es como Arsenato Férrico, por esto se pone en contacto el líquido proveniente del espesador primario con una solución de fierro, como Sulfato Férrico. De esta forma, el arsénico remanente precipita, logrando obtener un efluente neutralizado con una baja concentración de Arsénico ( inferior a 1 mg/l).

En el caso del arseniato que reacciona con el sulfato férrico formando arseniato férrico insoluble



Para el caso del arsenito existe una oxidación para la formación del arseniato férrico



Es importante señalar que para agregar la cantidad necesaria sulfato férrico existe una relación entre el Hierro y Arsénico dependiendo del pH para lograr que solubilidad del arsénico sea lo mínimo posible.

El pH en esta etapa se encuentra entre 8.5 y 9.5, y según esto se han realizado varios estudios buscando la relación óptima entre Hierro y Arsénico, para lograr la menor solubilidad posible. Según esto la relación Fe:As debe ser igual a 7, tal como se muestra en la Figura 3-2.

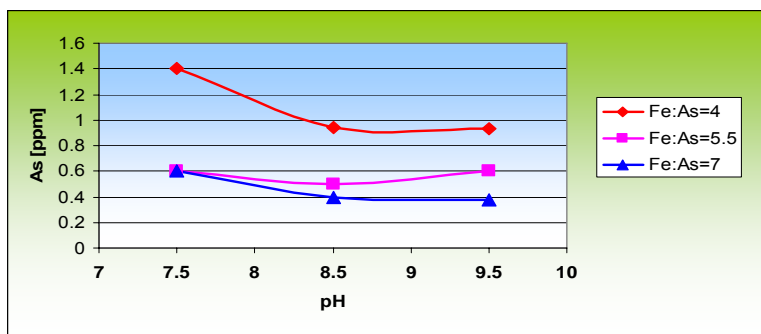


Figura 3-2: pH vs Concentración de As a distintas razones de Fe:As

### 3.1.5 Secado y Calcinación

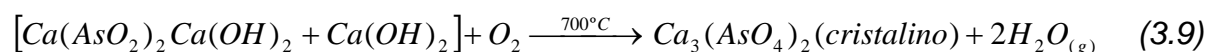
El secado y calcinación de los sólidos obtenidos en los filtros de ambas plantas, obtiene como resultado Arseniato de Calcio encapsulado en una matriz de sulfato de calcio, con aproximadamente 0.2% de humedad (dato de diseño).

El flujo inferior de sólidos desde el espesador primario (con aprox. 25 – 30% de sólidos) se bombea hacia un estanque receptor de borras, en donde se adiciona lechada de cal con el propósito de asegurar la razón Ca/As, según se requiera para poder obtener un producto estable del calcinador. En la actualidad no se está utilizando esta adición de cal porque, ya no se busca obtener un calcinado estable.

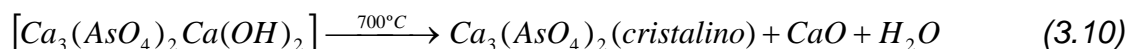
La borra pasa desde el estanque receptor hacia el filtro de prensa, en donde se retienen los sólidos y los líquidos fluyen hacia un estanque de filtrado. El sólido con cerca de 40% de humedad es eliminado de la prensa y transportado a través de correas transportadoras hacia la descarga de la torta húmeda, desde donde esta es transportada hacia un Equipo de secado/calcinado, en el caso de la PTE 1 se utiliza un equipo para el proceso de secado y otro para la calcinación, en el caso de la PTE 2 esta utiliza un sólo equipo que realiza estas dos operaciones.

El producto final, que es principalmente Arseniato de Calcio encapsulado en una matriz de sulfato de calcio. Este producto calcinado y estabilizado (no más de 5 mg/l de arsénico) es enfriado y almacenado en un silo, para su posterior embolsado y almacenamiento en lugares especialmente diseñados para tal propósito.

El arsenito de calcio básico formado reacciona con parte del hidróxido de calcio presente en un medio oxidante de manera de formar el arseniato de calcio cristalino:



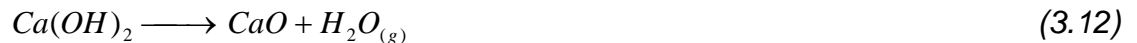
Por otro lado el arseniato básico también es transformado a arseniato de calcio cristalino



El Sulfato de Calcio presente sufre una deshidratación:



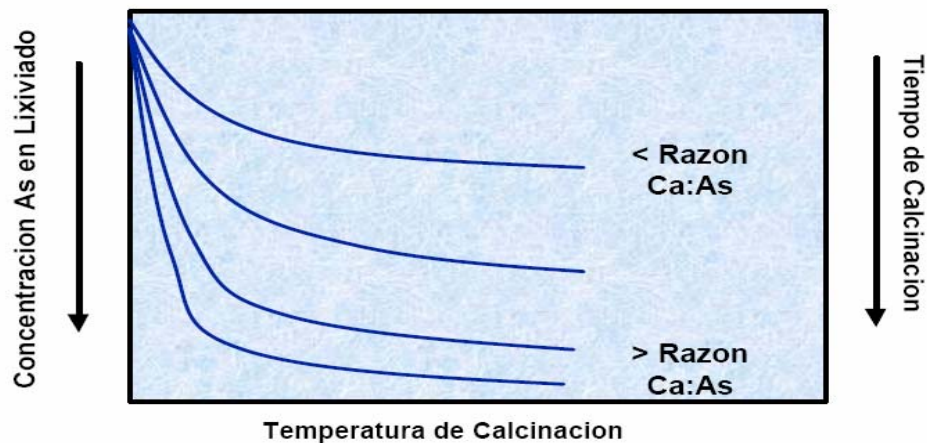
El hidróxido de calcio presente sufre una descomposición



Y finalmente se produce la formación de la matriz de yeso con el arsenito de calcio:



Para lograr una mayor estabilización del calcinado final es necesario, tener una alta relación entre el Calcio y el Arsénico presentes. En la Figura 3-3, se muestra la tendencia de estabilidad del arsénico en la Etapa de Calcinación.



**Figura 3-3: Diagrama de Estabilización del Arsénico mediante Calcinación**



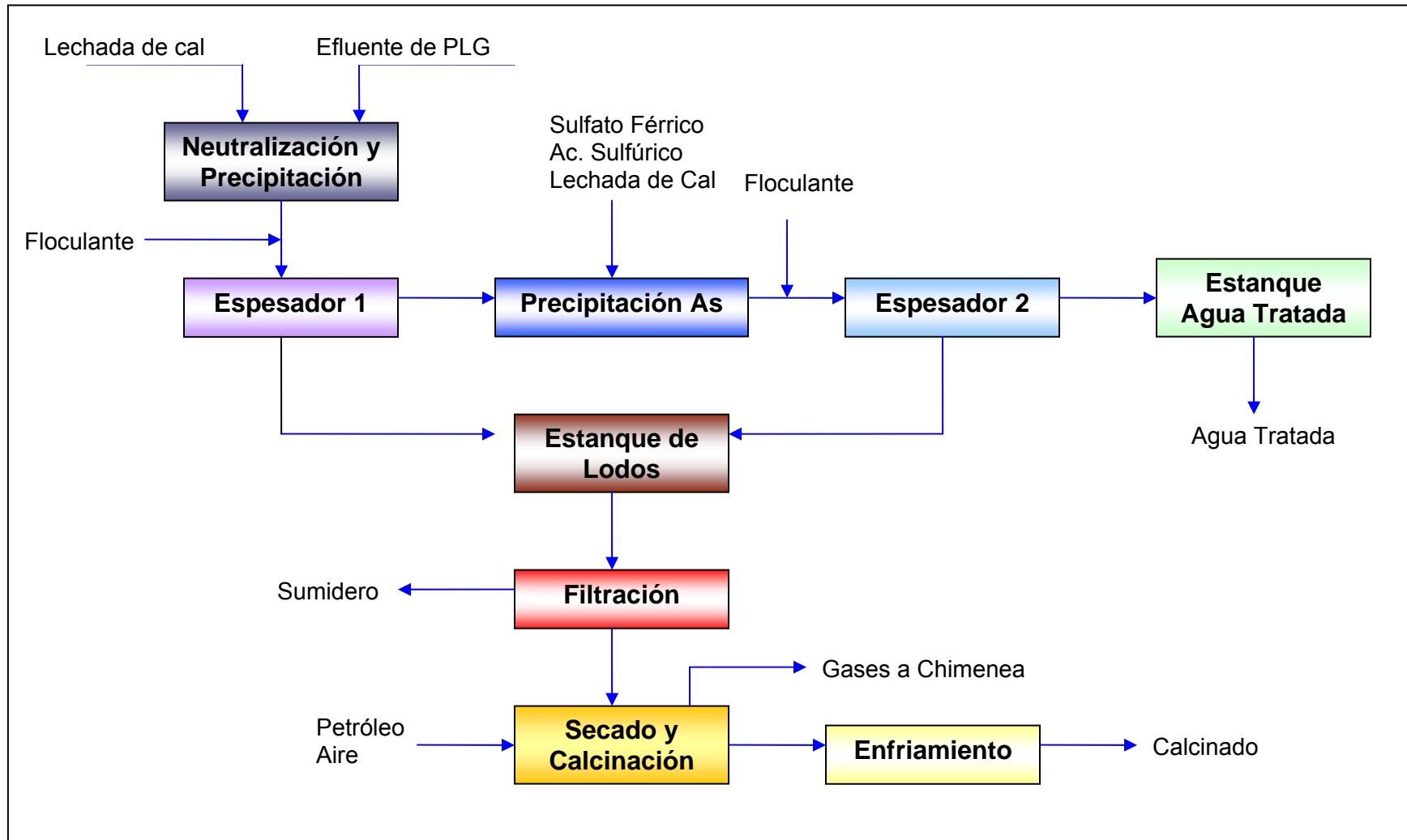


Figura 3-4: Diagrama de Tratamiento de Efluentes en Fundición Caletones

### 3.2 Problemática actual de las plantas de tratamiento de efluentes

En la actualidad se está estudiando realizar una adecuación a las Plantas de tratamiento de efluentes, debido a que se desea asegurar que cumpla con sus capacidades operacionales, para lograr una mayor productividad en la etapa de fusión de concentrado.

Ante este escenario las plantas deben ser estudiadas, para poder realizar las modificaciones precisas a fin de encontrar, las mejores alternativas, y que principalmente cumpla con el reglamento sanitario de residuos peligrosos (Decreto Supremo 148).

Hoy en día, gran parte del tiempo, las capacidades de las PTE, se encuentran sobrepasadas, principalmente a las cargas de arsénico y ácido más altas, que las consideradas en el diseño. La cantidad de arsénico es superior en el concentrado, y además existe una menor conversión en las plantas de ácido de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ . Estos factores han influido en la menor capacidad de procesamiento de ambas plantas.

Es importante mencionar, que si se espera un aumento en la carga de arsénico, y ácido según el proyecto de adecuación de la PLG1, podría generar un problema mayor, y hasta algunas detenciones no programadas, y por lo cual no se podría lograr la carga de concentrado deseada.

Algunos estudios de ingeniería realizados hace un tiempo<sup>18</sup>, afirman las complicaciones que presentan las PTE, habiendo estudiado de forma global el proceso se concluyó que las capacidades de línea de aguas y lodos se encuentran sobrepasadas. También se indica que el sistema es altamente vulnerable debido a la falta de sistemas de respaldo, para los equipos electromecánicos.

---

<sup>18</sup> Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), “Análisis de la Estabilidad de los Residuos Sólidos arsenicales producidos en la Planta de Tratamiento de Efluentes, División El Teniente (2004)”, p.25-26

Entre otros factores que contribuyen en limitar las operaciones actuales de las PTE's, se pueden encontrar:

- Baja eficiencia en control de las etapas de neutralización y precipitación (baja intensidad de agitación, control de reactivos inadecuado).
- Sobrecarga de las etapas de espesamiento y filtración (debido a las altas cargas de arsénico y ácido).
- El sistema de alimentación al calcinador de la PTE 2, no es óptimo ya que no desaglomera el queque.
- Existe una capacidad inadecuada y una baja disponibilidad de los equipos de manejo de sólidos secos en las etapas de secado y calcinación.
- La automatización de las plantas es insuficiente.

### **3.2.1 Normativa actual**

Para las descargas de residuos industriales líquidos, se aplica el Decreto Supremo N° 90, el cual indica que la descarga de arsénico debe tener como máximo 1 [mg/l], en el RIL generado.

El Decreto Supremo N° 148, entró en vigencia en junio del año 2005. Este decreto hace referencia al manejo de residuos peligrosos. Según este decreto, se identifican como peligrosos a aquellos, que presenten algunas de las siguientes características: toxicidad aguda, toxicidad crónica, toxicidad extrínseca, inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

Los residuos generados en las PTE's, caen dentro del grupo de toxicidad extrínseca, los que tienen la característica de que en su eliminación, puedan dar origen a una o más sustancias tóxicas o agudas, en concentraciones que pueden generar trastornos en la salud de la población.

Si la eliminación se realiza a través de su disposición en el suelo, se deben controlar

por el Test de Toxicidad por lixiviación, ocho (8) impurezas, con un valor correspondiente de Concentración Máxima Permitida (CMP), en el lixiviante, producto de la prueba, en la Tabla 3-1, se presentan dichas concentraciones.

**Tabla 3-1: Concentraciones máximas permitidas para el Test EPA**

Sustancia	CMP (mg/l)
Arsénico	5
Cromo	5
Mercurio	0.2
Plomo	5
Selenio	1
Bario	100
Cadmio	1
Plata	5

Particularmente en las Plantas de Tratamiento de Efluentes, se deben tener en consideración aparte del arsénico, al plomo, al cadmio, y en cierta medida al selenio, los cuales podrían eventualmente afectar la estabilidad del residuo sólido generado, ya que si se desea obtener un calcinado estable estos elementos deben cumplir el test.

### 3.2.2 Comparación entre diseño operación

Durante los años 2005 y 2006, cerca de un 80% de los sólidos calcinados no cumplió con los parámetros establecidos de diseño, los que indicaban que el arsénico debía salir 100% estabilizado. Por otro lado, el agua tratada tampoco cumplía con las condiciones originales, en el año 2005 en la PTE 1, tuvo un cumplimiento sólo el 20% del tiempo. Por otro lado la PTE 2 cumplió solamente en un 35% del tiempo.

Las aguas tratadas de las PTE's son recicladas al sistema de enfriamiento de escorias, donde es usada como agua de reposición, evitando convertirlas en un RIL. La concentración actual de impurezas que contiene el agua tratada restringe el reciclo de esta agua en algunas áreas de proceso de la Fundición. Por tanto, si se mejora la calidad del agua hasta el cumplimiento del DS 90 para RILES, se le podrían dar más usos.

Actualmente la PTE 2 opera en condiciones más altas, que las consideradas en el diseño. En el caso de la PTE 1, se tiene una holgura, pero generalmente se opera bajo el flujo estimado en diseño. Como por ejemplo el flujo de ácido débil, que entra en cada una fluctúa entre un 10 a 12 m<sup>3</sup>/h, y el agua tratada producida por cada planta es entre 13 a 15 m<sup>3</sup>/h. La cantidad de calcinado producido entre estable e inestable es cercano a los 30 tpd por parte de la PTE 1, y de 45 tpd desde la PTE 2.

A continuación en la Tabla 3-2 se presentan los parámetros más relevantes, de la PTE 1 en relación al diseño y la operación actual de la planta. Ambas comparaciones se basan en la operación normal de la planta.

**Tabla 3-2: Comparación Situación Diseño con Actual (PTE 1)**

Parámetro	Situación de Diseño	Situación actual
Flujo	20 [m <sup>3</sup> /h]	8-12 [m <sup>3</sup> /h]
Concentración de As	6.4 [g/l]	6-14 [g/l]
Carga de As	128 [kg/h]	90-160 [kg/h]
Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	28 [g/l]	35-80 [g/l]
Carga de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	560 [kg/h]	420-640 [kg/h]
Calcinado	1.2 [tph]	1.0 – 1.4 [tph]
% Calcinado estable en As	100	80 - 85
[As], agua tratada, ppm	< 1 ppm	< 1 ppm, sólo el 20%

En el caso de la PTE 2, se muestra en la Tabla 3-3

**Tabla 3-3: Comparación Situación Diseño con Actual (PTE 2)**

Parámetro	Situación de Diseño	Situación actual
Flujo	10.3 [m <sup>3</sup> /h]	9-12 [m <sup>3</sup> /h]
Concentración de As	12.7 [g/l]	9-16 [g/l]
Carga de As	131 [kg/h]	81-192 [kg/h]
Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80 [g/l]	75-130 [g/l]
Carga de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	824 [kg/h]	675-1170 [kg/h]
Calcinado	2.0 [tph]	1.7 – 3 [tph]
% Calcinado estable en As	100	80 - 85
[As], agua tratada, ppm	Menor a 0.5 ppm	< 1 ppm, sólo el 35%

Según los antecedentes presentados para las plantas de efluentes, en las tablas, se pueden considerar las siguientes puntos críticos en cada etapa del proceso:

### a). Neutralización-Precipitación

Dadas las altas cargas de ácido sulfúrico (mayor que el diseño) del efluente que entra en las PTE, en las etapas de precipitación y neutralización se generan altas cantidades de sólidos, principalmente yeso, y arsenito de calcio, lo que genera una sobrecarga de los espesadores primarios, lo cual llevaría a disminuir el flujo de ácido débil, para de esta manera reducir la carga de sólidos en suspensión, en los rebases de los espesadores.

Así también, se tiene que las altas cargas de arsénico, generan una mayor cantidad de sólidos sedimentados, y por otro lado, en el rebalse del espesador se aumenta la concentración de arsénico residual, que entra en la segunda etapa de precipitación, y por lo tanto la concentración de arsénico en el agua tratada.

Ante este aumento de carga de sólidos es importante considerar, que las rastras de los espesadores deben soportar una mayor cantidad, para que no ocurran detenciones debido al alto torque generado.

Por otro lado, la generación de lodos es mayor, y esto llevaría a un rebalsamiento del estanque de acumulación, lo cual no permite realizar detenciones para una limpieza más exhaustiva de los filtros. Si los filtros se detienen por un tiempo mayor al de la capacidad de los estanques de lodos, implicaría acumular efluentes, y se debería detener la PLG.

### b). Filtración

Este paso de la operación, puede verse afectado por diversos factores como por ejemplo en la PTE 1, puede existir una baja de presión, para la etapa de compresión del queque en los filtros prensas, o en la PTE 2 una reducción en el tiempo del ciclo en el filtro larox, lo cual resultaría en un queque de humedad más alta de la deseada, lo cual dificulta el transporte. Además el queque húmedo, se queda adherido en las

paredes de las tolvas, y en las alas de los tornillos. Con respecto a lo mismo, el queque se adhiere en la sección de entrada del tambor del secador (PTE1), y calcinador (PTE2).

Actualmente en la PTE1, sólo uno de los filtros opera, el otro queda “stand by”, debido a la capacidad limitada del sistema de transporte y manejo del queque húmedo hacia el secador de la PTE 1.

### c). Secado-Calcinación

En la etapa de secado de la PTE 1, se encuentran en el interior unos alzadores, que tienen por función enviar el queque desde la parte más baja hasta la más alta del secador, logrando de ésta forma un desmembramiento, lo cual ayuda a aumentar la superficie de contacto entre el sólido y los gases. A continuación el material seco ( $\pm 10\%$  de humedad) fluye hacia el intercambiador, permitiendo de esta forma, una transferencia de calor eficiente para los sólidos, logrando las altas temperaturas de calcinación.

Por otro lado en la PTE 2, queque húmedo entra al secador/calcinador, en forma de bolas de material, quedando pegado en las paredes internas del equipo. Los alzadores de este equipo, no son del todo adecuados, para romper el material en piezas menores. Sólo una vez secas, éstas bolas se quiebran permitiendo una mejor transferencia de calor.

Actualmente, el calcinador de la PTE 2, es operado sólo al 50% de su capacidad calorífica. Es posible doblar el flujo de combustible, pero un aumento en la alimentación del queque, traería problemas por la formación de bolas de material.

La construcción de los calcinadores es distinta en cada planta. En la PTE 2, el calcinador posee un quemador que calienta en forma directa los sólidos (no existe un cilindro adicional interno). El oxígeno es consumido por la combustión en el quemador. Luego, para aumentar la concentración de oxígeno es necesario introducir

un gran volumen de aire secundario. Para lograr temperaturas, razonablemente altas, que permitan convertir el arsénico en  $As^{+5}$ , el consumo de petróleo es elevado, y por lo cual no siempre se logran alcanzar temperaturas adecuadas para estabilizar el 100% del arsénico.

### d). Transporte del material seco

El sistema de transporte del calcinado en la PTE 1, desde el calcinador hasta la tolva de almacenamiento del ensacado, es un transportador de capacho, el cual, no es altamente confiable, debido a que presenta fallas de entramamiento de los capachos y cortes de cadena.

El sistema de transporte del calcinado de la PTE2 (transportador tubular), presenta muchas fallas debido al entramamiento por sobrecarga, y por el diseño inadecuado, para transportar material muy fino. Los tornillos enfriados por agua en la descarga del calcinador deben ser adecuados, para una capacidad mayor. La eficiencia de enfriamiento es muy baja, por lo tanto es necesario efectuar modificaciones para asegurar temperaturas bajas del calcinado entrando al ensacamiento, para evitar eventuales daños a los “maxibag”.

### e). Ensacamiento

En la actualidad el sistema de ensacamiento, cuenta con la capacidad necesaria para ensacar el calcinado de las plantas. La holgura del ensacamiento, sólo puede aguantar sobrecargas puntuales, y una falla en la unidad implicaría una detención en el proceso de ensacado. No existen equipos “stand by”, por lo que si existiese algún aumento mayor de material a ensacar, resultaría una detención de la PTE.

### f). Control en las PTE's

Actualmente el control de la PTE 1, se efectúa mediante Controladores Lógicos Programables (PLC), y presenta el problema de que no se encuentran comunicados con el Sistema de Control Distribuido (DCS) existente, por lo cual no es posible controlar en línea algunos procesos de esta planta, desde la sala de control. Los



instrumentos de terreno son en su mayoría locales, por lo que no es posible asegurar un control adecuado de pH en las etapas de neutralización y precipitación. En algunas ocasiones es necesario agregar cal en forma manual, por lo menos en una etapa, debido a las fallas en la instrumentación. En general, el control sobre la adición de reactivos no es el óptimo, para poder realizar un buen control del proceso. Finalmente es importante señalar, que además de realizar modificaciones a la operación actual, debe existir una mayor flexibilidad a la operación actual de las PTE's, por lo que se están evaluando diversas alternativas tendientes a optimizar y mejorar la operación actual. Asimismo, estas alternativas están orientadas al cumplimiento del DS 148, y una flexibilidad operacional.

Con respecto a las diversas problemáticas enunciadas en este Capítulo, se pueden mencionar algunas alternativas de mejora:

- Para mejorar el transporte del material en la PTE 1 en este punto podría ser importante reemplazar el sistema por uno con mayor capacidad. En el caso del sistema de transporte de la PTE 2 debería ser reemplazado por uno más confiable y con mayor capacidad.
- La instrumentación de la PTE 1, debería encontrarse comunicada al DCS, y cambiar el sistema actual de los PLC. La instrumentación de la PTE2 debe ser optimizada, generando un sistema único de control con comunicación, directa al DCS existente.
- Así también, se debería contar con algún respaldo de energía eléctrica para los motores de las etapas claves de las plantas, ya que así se evitaría que las rastras y agitadores se traben debido a la decantación de sólidos.

### 3.3 Muestreos a las PTE's

Dadas las características y problemáticas presentadas, se realizaron una serie de muestreos con la finalidad de poder tener certeza de los puntos de la planta, donde se producen diferencias entre lo diseñado, y lo actual. A continuación se presenta la Tabla 3-4, que es un extracto de los resultados obtenidos<sup>19</sup>, a partir de las muestras tomadas el día 24 de Abril del 2007 en turno A:

**Tabla 3-4: Resultados de muestreos a Plantas**

Etapa	Parámetro	PTE 1	PTE 2
Lechada de cal	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	21.2	13.9
	Pb [mg/l]	1.88	1.63
Efluente	As [g/l]	10.5	14.3
	Pb [mg/l]	200	240
Rebose Esp-1	As [mg/l]	59.4	33
Precipitación As	As [mg/l]	65	110
Filtro Prensa	As [%]	6.9	6.5
Agua Tratada	As [mg/l]	9.2	9.8
	Pb [mg/l]	0.12	0.07
Calcinado	As [%]	6.6	6.3
	Pb [%]	0.68	0.73

Desde los resultados obtenidos se pueden interpretar las siguientes conclusiones:

- Lechada de cal
  - En la alimentación de lechada de cal existe Plomo y Cadmio, en cantidades muy menores en ambas plantas.
  - El porcentaje de Ca(OH)<sub>2</sub> es mayor en la PTE 1.
  
- Efluente
  - Existe una cantidad importante de plomo.
  - Se encuentra una cantidad mayor de sulfatos en la PTE 2.

<sup>19</sup> Resultados de todos los muestreos en Anexo A.1.2 y A.1.3.

- Rebose Espesador 1
  - La cantidad de arsénico en el rebose se ve disminuida drásticamente.
  - El cobre y el fierro disminuyen su presencia en la solución.
  
- Underflow del Espesador 1
  - Existe un alto porcentaje de arsénico presente en lodo de salida.
  - La concentración de sulfatos es mayor en la PTE 2, como es de suponer.
  
- Precipitación de arsénico
  - La concentración de arsénico se ve notablemente disminuida en ambas plantas.
  - El fierro presente es mayor en la PTE 2.
  
- Calcinado
  - El porcentaje de sulfatos presentes es mayor en la PTE 2.
  - El fierro y el cobre se mantienen en porcentajes bajos.
  
- Agua Tratada
  - Como se ha mencionado anteriormente la concentración de arsénico excede la norma.
  - La concentración de plomo no es tan elevada, es menor a la establecida por la norma.

Así también se analizó una muestra de Efluente de la Planta de Limpieza de Gases n° 2, de forma de identificar la presencia del plomo en solución o efectivamente como un insoluble. Esta muestra se dejó decantar durante una semana, y del líquido superficial la concentración de plomo era cercana a 32 [ppm], con lo que se asume la presencia de Plomo como un sólido ( $\text{PbSO}_4$ ).

Asimismo, mediante otro análisis se identificó, y se analizó la distribución, en el sólido y en el líquido. Para los efluentes de ambas Plantas de Limpieza de Gases, se presentan los resultados en la Tabla 3-5.

**Tabla 3-5: Distribución de Plomo en Efluente de las PLG's**

Medición	PLG 1	PLG 2
Plomo total [ppm]	530	2090
Plomo en solución [ppm]	6.7	7.1
Plomo en sólido [ppm]	523.3	2082.9
% del plomo en el sólido	98.7%	99.9%

Con estos análisis realizados se puede deducir, que gran parte del plomo está en el sólido, pero según el análisis anterior al plomo, se llega a la conclusión que el plomo forma parte de un compuesto, fino que es difícil filtrar, y que se podría presentar como sólido en suspensión, por lo cual, si se desea realizar alguna filtración al efluente, es importante que la tela o membrana a utilizar impida el paso de partículas muy finas.

Así también, se determinó el comportamiento de algunos elementos en la etapa de calcinación, por lo que se tomaron muestras previas (queque húmedo), y posteriores (calcinado final), de forma de determinar el cambio en la solubilidad, que pudiesen presentar algunos elementos. La solubilización en la calcinación puede afectar negativamente la estabilidad del producto final, ya que el Test EPA, podría arrojar resultados negativos. En la experiencia a llevar a cabo, se calcinaron los queques húmedos en un horno del Laboratorio, que simula la etapa de calcinación, con la respectiva temperatura y el medio oxidante presente.

Los resultados<sup>20</sup> obtenidos para el test EPA, para la PTE 1, y PTE 2 se muestran en las Tablas 3-5 y 3-6, respectivamente:

---

<sup>20</sup> Resultados de concentración en cada muestra en Anexo A.1.3 y A.1.4

**Tabla 3-6: Resultados Muestra de Test EPA de PTE 1**

	Unidad	Limite permitido	Queque húmedo	Calcinado	Calcinado LAB
As	ppm	5	13	75	0.72
Cd	ppm	1	< 0.01	0.15	0.84
Pb	ppm	5	0.79	<0.01	0.2
Cr	ppm	5	<0.01	0.06	0.05
Se	ppm	1	0.04	0.37	0.25
Hg	ppm	0.2	0.05	0.02	<0.01
Ba	ppm	100	<0.01	0.03	0.12
Ag	ppm	5	<0.01	<0.01	<0.01

**Tabla 3-7: Resultados Muestra de Test EPA de PTE 2**

	Unidad	Limite permitido	Queque húmedo	Calcinado	Calcinado LAB
As	ppm	5	370	355	330
Cd	ppm	1	0.69	1.2	0.84
Pb	ppm	5	0.03	0.46	0.2
Cr	ppm	5	0.11	0.18	0.11
Se	ppm	1	0.03	0.63	0.93
Hg	ppm	0.2	0.03	<0.01	<0.01
Ba	ppm	100	<0.01	<0.01	<0.01
Ag	ppm	5	<0.01	<0.01	<0.01

Con las características de los resultados obtenidos se puede deducir que en ambas plantas no se cumple cabalmente la estabilización del arsénico, ya que en ambos casos fue muy amplia la diferencia. Por otro lado en la Planta 1, el plomo logró aprobar el test EPA, pero en la Planta 2, no fue así, lo que indica, que se deberían estudiar algunas condiciones operativas del proceso de Calcinación de la Planta 1 para poder asimilarlos a la Planta 2, quizás se puede deber a que el proceso de secado previo en la planta 1 ayude a la insolubilización del plomo. Por último, es importante hacer hincapié en los elementos que ven aumentada su solubilidad, ya que a pesar de encontrarse lejos del límite de la norma, en algún momento podrían decidir la estabilidad de un residuo, por lo que sería necesario estudiar el comportamiento de cada uno en mayor profundidad.

## **CAPITULO 4 BALANCES DE MASA Y ENERGIA DE PTE'S**

Los balances de masa a ambas plantas, son el punto principal de la modelación. La primera planta en analizar fue la PTE 2, ya que existían una mayor cantidad de datos que la PTE 1.

El balance inicial de la PTE 2, fue generado a partir de los datos de diseño existentes, los cuales se encontraban en sus diagramas PFD<sup>21</sup>. La idea principal es poder generar inicialmente un balance, que contenga todas las características de diseño, de forma que posteriormente pudiese ser modificado y ajustado para acercarlo a los datos operativos.

Los balances fueron divididos en dos etapas del proceso global. La primera es la etapa de Neutralización, donde se estructuraron los balances de masa y energía de los equipos por separados, y la segunda es la etapa de Calcinación en donde se agruparon los balances de masa y energía, debido a los requerimientos, que lo hacían necesario.

De esta misma forma se realizó el mismo análisis a la PTE 1, teniendo en cuenta que existen diferencias entre ambos procesos. Además los datos, que se tienen de este proceso no son tan claros, y completos como en la PTE 2.

En este Capítulo, se entregarán las características más relevantes de los Balances de Masa y Energía por equipos, generados a partir de los compuestos identificados en el Capítulo 2. Con los antecedentes recabados mediante trabajo en terreno, y así también, mediante análisis a los procesos de las Plantas de Efluente, se obtendrán importantes datos, y resultados, que serán objeto de análisis.

---

<sup>21</sup> PFD: Diagramas de Flujo del Proceso

## 4.1 Etapa de neutralización PTE N°2

### 4.1.1 Balance de masa<sup>22</sup>

Para poder generar un modelo óptimo de la Planta de Efluentes N° 2, se realizaron los balances respectivos, de manera tal que el modelo de las Plantas pudiese ser analizado. A continuación se explicarán los parámetros más relevantes evaluados, así como también se entregarán las ecuaciones de los balances desarrollados.<sup>23</sup>

#### a). Efluente

El efluente utilizado en las condiciones de diseño para la Planta de Efluentes N° 2, se muestra en la Tabla 4-1. Tal como se ha mencionado anteriormente, no se evaluó el total de elementos componentes del Efluentes, ya que no está en los alcances del trabajo, y además no se cuenta con la información necesaria.

**Tabla 4-1: Antecedentes de Diseño de la PTE 2**

Parámetro	Valor
Flujo (m <sup>3</sup> /h)	10.31
Flujo (kg/h)	10813.9
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1048.4
% Sólidos	1.52
Polvos (g/l)	15.9
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	79.9
As [ppm]	12668.9
Fe [ppm]	904.2
Cu [ppm]	1530.0
Pb [ppm]	6
Zn [ppm]	1712.2

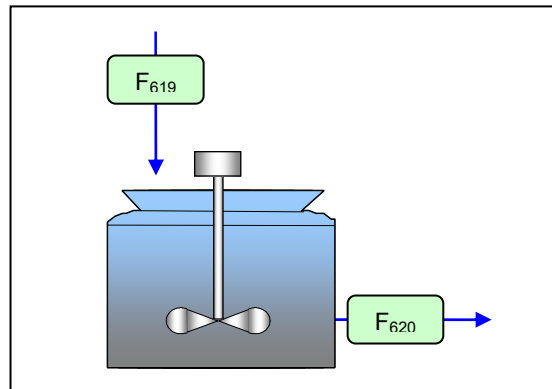
<sup>22</sup> Los Resúmenes de los balances de masa de la PTE2, desarrollados se encuentran en Anexo 5

<sup>23</sup> Los números utilizados para las corrientes corresponden a la nomenclatura de los Diagrama de Diseño

b) Estanque colector de Efluentes Ácidos

En este estanque además del ácido débil proveniente de la Planta de Limpieza de Gases n° 2, ingresan dos flujos ácidos que sólo son ocupados ocasionalmente, por lo que para efectos del modelo no serán evaluados.

Balance masa:  $F_{619} = F_{620}$  (4.1)



**Figura 4-1: Balance de Masa a Estanque Colector**

Número de corriente		F <sub>619</sub>	F <sub>620</sub>
Descripción		Acido débil desde Stripper	Efluente Ácido a Neutralización
Flujo	m <sup>3</sup> /h	10.3	10.3
	kg/h	10805.0	10805.0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1048.0	1049.0
PH		-0.2	-0.2
Temperatura	°C	47.0	47.0

- Las variables de entrada al balance inicial hacen referencia a la corriente del ácido proveniente desde la Planta de Limpieza de Gases, y son las que podrán ser modificadas para sensibilizar el modelo.



b) Estanque de Neutralización

Balance masa:  $F_{620} + F_{623} = F_{622}$  (4.2)

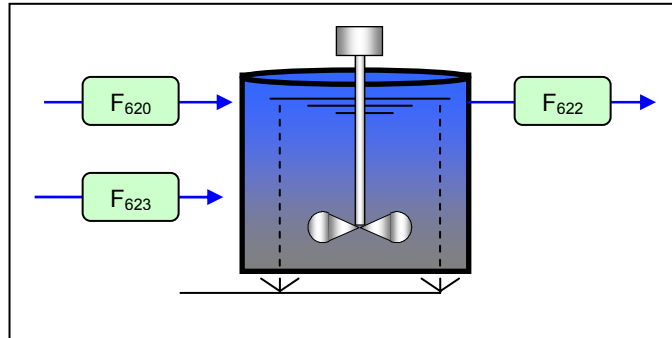
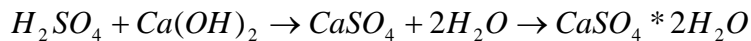


Figura 4-2: Balance de Masa a Estanque de Neutralización

Reacción considerada en el Estanque:



Número de corriente		F <sub>623</sub>	F <sub>620</sub>	F <sub>622</sub>
Descripción		Reciclo a Neutralización	Efluente Ácido a Neutralización	Ef. Neutralizado a Precipitación
Flujo	m <sup>3</sup> /h	97.3	10.3	107.8
	kg/h	103985.8	10805.0	114790.6
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1068.7	1049.0	1064.9
PH		11.5	-0.2	10.5
Temperatura	°C	50.0	47.0	50.0

- En la reacción de Neutralización se consideró una conversión total, del reactivo limitante, que en ese caso es el ácido.
- La adición de cal corresponde al sistema global (Neutralización-Precipitación). Se consideró un exceso en un rango de 5 a 10 % del global de las reacciones del sistema mencionado.

c) Estanque de Precipitación

Balance de masa  $F_{602} + F_{622} + F_{630} = F_{624} + F_{623}$  (4.3)

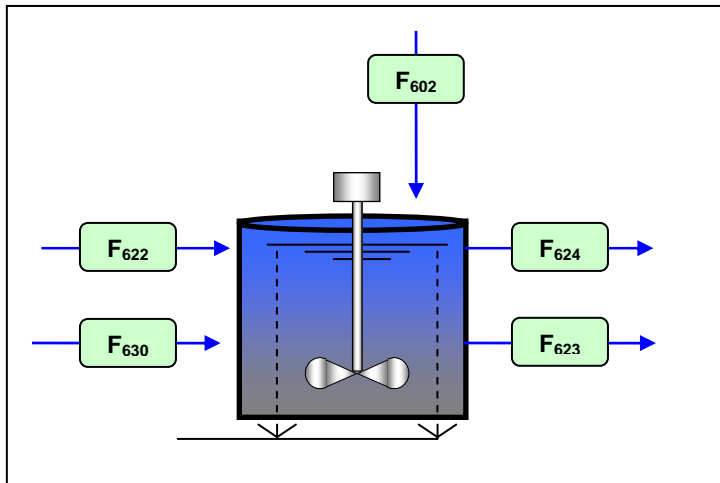


Figura 4-3: Balance de Masa a Estanque de Precipitación

Número de corriente		F <sub>622</sub>	F <sub>630</sub>	F <sub>602</sub>	F <sub>623</sub>	F <sub>624</sub>
Descripción		Efluente Neutralizado	Descarga Espesador Secundario	Lechada a Estanque Precipitación	Reciclo a Neutralización	Descarga Estanque de Precipitación
Flujo	m <sup>3</sup> /h	107.8	0.3	5.8	97.3	16.2
	kg/h	114790.6	270.1	6256	103985.8	17331
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1064.9	1033	1085	1068.7	1068.7
PH		10.5	8.3	11.5	11.5	11.5
Temperatura	°C	50	40	40	50	65

- Al igual, que en el Estanque de Neutralización se consideró la adición de Lechada de Cal global al Sistema.
- La descarga del Estanque estaba controlada por el pH de operación normal (11.5)

- En las reacciones consideradas se trabajó con un rango en el grado de conversión, que se presenta en la siguiente tabla.

Reacción	Rango de Conversión
$CuSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Cu(OH)_2 + CaSO_4$	95- 99 %
$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4$	95- 99 %
$ZnSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Zn(OH)_2 + CaSO_4$	95- 99 %
$2HAsO_2 + 2Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(AsO_2)_2 Ca(OH)_2 + 2H_2O$	90- 95 %
$2H_3AsO_4 + 4Ca(OH)_2 \rightarrow Ca_3(AsO_4)_2 Ca(OH)_2 + 6H_2O$	90- 95 %

d) Alimentación de cal al sistema

Inicialmente se calcula la cal estequiométrica, por lo que se deben considerar las reacciones tanto del Estanque de Neutralización como del Estanque de Precipitación.

En cada reacción se considera la cal estequiométrica. Para esto se debe obtener la relación obtenida a partir de los pesos moleculares de cada compuesto, como se muestra en la Tabla 4-2

**Tabla 4-2: : Relaciones entre Cal y Compuestos**

Compuesto	Relación
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.76
CuSO <sub>4</sub>	1.3
FeSO <sub>4</sub>	1.2
ZnSO <sub>4</sub>	1.1
HAsO <sub>2</sub>	0.7
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	1

Un aspecto interesante de mencionar es el de la solubilidad de la cal. Este cálculo es utilizado para obtener el pH que se logra en cada etapa del proceso. Según mediciones obtenidas, desde la corriente de lechada de cal, proviene hacia las PTE's

a una temperatura promedio de 43 °C, si se asume linealidad del Kps respecto de la temperatura, se obtiene:

$$Kps_{43} = 2.4E - 6 [M^2] \quad (M=Molaridad)$$

La cal que se encuentra en solución se descompone según la siguiente reacción:



$$Kps = |Ca^{+2}| * |(OH^-)|^2$$

La concentración de Calcio y iones hidroxilos es:  $|Ca^{+2}| = 2|OH^-|$

Reemplazando queda:  $|Ca^{+2}| = 1.33E - 2 [M]$

Para los hidroxilos resulta  $|OH^-| = 6.69E - 3 [M]$

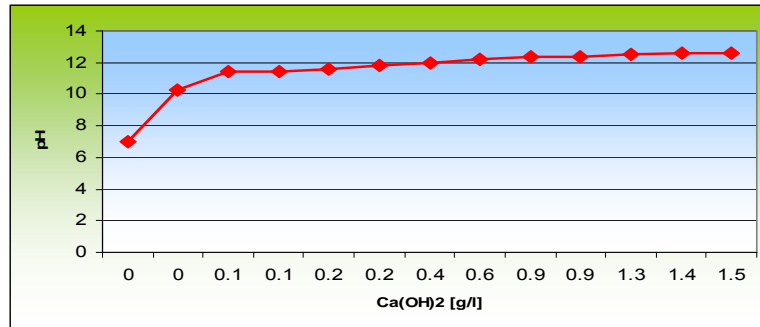
La concentración de Ca(OH)<sub>2</sub> en solución sería:

$$Ca(OH)_2 = 1.33E - 2 \left[ \frac{mol}{lt} \right] * 74.1 \left[ \frac{g}{mol} \right] = 0.98 \left[ \frac{g}{lt} \right]$$

El pH resultante con ésta concentración de Hidróxido de Calcio, es:

$$pH = 14 + LOG(OH^-) = 11.8$$

Tal como se mencionó anteriormente, la lechada de cal es preparada, en una planta anexa, que entrega los requerimientos necesarios, a las Plantas de Tratamiento. La solubilidad del hidróxido de calcio varía con el pH. A continuación en la Figura 4-4, se muestran los resultados teóricos de la cal a 25 °C.



**Figura 4-4: Variación de la Solubilidad de la Cal respecto el pH**

Tal como se presenta en la Figura 4-4, la máxima solubilidad, es cercana a los 1.53 [g/l], que se presenta a un pH de 12.6.

f). Nodo 1 (Figura 4-5)

$$\text{Balance de masa } F_{624} + F_{643} = F_{625} \quad (4.5)$$

Número de corriente		F <sub>643</sub>	F <sub>624</sub>	F <sub>625</sub>
Descripción		Floculante a Esp. Primario	Descarga Estanque de Precipitación	Alimentación a Espesador Primario
Flujo	m <sup>3</sup> /h	0.5	16.2	16.8
	kg/h	549.4	17331	17880.4
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000	1068.7	1067.2
PH		*	11.5	11.5
Temperatura	°C	25	65	65

- El floculante adicionado, se agrega dependiendo del contenido de sólidos proveniente de la descarga del Estanque de Precipitación, el rango considerado es de 0.02-0.05 [masa de Floculante / masa de sólidos]

g). Espesador Primario

Balace de masa  $F_{625} = F_{626} + F_{627}$  (4.6)

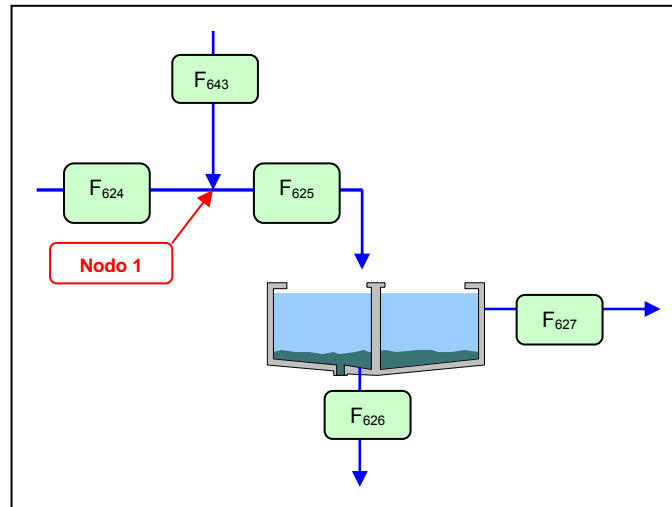


Figura 4-5: Balance de Masa a Espesador Primario

Número de corriente		$F_{625}$	$F_{627}$	$F_{626}$
Descripción		Alimentación a Espesador Primario	Overflow Espesador Primario	Descarga de Espesador Primario
Flujo	m <sup>3</sup> /h	16.7	10.6	5.9
	kg/h	17822.4	10641.3	7239.1
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1067.2	1000	1231
PH		11.5	11.5	11.5
Temperatura	°C	65	60	60

- El rango del porcentaje de sólidos presentes en el flujo de descarga inferior del espesador, se encuentra entre un 20 y 30%.

h) Estanque de Precipitación de Arsénico

Balance de masa  $F_{627} + F_{603} + F_{653} + F_{636} + F_{618} = F_{628}$  (4.7)

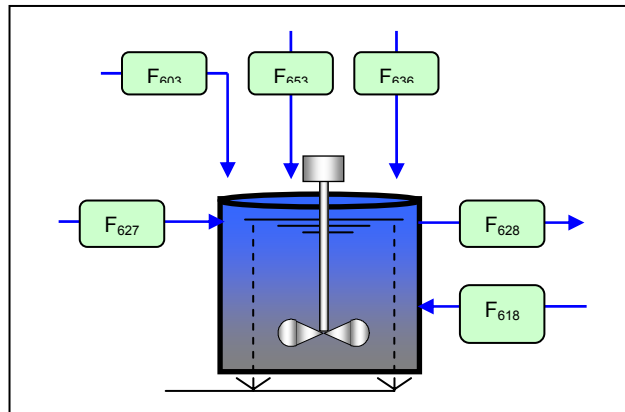


Figura 4-6: Balance de Masa a Estanque de Precipitación de As

Número de corriente		F <sub>627</sub>	F <sub>603</sub>	F <sub>653</sub>	F <sub>636</sub>	F <sub>628</sub>	F <sub>618</sub>
Descripción		Overflow Espesador Primario	Lechada a Estanque Precipitación	Alimentación de Sulfato Férrico	Ácido Sulf a Precipitación de As	Descarga Estanque Precipitación As	Líquido filtrado
Flujo	m <sup>3</sup> /h	10.6	0.4	0.1	0.1	15.8	4.7
	kg/h	10641.3	434	24.6	94.7	15856.3	4662
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000	1085	1032.6	1049.2	1000	1000
PH		11.5	11.5			9	12
Temperatura	°C	60	40	25	40	55.5	30

- En las reacciones consideradas se trabajó con un rango en el grado de conversión, que se presenta en la siguiente tabla

Reacción	Rango de Conversión
$2H_3AsO_4 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2FeAsO_4 + 3H_2SO_4$	95- 99 %
$HAsO_2 + O_2(g) + H_2O + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2FeAsO_4 + 3H_2SO_4$	95- 99 %

i). Nodo 2 (Figura 4-7)

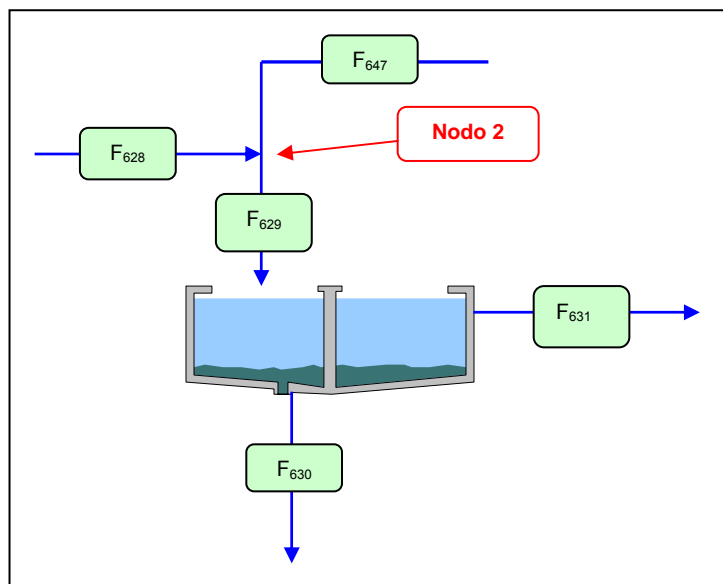
$$\text{Balance de masa } F_{628} + F_{647} = F_{629} \quad (4.8)$$

Número de corriente		F <sub>628</sub>	F <sub>647</sub>	F <sub>629</sub>
Descripción		Descarga Estanque Precipitación As	Floculante a Esp. Secundario	Alimentación Espesador Secundario
Flujo	m <sup>3</sup> /h	15.8	0.2	15.9
	kg/h	15755.3	164	15919.4
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000
PH		9		9
Temperatura	°C	55.5	25	55

- El floculante adicionado, se agrega dependiendo del contenido de sólidos proveniente de la descarga del Estanque de Precipitación de Arsénico, el rango considerado es de 0.2-0.5 [masa de Floculante / masa de sólidos]

j). Espesador Secundario

$$\text{Balance de masa } F_{629} = F_{630} + F_{631} \quad (4.9)$$



**Figura 4-7: Balance de Masa a Espesador Secundario**



Número de corriente		F <sub>629</sub>	F <sub>630</sub>	F <sub>631</sub>
Descripción		Alimentación Espesador Secundario	Descarga Espesador Secundario	Overflow Espesador Secundario
Flujo	m <sup>3</sup> /h	15.9	0.3	15.6
	kg/h	15919.4	270.1	15649.2
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000	1033	1000
PH		9	8.3	
Temperatura	°C	55	40	50

- El rango del porcentaje de sólidos presentes en el flujo de descarga superior del espesador, se encuentra entre un 25 y 35%.
- El filtro de sólidos fue trabajado con un rango de eficiencia entre un 60 a 70%, de tal manera que la humedad resultará con un valor cercano al 40%

#### 4.1.2 Balance de energía<sup>24</sup>

El balance de energía tenía como objetivo utilizarlo como antecedente de las Plantas de Tratamiento de Efluente. Para realizar el balance de energía a nivel del modelo se utilizó una fórmula general de balance de energía para cada compuesto, que se muestra a continuación.

$$H_i = \sum_{j=1}^k \left( n_j * (\Delta H_{F_j}^0 + C p_j * (T - T_0) + \Delta H_{SLN_j}) \right) \quad (4.10)$$

Los datos termodinámicos para cada compuesto fueron obtenidos desde diversas fuentes<sup>25</sup>.

#### 4.1.3 Entalpías de Reacción

En esta primera etapa de Neutralización, se presentan las entalpías de reacción estándar, obtenidas a partir de los datos proporcionados, se muestran a continuación en la Tabla 4-3.

<sup>24</sup> Los Resúmenes de los Balances de Energía de la PTE2, desarrollados se encuentran en Anexo 4

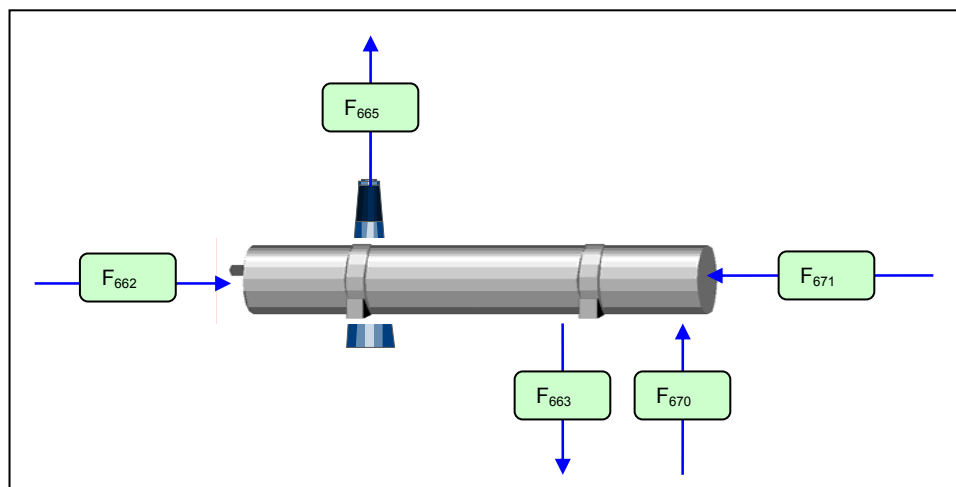
<sup>25</sup> Referencia Bibliográfica [12], [14], [15]

**Tabla 4-3: Entalpías Estándar de Reacción de Etapa de Neutralización**

Reacciones	$\Delta H_R^0 (25^\circ) \text{ [kcal]}$
$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$	-53.811
$CuSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Cu(OH)_2 + CaSO_4$	-30.292
$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4$	-22.676
$ZnSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Zn(OH)_2 + CaSO_4$	-27.484
$2HAsO_2 + 2Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(AsO_2)_2 \cdot Ca(OH)_2 + 2H_2O$	-44.868
$2H_3AsO_4 + 4Ca(OH)_2 \rightarrow Ca_3(AsO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2 + 6H_2O$	-59.993
$2H_3AsO_4 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2FeAsO_4 + 3H_2SO_4$	51.466
$HAsO_2 + 2H_2O + O_2(g) + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2FeAsO_4 + 3H_2SO_4$	-25.084

## 4.2 Etapa de Calcinación

En esta etapa fue necesario contar con el balance de masa y energía simultaneo, dadas las características de la etapa de secado – calcinación.



**Figura 4-8: Balance de Masa a Secador-Calcinador**

$$\text{Balance de masa: } F_{662} + F_{670} + F_{671} = F_{665} + F_{663} \quad (4.11)$$

Numero de corriente		F <sub>662</sub>	F <sub>670</sub>	F <sub>671</sub>	F <sub>665</sub>	F <sub>663</sub>
Descripción		Alimentación Calcinador	Alimentación Combustible	Aire a Calcinador	Gases Calcinación a Ciclón	Producto Calcinado
Flujo	m <sup>3</sup> /h	2.2	0.2	4210.2	8785.6	2.7
	kg/h	3107.8	147.3	4210.2	5622.8	1843.7
	Ton/día	74.6				44.2
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1400	840	1	0.6	679.5
Temperatura	C	30	30.5	30.5	180	800

- En los equipos anexos al Secador-Calcinador, que tenían como misión captar los polvos arrastrados, se consideraron rangos de eficiencia para cada uno:
  - Filtro Manga: 95-100%
  - Ciclón: 90-95%
- En las reacciones consideradas se trabajó con un rango en el grado de conversión, que se presenta en la siguiente tabla

Reacción	Rango Conversión
$CaSO_4 * 2H_2O \rightarrow CaSO_{4(s)} + 2H_2O_{(g)}$	100 %
$[Ca(AsO_2)_2 Ca(OH)_2 + Ca(OH)_2] + O_2 \longrightarrow Ca_3(AsO_4)_2 + 2H_2O_{(g)}$	80-90 %
$[Ca_3(AsO_4)_2 Ca(OH)_2] \longrightarrow Ca_3(AsO_4)_2 (crist.) + CaO + H_2O$	90- 95 %
$Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO + H_2O$	98-100 %
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	100 %

- Por otro lado, es importante mencionar, que para realizar los cálculos respectivos, se asumió una etapa previa de entrada del aire con el combustible, simulando ser una cámara de combustión de manera de facilitar los cálculos. El combustible utilizado en el calcinador es variable, ya que depende de la abundancia o escasez del Gas Natural, pero además se tiene la variante del Petróleo, los cálculos fueron realizados con el primero de éstos.

Esta etapa final de la Planta se debe contar con medio oxidante, de manera de entregar, al queque húmedo que ingresa una alta estabilización, y conversión del arsénico presente.

Las entalpías de reacción en la etapa de calcinación se presentan a continuación en la Tabla 4-4:

**Tabla 4-4: Entalpías estándar de reacción de Etapa de Calcinación**

Reacciones	$\Delta H_R^0$ (25°C) [kcal/kmol]
$CaSO_4 * 2H_2O \rightarrow CaSO_{4(s)} + 2H_2O_{(g)}$	30.179
$[Ca(AsO_2)_2 Ca(OH)_2 + Ca(OH)_2] + O_2 \longrightarrow Ca_3(AsO_4)_2 + 2H_2O_{(g)}$	-400.230
$[Ca_3(AsO_4)_2 Ca(OH)_2] \longrightarrow Ca_3(AsO_4)_2(crist.) + CaO + H_2O$	26.086
$Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO + H_2O$	26.602
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	-191.762

### 4.3 Comparación entre balances de diseño y modelo

Los puntos más interesantes de comparar entre el diseño de la PTE N°2, con respecto al modelo realizado, corresponden a la concentración del agua de descarte de la planta, así como también el calcinado producido.

#### 4.3.1 Resultados Balance PTE 2

##### a). Agua tratada

El primer punto de comparación, será el efluente líquido de la PTE N° 2, que a continuación se muestra en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5: Comparación Agua Tratada (PTE2)**

Parámetro	Diseño	Modelo	% Error
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	16	15.9	1%
As [ppm]	0.5	0.6	20%
Fe [ppm]	0.1	0.12	20%
Cu [ppm]	0.1	0.14	40%
Zn [ppm]	0.2	0.14	30%

b). Calcinado

El calcinado obtenido es un punto de suma importancia, en el modelo diseñado, dado que en las actuales condiciones operativas es un punto crítico de la operación.

**Tabla 4-6: Comparación calcinado (PTE 2)**

Parámetro [kg/h]	Diseño	Modelo	% Error
Flujo	1857.2	1843.7	1%
CaO	156.3	179	15%
CaSO <sub>4</sub>	1097	1051.2	4%
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	262.5	232.9	11%
Fe(OH) <sub>2</sub>	22.4	15	33%
Cu(OH) <sub>2</sub>	25.4	24.2	5%
PbSO <sub>4</sub>	*	3.8	*
Zn(OH) <sub>2</sub>	28.2	21.5	24%
Polvos	264.7	318.9	20%
FeAsO <sub>4</sub>	0.8	0.2	75%
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	*	50.3	*
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	*	0.8	*

Es importante notar, que en la comparación entre el modelo, y los datos de diseño existen diferencias de compuestos analizados, como es el caso del PbSO<sub>4</sub>, y de los arsenitos y arsenatos de calcio básicos.

En el caso del plomo se debe esencialmente, al estudio preeliminar, realizado en el Capítulo 2, en donde se identificó al  $PbSO_4$  como el compuesto que provenía en el efluente ácido, lo cual llevó a una diferenciación entre el modelo y el diseño.

Para el caso de los arsenitos y arsenatos de calcio básicos, existen estas diferencias principalmente, porque para las reacciones se supuso que no tenían una conversión completa, lo cual dista en un pequeño porcentaje respecto del diseño.

c). Insumos PTE

**Tabla 4-7: Comparación Insumos (PTE 2)**

Parámetro	Diseño	Modelo	% Error
Lechada de Cal [m <sup>3</sup> /h]	6.25	6.3	1%
Sulfato Férrico [m <sup>3</sup> /h]	0.22	0.21	5%
Floculante [m <sup>3</sup> /h]	0.77	0.76	1%

**4.3.2 Resultados balance PTE 1**

Debido a que los antecedentes recopilados desde los diagramas de diseño de la PTE 1, no eran suficientes, sólo serán comparados aquellos más relevantes.

a). Agua tratada y Calcinado

**Tabla 4-8: Comparación agua tratada y calcinado (PTE 1)**

Parámetro	Diseño	Modelo	% Error
Agua Tratada [m <sup>3</sup> /h]	24.3	23.1	5%
As en agua trat [ppm]	0.9	0.7	22%
Calcinado [kg/h]	1220	1258	3%

b). Insumos PTE

**Tabla 4-9: Comparación Insumos (PTE 1)**

Parámetro	Diseño	Modelo	% Error
Lechada de Cal [m <sup>3</sup> /h]	7	6.8	3%
Sulfato Férrico <sup>26</sup> [kg/h]	109	100	8%
Floculante [kg/h]	365	377	3%

#### 4.4 Análisis de Resultados

Dados resultados obtenidos, a partir del desarrollo de los balances iniciales de diseño, se pueden desprender los siguientes antecedentes, que se enuncian a continuación.

- Las plantas fueron diseñadas para tener como descarga un efluente con bajo contenido de arsénico, lo cual actualmente no es alcanzado.
- En los flujos de descarga de agua tratada, existen diferencias respecto de los flujos de diseño, con respecto de los modelo, lo cual se puede deber a alguna condición, que no fue evaluada en el desarrollo de los balances. Las concentraciones de los elementos mostradas son cercanas.
- Con respecto al calcinado comparado en la PTE 2, se tiene que hay bastante similitud de ambos resultados a pesar de que hay compuestos que no aparecen en el diseño, debido a las condiciones supuestas en el modelo realizado.
- En el caso de los insumos existe bastante similitud en ambos casos, lo cual es interesante notar principalmente, en la lechada, que es el insumo principal de la planta.
- Dado, que en el caso de la PTE 1, los antecedentes existentes, son escasos, también se pueden desprender algunas conclusiones interesantes a partir de los resultados del modelo trabajado. En el caso del agua tratada hay una cierta diferencia, entre ambos resultados, debido a que las diferencias en los

---

<sup>26</sup> Inicialmente se utilizaba FeCl<sub>3</sub>, pero actualmente se utiliza Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> igual que en la PTE 2

valores de concentración impactan fuertemente en el cálculo del error, a pesar de eso, los resultados de los flujos tienen porcentajes bajos de diferencia (5% PTE 1 y 1% PTE 2). En el caso del calcinado, hay una leve diferencia, que no afecta mayormente los resultados globales del modelo.

- Finalmente en el caso de los insumos de las PTE1, existe una gran similitud, entre ambos patrones, lo que indica un buen comportamiento del modelo.



## **CAPITULO 5 ANÁLISIS DE CONDICIONES ACTUALES DE LAS PTE's**

Para poder validar el modelo y ajustarlo a las condiciones reales de operación se debió recurrir a las mediciones disponibles en las Plantas de Tratamiento de Efluentes, entregadas por el sistema USPP, el cual indica valores de muestreo en el Laboratorio, extraídas cada cierto tiempo en puntos importantes de las plantas. Por otro lado, también existe un sistema que entrega mediciones de las plantas llamado *PI system*.

Aparte de estas mediciones obtenidas de ambos sistemas, se consiguieron datos históricos importantes de la operación de las Plantas de Efluentes. Con todos estos antecedentes se realizaron comparaciones con el modelo realizado a partir de las condiciones de diseño lo cual será verificado más adelante.

Por otro lado, se establecieron algunos análisis respecto del comportamiento de los calcinados obtenidos durante el año 2006. Estos análisis tenían como objetivo, entender el comportamiento real de las plantas e indagar algunos aspectos, que pudiesen ser relevantes en las operaciones de cada planta. Asimismo, la importancia de tener los datos actualizados de las plantas significa poder acercar de alguna u otra forma la teoría a la operación cotidiana, que en cierta medida pueden llegar a distar mucho.

En el presente Capitulo se dará un enfoque operativo, del comportamiento de ambas, plantas tomando datos proporcionados por las mediciones del Capitulo anterior. Por otro lado se compararán los resultados, que proporciona el modelo de balances realizado a partir del diseño, respecto de los datos de mediciones, y operación.

## 5.1 Bases de datos

Los datos obtenidos para tener los parámetros actuales de las plantas, fueron extraídos desde mediciones realizadas cada cierto periodo de tiempo (depende del objetivo de medición), a través del Laboratorio y desde datos en línea.

Los datos entregados por el Laboratorio de la USPP, entregan mediciones de concentración y calidad. Las muestras extraídas de las Plantas de Efluentes son en ambos casos lo mismo, o sea son paralelas unas con otras.

Los datos proporcionados por PI system (Plant Information System) hacen referencia, a flujos, presiones, pH, temperatura entre otros. Para las Plantas de Tratamiento de Efluentes, se realizaron diversos estudios para poder encontrar valores representativos óptimos para el uso del modelo. Los datos más utilizados para las Plantas de Tratamiento de Efluentes son los de flujo y pH.

El PI es un sistema de colección de software para servidor y clientes; diseñado para automatizar la captura, almacenamiento y presentación de la información de planta. También es frecuentemente utilizado como un integrador y plataforma de desarrollo para aplicaciones empresariales. Trabaja por medio de códigos llamados "Tag", que es el nombre único de un puntero a una serie de valores. Estos valores pueden ser archivados en PI System o leídos desde un sistema externo. Cada uno de los siguientes ejemplos pueden representar un tag:

- El flujo desde un medidor de flujo
- El modo de operación de un controlador
- Comentarios de texto de un operador
- El resultado del cálculo de un totalizador

Con estos antecedentes se trabajó en la modelación, de forma de recopilar la mayor cantidad de datos actualizados. Los puntos claves a analizar y entregados por estas dos bases de datos se mencionan a continuación, tomando en consideración que el

estudio se realizó específicamente para los años 2005 y 2006 por separado, para ajustar el modelo:

- Flujo de Entrada a la PTE
- pH de operación
- Concentración de Arsénico y Sulfato ( $\text{SO}_4$ ) del efluente
- Concentración de Arsénico del rebose del Espesador N°1
- Porcentaje de sólidos e Hidróxido de Calcio en la lechada de cal
- Concentración de Arsénico, Hierro, y su relación en el Rebalse del Estanque de Precipitación de Arsénico.
- Concentración del  $\text{Fe}^{+3}$  en el Sulfato férrico, que se agrega al estanque
- Porcentaje de sólidos en el Efluente, Espesador N°1, Estanque de Lodos y Agua de Filtrado
- Porcentaje de Calcio,  $\text{SO}_4$  y Arsénico, junto con la Razón Ca/As y las mediciones del Test EPA del Calcinado
- Porcentaje de humedad del queque húmedo

Cabe mencionar que para cada valor a considerar, se realizó, un análisis estadístico de forma de encontrar un valor representativo. Como en todo estudio, de tendencias existen datos que no deben ser considerados dado que pueden existir errores de medición, o mala entrega de datos. Tal como se mencionó, en las problemáticas con las que cuentan las plantas, la mala instrumentación es relevante a la hora de dar credibilidad a los datos, que eran proporcionados.

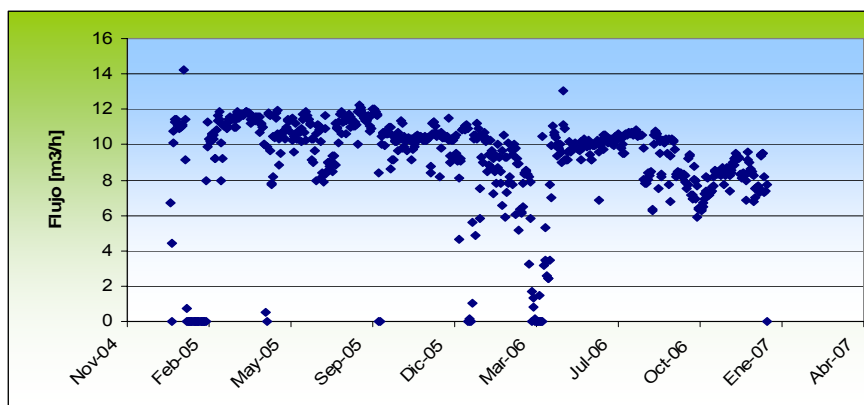
La recopilación de antecedentes de operación es un punto de gran importancia en el ajuste del modelo, ya que proporciona la base para la comparación.

## 5.2 Datos operativos

### 5.2.1 Flujos de las PTE's

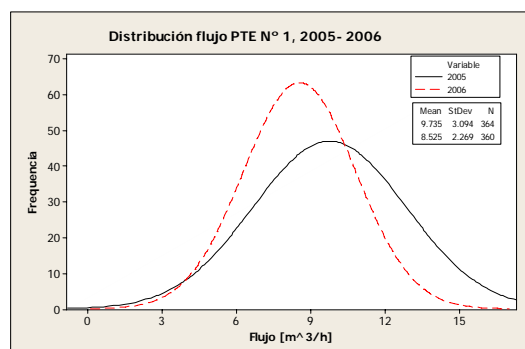
#### a). Flujo PTE 1

En primer lugar, se realizó, un estudio por separado para cada año considerado, de manera de tener un valor anual que sea representativo para el análisis del modelo. Las tendencias de los datos y su dispersión a través del tiempo, se muestran en la Figura 5-1, y así también se entregan los valores estimados para cada año en estudio.



**Figura 5-1: Flujo PTE 1, 2005-2006-Diario**

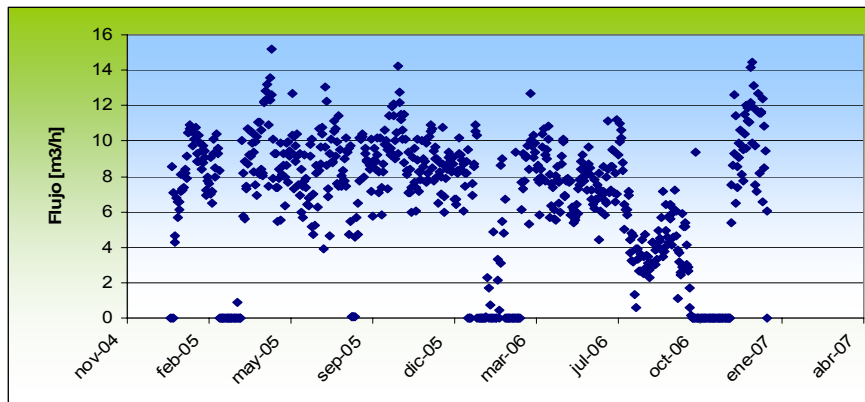
Los valores medianos de los flujos para los años 2005 y 2006, corresponden a 10.6 y 9.1 [m<sup>3</sup>/h], respectivamente. Como se puede apreciar en la Figura 6-1, existen periodos en los cuales el flujo sobrepasa la media, y así también periodos de baja. El análisis a la distribución de los datos (Figura 5-2), también es un buen parámetro para poder fijar el comportamiento de los datos considerados:



**Figura 5-2: Distribución de Flujo de entrada a la PTE 1**

b). Flujo PTE 2

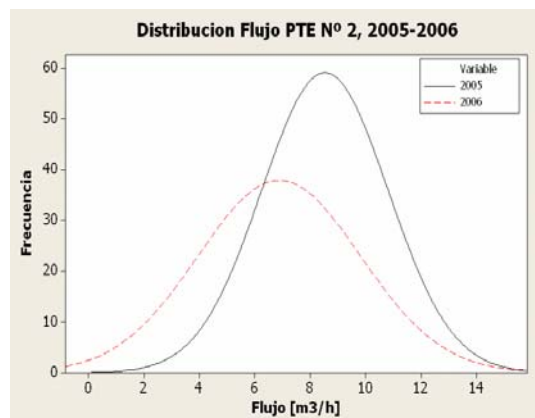
Al igual que en la Planta 1, se analizó la distribución a cada año en cuestión, como se presenta en la Figura 5-3.



**Figura 5-3: Flujo PTE 2, 2005-2006-Diario**

Para el año 2005, el flujo medio de la planta es de 8.6 [m<sup>3</sup>/h], en el año 2006 se tiene un flujo medio de 7.2 [m<sup>3</sup>/h]. En esta planta se tienen mayores, variaciones del flujo tratado, especialmente en el último año. Estas diferencias vienen dadas, por diversas causas externas, que tienden a no hacer estable el flujo de entrada, provocando las complicaciones, ya estipuladas en el Capítulo 3.

La distribución de los datos proporcionado se muestra a continuación:



**Figura 5-4: Distribución de Flujo de entrada a la PTE 2**

Como se puede notar, el flujo medio en la PTE 1, es levemente superior al de la PTE 2, pero se debe tomar en cuenta, que existen muchos datos dispersos en la PTE 2, lo cual contribuye a disminuir su valor medio.

Por otro lado si se analizan los puntos máximos, la PTE 2 alcanza en algún momento los 15 [m<sup>3</sup>/h], lo cual indica que en algunas ocasiones el flujo sobrepasa holgadamente el valor de diseño (10.3 [m<sup>3</sup>/h]). Se debe considerar por lo tanto, que los valores entregados corresponden al valor medio del flujo, y que lógicamente muchas veces no son lo más exactos.

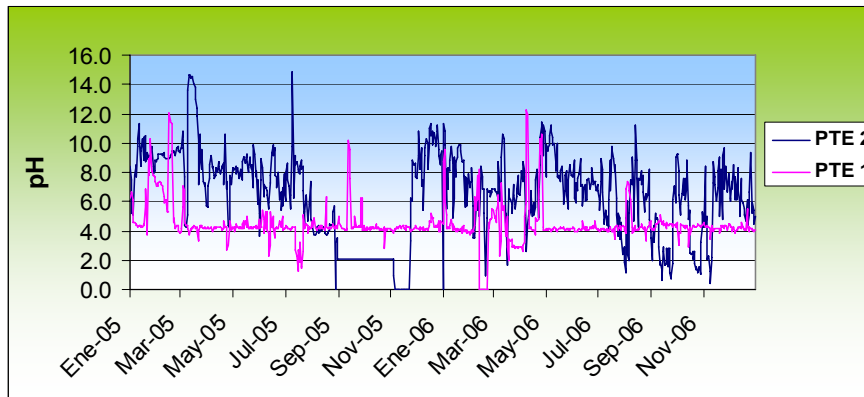
Considerando el flujo de entrada a cada planta se tiene que hay una tendencia clara a la PTE 1, a ser estable, por otro lado en la PTE 2, el comportamiento del flujo sufre variaciones importantes.

### **5.2.2 pH de operación**

En el siguiente análisis se mostrarán los comportamientos del pH en las etapas, donde son medidos.

#### **a). Etapa de Neutralización**

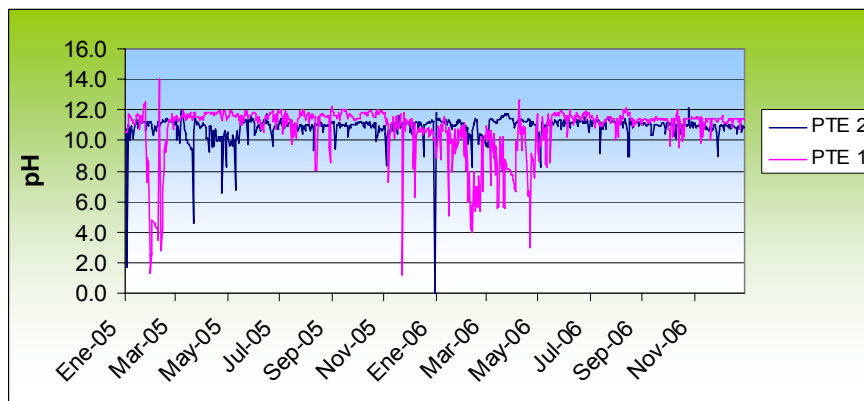
En esta primera etapa en la PTE 1, el pH se mide en el Estanque de Reacción N° 1, y en la PTE 2, en el Estanque de Neutralización. Como se puede apreciar en la Figura 5-5, en la PTE 1 existe una tendencia a mantener el pH más bajo comparado con la PTE 2. Óptimamente el pH debiera ser cercano a 3, ya que a un pH superior existe precipitación de los metales y arsénico presente. En la PTE 2, el pH es mayor debido principalmente a la recirculación proveniente del Estanque de Precipitación. El valor medio en el caso de la PTE 1 un pH de 4.2, para la PTE 2 es de 6.9.



**Figura 5-5: pH en Etapa de Neutralización**

b). Etapa de Precipitación.

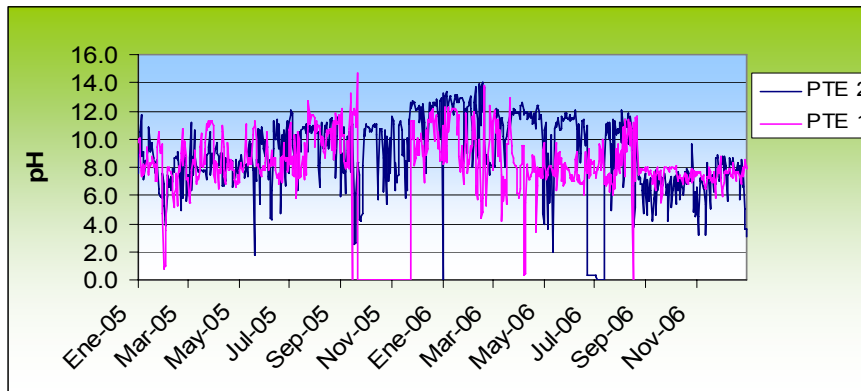
En esta etapa el pH en la PTE 1 es medido en el Estanque de Ajuste, y en la PTE 2 en el Estanque de Precipitación. Como se aprecia en la Figura 5-6, la PTE 1, tiene un comportamiento más estable alcanzando un valor medio de 11.4, por otro lado la PTE 2, a pesar de tener algunos sobresaltos respecto del Set Point, alcanza un valor medio de 11.0.



**Figura 5-6: pH en Etapa de Precipitación, 2005-2006**

c). Etapa de Precipitación de As.

En esta etapa, tal como se mencionó anteriormente es primordial mantener el pH dentro del rango de 8.5 y 9.5. En la PTE 1, es medido en el Estanque de Reacción 2, alcanzando un valor medio de 8.1, por otro lado en la PTE 2, es medido en el Estanque de Precipitación de arsénico alcanzando un valor de 8.9.



**Figura 5-7: pH en Etapa de Precipitación de As, 2005-2006**

### 5.3 Comportamiento de los residuos sólidos

Un factor importante a analizar en las condiciones actuales de los residuos sólidos es identificar, cual es nivel de aprobación del test EPA de los compuestos principales, que son muestreados, o sea el arsénico y el plomo. Este análisis se hará sobre la base del año 2006, ya que en el año 2005, no se hicieron muestreos de EPA para el plomo.

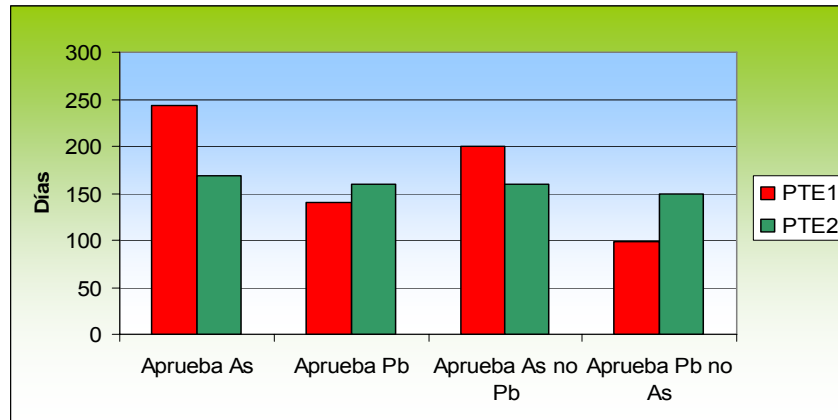
A continuación se muestra una tabla con el comportamiento del Plomo y el arsénico con respecto a los resultados del test EPA en el calcinado

**Tabla 5-1: Promedio análisis Test EPA, 2006**

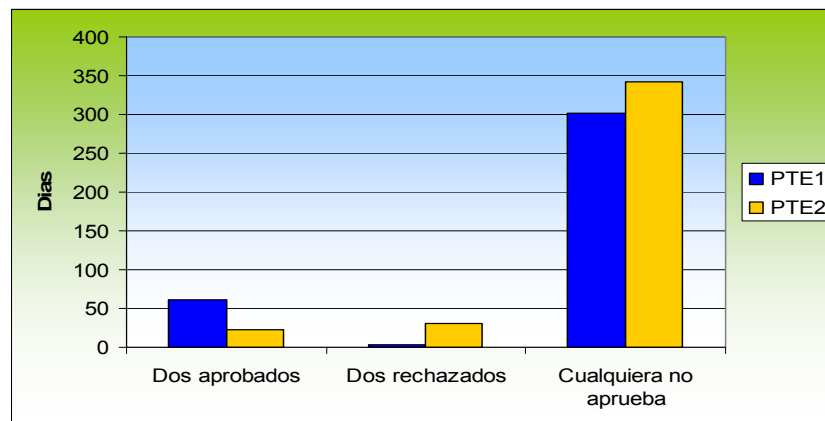
	PTE 1		PTE 2	
	Días	%	Días	%
Aprueba As	243	70%	169	48%
Aprueba Pb	141	41%	159	45%
Aprueba As no Pb	200	58%	160	46%
Aprueba Pb no As	99	29%	150	43%
Dos aprobados	62	18%	23	7%
Dos rechazados	3	1%	30	9%
Cualquiera no aprueba	302	88%	342	97%

En la Figuras 5-8 y 5-9, se presentan los comportamientos de Arsénico y Plomo en el calcinado, entregados en la Tabla 5-1, para ambas Plantas.





**Figura 5-8: Aprobación Test EPA As y Pb, 2006**



**Figura 5-9: Rechazo Test EPA As y Pb, 2006**

En forma global, se puede apreciar, que los días en que ambos aprueban son un porcentaje bajo, lo cual es importante, para señalar que existirían algunos problemas, si se deseara adecuar las plantas para obtener un calcinado estable. Con respecto a lo mismo, el porcentaje de días que cualquiera de los dos compuestos no aprueba, es altísimo llegando a un 88% para la PTE1, y un 97% para la PTE2, este resultado no hace más que graficar las complicaciones, que se tienen para poder formar un calcinado estable con las actuales condiciones de operación.

Según los datos obtenidos se puede apreciar que la PTE1, es relativamente más eficiente en la estabilización del Arsénico, ya que tiene un mejor comportamiento en

los resultados del test EPA, debido a que el porcentaje de días que aprueba es cercano al 70%, comparado con la PTE2, que solo tiene un 48% de días aprobados.

Respecto de los resultados del plomo, ambas plantas no alcanzan una eficiencia tan alta, ya que sólo el 41 y 45% respectivamente de la PTE 1 y 2, logran la aprobación del test EPA. Ante estos resultados del test EPA para el plomo, se debe realizar un estudio minucioso acerca del comportamiento en la planta.

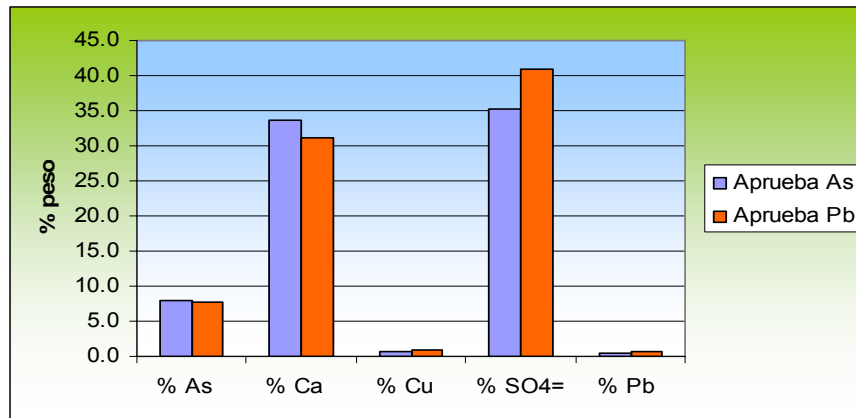
Tal como se analizó en el Capítulo anterior, la comparación del Test EPA entre, la entrada y salida de los compuestos indica que el plomo sufriría una solubilización en la etapa de calcinación, especialmente en la PTE 2, lo que muestra que este elemento debería ser extraído antes de que llegue a ésta etapa final.

Si se analiza el contenido de los compuestos existentes, que se presentan en el calcinado, como se aprecia en la Tabla 5-2, se podría llegar a algún tipo de relación importante entre las condiciones de operación, como por ejemplo en la adición de lechada de cal.

**Tabla 5-2: Promedio análisis químico al calcinado, 2006**

	PTE 1		PTE 2	
	Aprueba As	Aprueba Pb	Aprueba As	Aprueba Pb
% As	8.0	7.7	6.4	6.8
% Ca	33.6	31.2	33.4	29.5
% Cu	0.7	0.9	0.63	1.03
% SO4=	35.2	40.8	39.7	46.1
% Pb	0.6	0.8	0.85	1.13

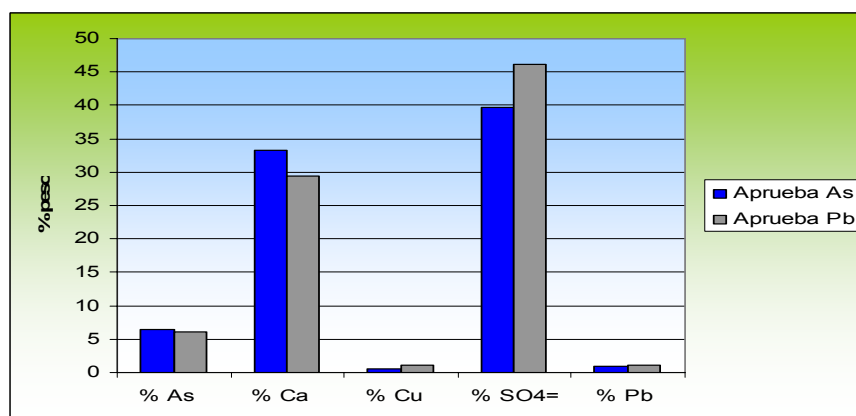
A continuación se muestra gráficamente el porcentaje de compuestos presentes en el calcinado, analizando los días en que aprobaron el test EPA.



**Figura 5-10: Aprobación de Test EPA vs concentración en calcinado PTE 1**

Como se puede apreciar en la gráfica, cuando existe aprobación del Arsénico al test EPA, se encuentra que los porcentajes de calcio y arsénico son mayores en el calcinado, si es comparado, con los días en que aprueba el plomo. Por otro lado en el comportamiento de la concentración del sulfato, el resultado es diferente al anterior, o sea es mayor la concentración de sulfatos, los días en que el plomo aprobó el test EPA, con respecto al arsénico. Con respecto al porcentaje de cobre o plomo, no es tan relevante su diferencia de concentración, lo que si es importante mencionar es que la concentración de estos compuestos fue mayor, para los días de aprobación del arsénico.

También, como se mostró en la tabla anterior, se analizó la concentración de los componentes medidos en la PTE 2.



**Figura 5-11: Aprobación de Test EPA vs concentración en calcinado PTE 2**

En el caso de esta planta, los porcentajes de arsénico y calcio, son mayores en los días que existe aprobación del test EPA, para el arsénico. Por otro lado las concentraciones de cobre, sulfato y plomo, resultaron mayores para los días en que el plomo aprobó el test. En forma general, para ambas plantas los puntos más relevantes de analizar son:

- Los días en que el arsénico aprueba el test, el porcentaje de arsénico y calcio en el calcinado es superior, cuando el plomo pasa la prueba.
- Además se puede concluir, que cuando el plomo pasa el test EPA, la cantidad de sulfatos presentes en el calcinado es mayor.
- Como se aprecia un comportamiento opuesto entre al Arsénico y el plomo, se puede suponer, que en el tratamiento del test EPA, tienen algún tipo de competencia por la neutralización del ácido agregado.
- Por otro lado, el arsénico aprueba el test cuando el contenido de calcio es mayor, lo cual supondría, que este le da mayor o estabilidad, o quizás, como existe un exceso de cal, ésta entraría en competencia con el ácido del test, dejando entrever, que el test no sería apropiado para determinar la solubilidad del arsénico.
- Es importante señalar, que cuando la concentración de plomo fue mayor, aprobó el test, a pesar de estar en una concentración tan baja comparada con el arsénico, debe ser estudiada, ya que quizás las condiciones de la calcinación, ayudan a que se haga más soluble, por lo cual sería relevante poder filtrar al plomo de forma que no llegue a la etapa de calcinación. Con respecto a lo mismo como se pudo comprobar, la concentración de sulfatos ayuda a estabilizar el plomo, de forma que pueda aprobar el test, quizás por la formación de sulfato de plomo (insoluble en medio acuoso).

## 5.4 Simulación de las plantas actuales

Una vez que ya se conocen, las condiciones más relevantes de las Plantas de Tratamiento de Efluentes, se pueden ajustar los parámetros obtenidos del diseño inicial. Para la simulación del balance de masa es importante considerar, que se comparan los análisis a los dos últimos años 2005 y 2006, dado que se tienen una mayor cantidad de antecedentes, lo cual es relevante en el momento de comparar los valores anuales, respecto de los del modelo.

Dado que los modelos para las plantas de Efluentes, tienen una serie de variables que pueden ser modificables, lo importante es poder analizar el comportamiento de forma global del modelo, dadas las características de éste. Para ajustar algunos parámetros, que pueden llegar a ser relevantes en el estudio se analizaron algunos comportamientos, y sensibilidades reales de operación. Por otro lado es importante notar, que los ajustes realizados tenían como principal misión ajustar y comparar ambos valores (modelo y real).

Los ajustes realizados al modelo inicial de diseño, tenían como objetivo primordial acercar los datos reales de operación identificados con los antecedentes en diversos puntos del modelo. Los ajustes realizados fueron realizados de varias maneras entre las que se identifican:

- Dado que el modelo tiene varias variables modificables, como lo son los grados de conversión de las reacciones, las eficiencias en los equipos, relaciones de sólidos en espesadores, porcentaje de exceso de algún reactivo, etc., se realizaron modificaciones a estas variables con el objetivo de lograr una cercanía entre los datos.
- Por otro lado, se aplicaron factores en determinados puntos basados en regresiones<sup>27</sup> entre las variables involucradas.

---

<sup>27</sup> En Anexo 2 se muestran algunas de las relaciones entre variables involucradas en el Proceso.

Los resultados obtenidos para PTE 1, se muestran la Tabla 5-3:

**Tabla 5-3: Resultados comparación datos reales vs modelo, PTE 1**

		2005			2006		
		Real	Modelo	% Error	Real	Modelo	% Error
Efluente*	g/l As	10.1	10.1	*	11.7	11.7	*
	g/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	46.2	46.2	*	55	55	*
Rebose Esp. 1	ppm As	22	24	9%	41	38.6	6%
Lechada	% Sólido	19.4	18	7%	20.1	18	10%
	% Ca(OH) <sub>2</sub>	16.3	15.9	2%	16.2	16.3	1%
Rebalse Precipitación As	ppm As	59	42.4	28%	62	52.1	16%
	ppm Fe	250	240	4%	220	277.9	26%
	Fe/As	3.3	5.6	70%	3.5	5.7	63%
Rebose Esp 2	ppm As	7	9	29%	9	10.4	16%
Sulfato férrico	g/lit Fe <sup>+3</sup>	*	40	*	*	40	*
% Sólidos	Efluente	0.2	0.3	50%	0.2	0.25	25%
	Espesador 1	20.7	20	3%	22.3	20	10%
	Est. Lodo	20.5	19.9	3%	21.1	19.9	6%
	Agua Filtrado	0.1	0.15	50%	*	0	*
Calcinado	%As	8.4	8.3	1%	8.5	8.2	4%
	%Ca	34	34.9	3%	33.6	35	4%
	%SO <sub>4</sub> =	34.3	37	8%	34.9	38.1	9%
	Razón	4.3	4.2	2%	4.2	4.3	2%
	Test Epa	0.7	*	*	0.5	*	*
Queque	%H <sub>2</sub> O	48.8	54.7	12%	49.6	54.7	10%
Cal Consumida	Ton/h	0.5	0.58	16%	*	0.6	*
Calcinado Total	Ton/h	1	0.96	4%	*	1.4	*

Según estos resultados obtenidos generados a partir de algunas modificaciones al balance inicial de diseño. La diferencia entre los datos de operación respecto de los reales no es tan significativa. El porcentaje de error entre ambos balances es bajo, lo que es importante para hacer algunos posteriores análisis a la Planta.

\* Datos del efluente son variables de entrada

Las principales diferencias en los resultados del modelo de la PTE 1, se presentan en la concentración de arsénico en el Estanque de precipitación de arsénico, así como en la relación de Fe/As.

Para la PTE 2, los resultados se presentan en la Tabla 6-4

**Tabla 5-4: Resultados comparación datos reales vs modelo, PTE 2**

		2005			2006		
		Real	Modelo	% Error	Real	Modelo	% Error
Efluente*	g/l As	12	12	*	15	15	*
	g/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	99	99	*	121.4	121.4	*
Rebose Esp. 1	ppm As	22	23.6	7%	22	22.6	3%
Lechada	% Sólido	24	20.3	15%	25.8	20	22%
	% Ca(OH) <sub>2</sub>	19	18.4	3%	19.4	18.4	5%
Rebalse Precipitación As	ppm As	31	25.6	17%	31	28.6	8%
	ppm Fe	238	210	12%	278	281	1%
	Fe/As	7	7.8	11%	7	8.9	27%
Rebose Esp 2	ppm As	7	8.2	17%	10.9	11.4	5%
Sulfato ferrico	g/l Fe <sup>+3</sup>	34	34	*	26	26	*
% Sólidos	Efluente	1	0.8	20%	1.2	0.8	33%
	Espesador 1	22	25	14%	29	25	14%
	Est. Lodo	27	25.1	7%	32.3	25	23%
	Agua Filtrado	*	0.1		*	0.1	
Calcinado	%As	6	6.1	2%	6.8	5.2	24%
	%Ca	35	33	6%	33.3	33.5	1%
	%SO <sub>4</sub> =	41	43.4	6%	40.8	45.2	11%
	Razón	6	5.5	8%	4.6	6.5	41%
	Test Epa	96	*	*	43.5	*	*
Queque	%H <sub>2</sub> O	38	37.2	2%	38.4	37.4	3%
Cal Consumida	Ton/h	1	0.95	5%	*	1.2	*
Calcinado Total	Ton/h	1.7	1.68	1%	*	1.9	*

\* Datos del efluente son variables de entrada

Dados los resultados obtenidos a partir de la modificación inicial para la PTE 2, se tiene, que la diferencia entre los datos reales y los datos de diseño es menor.

Con los resultados ajustados para la PTE 2, las principales diferencias se presentan en la concentración de arsénico y fierro, en el estanque de precipitación, lo cual no afecta mayormente los resultados globales presentados. Con estos resultados obtenidos se está en condiciones de analizar una modificación de forma de visualizar el comportamiento de ambas plantas, en sus parámetros más relevantes.



## **CAPITULO 6 ANÁLISIS DE PROCESOS ALTERNATIVOS**

En la actualidad hay diversos métodos existentes para el tratamiento de los efluentes ácidos, y cada cual es utilizado dependiendo de las condiciones con las que provenga el efluente desde las Plantas de Ácido.

El proceso utilizado en las PTE's de Caletones es el proceso convencional, pero han surgido modificaciones orientadas a disminuir la carga de residuos tóxicos generados. Precisamente esto último, es lo que será abarcado en el presente Capítulo, basado en una visita técnica realizada a algunas instalaciones.

En la búsqueda de alternativas viables para el proceso actual de las plantas de efluentes se analizarán dos procesos existentes, el primero es en la Fundición de Atlantic Cooper en Huelva, España, y el segundo es en la Fundición Cumerio en Pirdop, Bulgaria. Ambos procesos tienen la particularidad de producir un “yeso limpio”, que puede ser potencialmente comercializable.

El proceso de la Fundición de Cobre Atlantic Cooper, será abarcado en mayor profundidad debido a que según sus características, se desean algunos aspectos de este proceso para poder aplicarlos en la Fundición de Caletones, Chile.

En el presente Capítulo se entregarán aspectos técnicos de la Fundición Atlantic Cooper, pero más específicamente se analizará el proceso de obtención de yeso, con respecto al cual se han hecho diversos estudios, que han tenido como finalidad optimizar el proceso. Entre los estudios que han sido evaluados se tienen el pH de operación, Temperatura, tiempo de residencia, y arsénico presente.

Los análisis realizados en Huelva pueden ser importantes, si se desea implementar la producción de yeso, ya que además de entregar parámetros de operación se entregan algunos estudios de optimización al proceso.

## 6.1 Descripción de Planta Atlantic Cooper

Los inicios de la Fundición de Cobre Atlantic Cooper se remontan al año 1998, cuando se iniciaron estudios para solucionar la disposición final de los Efluentes de las Plantas de Ácido. Para esto se invitaron a varias empresas, de las cuales solo dos demostraban experiencia en el tratamiento de efluentes, Bamag y HGE.

Ambas empresas realizaron una serie de pruebas y mediciones con los efluentes para presentar una solución al problema. Finalmente se decidió por la empresa Bamag, y entre los años 1999 y 2000 se realizó la ingeniería, suministros, construcción y montaje. Es importante señalar que esta planta no reutilizó equipos debido a que Atlantic Cooper no tenía planta de tratamiento de efluentes.

Los productos de salida de la planta de yeso son: un yeso limpio que se vende a las empresas de cemento y un yeso sucio que va a una planta externa para su tratamiento.

La planta de yeso de Atlantic Cooper tiene 7 etapas principales:

- Planta de preparación y dosificación de cal
- Filtración del ácido diluido
- Precipitación del yeso comercial
- Filtración a vacío del yeso comercial
- Neutralización del ácido residual
- Filtración del yeso residual
- Depuración del efluente

A continuación se muestra, en la Figura 6-1, un diagrama de bloques general de la Planta de Tratamiento de Efluentes de Huelva, con sus principales etapas.

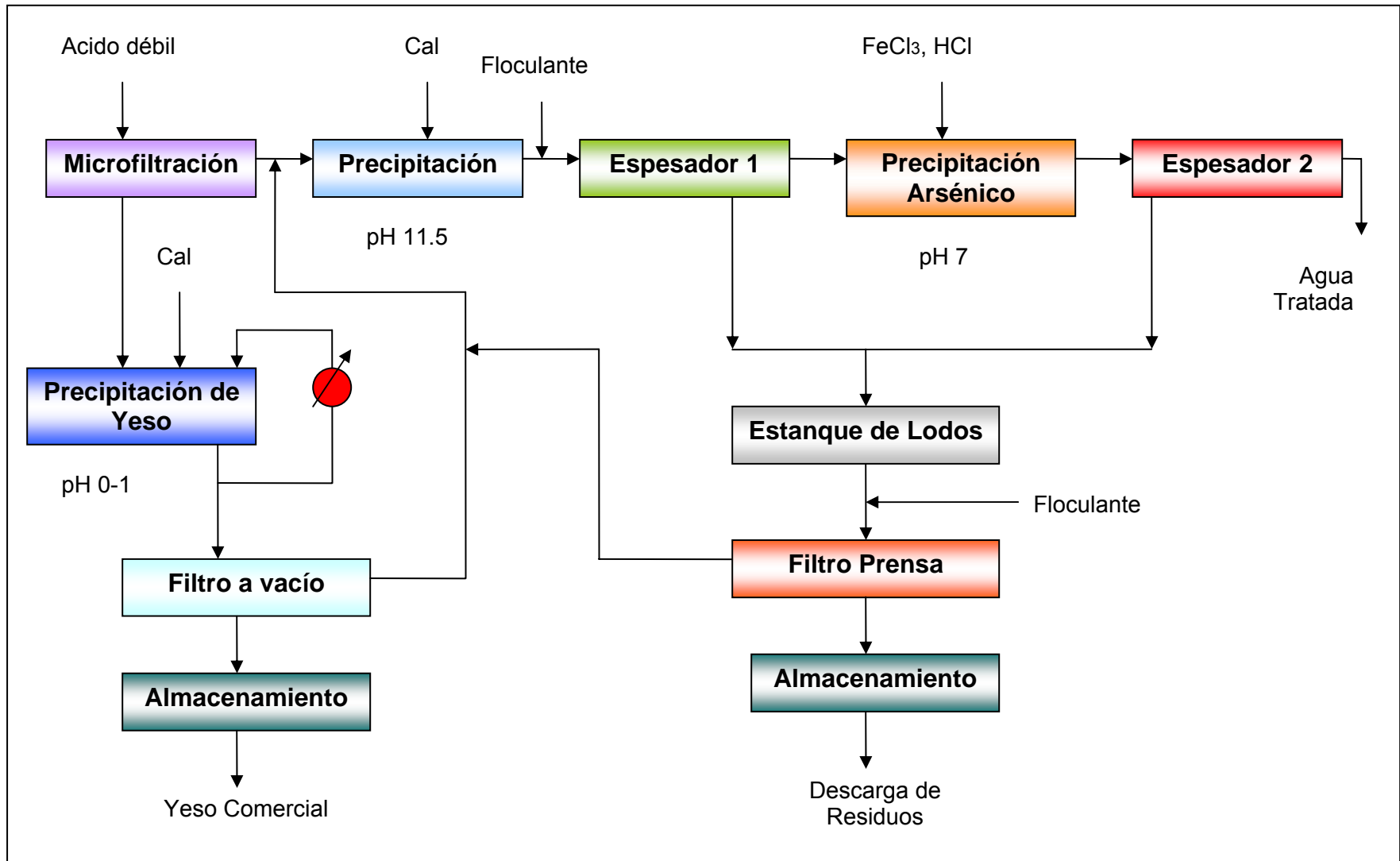


Figura 6-1: Diagrama Planta de Efluentes de Huelva, España

En la puesta en marcha de la planta hubo innumerables problemas de algunos equipos, los cuales fueron reemplazados por Bamag. La puesta en marcha duró casi un año.

Entre las características llamativas del diseño de esta planta se tiene:

- Posee una gran capacidad de almacenamiento de efluentes (15 días aproximadamente), lo cual le entrega a la planta una gran flexibilidad operacional, y permite atender mantenciones pequeñas sin alterar el proceso.
- La planta quedó sobredimensionada en casi un 50%, dado que en la actualidad producto de las mejoras en el proceso de fusión ha habido una reducción en la producción de efluentes.
- Algunos equipos del diseño original, nunca han sido utilizados debido a que las condiciones supuestas no se cumplieron.

Inicialmente Bamag suministró 3 grupos de equipos que no fueron requeridos:

- Enfriador de placas para enfriar la lechada de cal, la carga térmica operativa no justificó la operación del enfriador.
- Filtro de arena para eliminar los sólidos en suspensión del agua tratada, la claridad del rebalse del tercer espesador cumple con las exigencias ambientales.
- Sistema de dosificación de permanganato de potasio, que es utilizado para mantener un estado de oxidación en la tercera etapa. Según análisis posteriores, esta adición no era necesaria para lograr eficiencias en las reacciones químicas.

Una de las consideraciones más importantes que se debe tener en cuenta para adaptar el modelo de Atlantic Cooper son las etapas de filtrado y control de humedad del yeso.

### **6.1.1 Instalaciones de Planta Huelva**

La planta de tratamiento de efluentes de Atlantic Cooper se describe a continuación:

#### a) Preparación de la cal

Micro pulverizado con cal apagada. Se transfiere desde un camión y se deposita en dos silos de 380 m<sup>3</sup> cada uno. La cal Micro pulverizada es comprada en la ciudad de Sevilla.

#### b) Prefiltración

El equipo utilizado está conformado por tres líneas en paralelo de tres filtros con tubos de membrana de propileno de malla, suministrado desde Alemania. La vida útil es de alrededor de 4 años. Un problema que presentan es el ensuciamiento de las membranas, y además el proceso de limpieza es muy trabajoso.

#### c). Preparación de Yeso Comercial

La cantidad adicionada de cal es controlada por pH en el tercer estanque de la neutralización. La reacción de neutralización es exotérmica, y para esto se utilizan dos intercambiadores de calor (uno sin operar), estructurado un con haz tubular de carbón. Se enfría un porcentaje de lodos que se recirculan desde el tercer estanque hacia el primero.

#### d). Filtrado de yeso comercial

El filtro banda de tiene una sola bomba de vacío. El filtro tiene 3 etapas de lavado de queque para poder eliminar la acidez del queque. Uno de los controles principales es lograr producir un queque adecuado para la comercialización.

Por otro lado se tiene el control de la humedad, y para esto se utiliza un hidrociclón de manera de filtrar solamente los sólidos gruesos de yeso, y recircular los sólidos finos al circuito para promover el crecimiento de los cristales de yeso.

e) Neutralización del ácido residual

En este proceso se obtiene el llamado “yeso sucio” y un efluente que debe cumplir con la normativa legal. Inicialmente en esta parte del proceso se adquirieron los equipos que no fueron utilizados (Enfriador de placas, Filtro de arena, Dosificación de permanganato de potasio)

f). Filtro del yeso residual

El filtro banda para el queque de yeso residual nunca funcionó bien y debió ser sustituido por un filtro prensa

g). Almacenamiento de Efluente

Antes de la instalación de la planta de yeso el efluente era almacenado en tres estanques de 150 m<sup>3</sup> cada uno. Posteriormente se construyeron 2 estanques adicionales, cada uno de 450 m<sup>3</sup>, y se construirán dos estanques más. Además existe un estanque de emergencia de 150 m<sup>3</sup>. Esto le entrega una gran flexibilidad operacional

Algunos parámetros importantes de la Planta de producción de yeso, se presentan en la Tabla 6-1.

**Tabla 6-1: Parámetros Planta de Producción de Yeso, Huelva**

Parámetro	Valor
Concentrado a Fundición	3200 [t/día]
Alimentación a PTE	12 [m3/h]
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	320 [g/l]
Producción Yeso (20% humedad)	10 [t/h]
Producción Yeso residual (35% humedad)	1.5 [t/h]
Agua Tratada	14 [m3/h]

### 6.1.2 Estudio del Proceso Huelva

Según los diversos estudios<sup>28</sup> realizados analizando el proceso operativo se entregan algunos aspectos interesantes a considerar

#### 1). Análisis al pH de operación

El pH en este proceso es un parámetro importante para remover sustancias seleccionadas desde el efluente mediante precipitación. El pH en cada etapa del proceso varía:

- Neutralización: 0-1
- Precipitación de metales: 11.5
- Precipitación de arsénico: 7

En la etapa de neutralización, el parámetro decisivo es la concentración del ácido residual. La precipitación en un rango de pH fuertemente ácido produce yeso, sin precipitar los metales pesados y arsénico. Estos compuestos permanecen en solución como iones a valores de pH altamente ácidos y pasan a las siguientes etapas de precipitación donde son selectivamente precipitados.

La separación del yeso puro permite una reducción considerable del queque filtrado que se envía al depósito controlado como el obtenido con el proceso convencional. Por éste último la cantidad de yeso puro obtenido era cercana al 65% de los sólidos secos obtenidos diariamente.

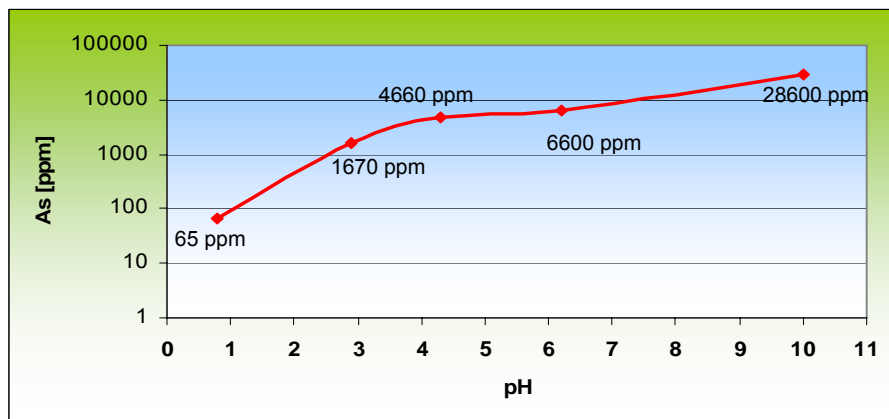
Comparando el proceso actual de precipitación de yeso, donde se obtienen 11 [t/h] (88 [kton/año]) de residuos secos, respecto del proceso convencional (como PTE's de Caletones), se obtiene 1 [t/h] (8 [kton/año]). La diferencia es elevada, por lo que es interesante hacer el estudio para las PTE's de Caletones.

La contaminación con arsénico del yeso puro puede ser controlada por ajuste de la concentración del ácido residual. Algunos estudios han demostrado la relación entre

---

<sup>28</sup> A. Angela, R. Brockl J. A. Suarez, S. Schonbrunner, "Production of Marketable Gypsum from weak acids –an off products- Saving of disposal volumen and cost", World of Metallurgy, N°2, p 75-82, (2005).

la concentración del arsénico del yeso y el ajuste de la concentración del ácido residual. A continuación se muestra en la Figura 6-2, la relación existente entre la concentración de arsénico en el yeso en función del pH.



**Figura 6-2: Variación de Concentración de Arsénico en yeso a distintos pH**

La concentración de arsénico en el yeso tiene una tendencia a una relación directa. A pH más alto la concentración de arsénico aumenta. Esto se debe a que en el precipitado, se aumenta el pH, el arsénico se incorpora dentro de la estructura del cristal de yeso y soporta la remoción del lavado del queque filtrado. Por lo cual los compuestos de Ca/As, son los que afectarían mayormente la pureza del yeso generado. En una corriente de ácido fuerte el arsénico disuelto es removido desde el queque de yeso con el filtrado.

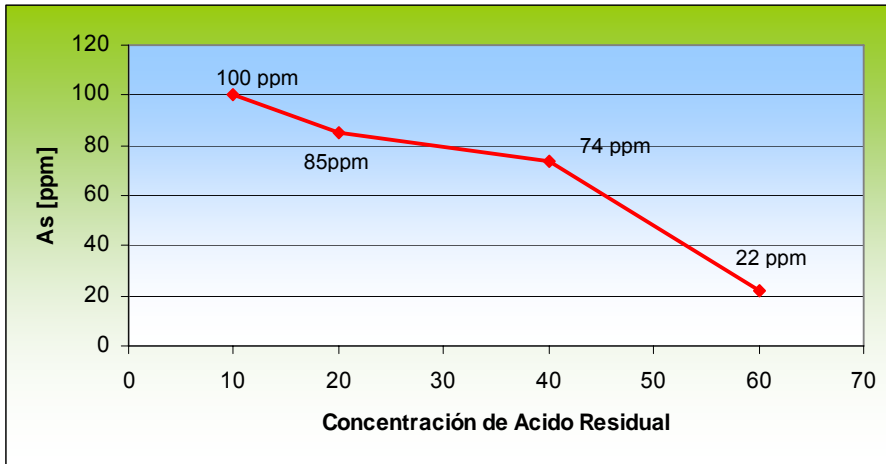
Considerando el mínimo nivel alcanzable de arsénico en el yeso, la concentración inicial de arsénico en el ácido juega un papel importante. Los análisis realizados son a partir de una concentración inicial de arsénico de 3.8 g/l. Esto último debe ser analizado rigurosamente, ya que la concentración de Arsénico, con la llega el efluente ácido a las PTE's es mucho mayor. En el siguiente Capítulo se entregarán los resultados de estos análisis.

El yeso que contiene un menor contenido de arsénico es más fácilmente comercializable para usos industriales. El rango de pH debe ser estudiado para cada



caso de acuerdo a los requerimientos específicos del cliente que requiera el yeso. Es importante señalar que a pH menores que 2, se pierde la conveniencia de ser utilizada como variable de control. En concentraciones menores que 0.01 mol/l se puede determinar con exactitud midiendo la conductividad.

En otro análisis entregado, se muestra la relación de la concentración de arsénico del precipitado puro y la concentración de ácido residual, expresado como ácido sulfúrico.



**Figura 6-3: Variación de Concentración de Arsénico en ácido residual**

La concentración de arsénico inicial para ese estudio fue de 1 g/l. Como se puede apreciar en la Figura 6-3, la concentración del arsénico disminuye con el incremento de la concentración de ácido residual. Esos resultados confirman la suposición teórica que una alta concentración de ácido residual seguida de una precipitación de yeso con cal, da lugar a menos arsénico precipitable como  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_3)_2$  (o otro compuesto similar), dejando más arsénico en solución. Esa cantidad disuelta de arsénico está contenida en el filtrado y en el lavado desde el filtro a vacío.

Con estos antecedentes obtenidos es importante poder determinar el pH más alto, sobre el cual se puede precipitar yeso de forma que la cantidad de arsénico, sea menor a la exigida. Además, se debe considerar, que las experiencias realizadas por sus estudios, son sólo referenciales.

2). Análisis de otras variables

Además del pH, como factor selectivo de precipitación, también existen otros parámetros interesantes de analizar. Para poder determinar los rangos óptimos de operación se establecieron metodologías de forma de poder simular el proceso a nivel de laboratorio. La serie de pruebas fue dividida en los siguientes pasos:

- Precipitación de yeso con pH definido a varias temperaturas y tiempo de reacción.
- Filtración de yeso incluyendo lavado con cantidad de agua definida.
- Examinación del yeso precipitado para calidad del producto.

Después de examinar la calidad del yeso, las muestras fueron secadas a temperaturas bajo los 45°C. Esa temperatura de secado es necesaria para preservar el agua de cristalización. Para poder optimizar el proceso se tienen los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2: Parámetros de optimización en Planta de Efluentes, Huelva**

Parámetro	Rango	Descripción
Concentración inicial As	1-10 [g/l]	Arsénico contenido en ácido débil
pH	< 1	pH de la mezcla que llega a la etapa de neutralización
Tiempo de reacción	1 a 8 [h]	Tiempo de reacción de la etapa de neutralización
Temperatura de reacción	50 a 80 [°C]	Temperatura de reacción de la etapa de neutralización

Estos experimentos realizados en Huelva, no tienen mucha validez, ya que el ácido tiene una carga de compuestos muy distinta. Por lo que son sólo valores referenciales, para los muestreos que se deban realizar con el efluente de las Plantas de Ácido de Caletones.

A continuación se muestran los valores obtenidos de arsénico en el yeso partiendo de diferentes concentraciones iniciales.

**Tabla 6-3: Comparación de resultados a partir de varias concentraciones**

Concentración inicial As	1 g/l	2 g/l	10 g/l
[As] sin lavado de yeso [ppm]	1164	1758	7055
[As] con lavado de yeso [ppm]	204	236	858
% Reducción As	83	87	88

Con estos resultados obtenidos, se puede concluir, que la etapa de lavado del yeso altamente importante, para la pureza de éste.

Con un tiempo de reacción más largo la calidad del yeso mejora respecto al mismo contenido de arsénico. A continuación se muestra la tabla de resultados del efecto del tiempo de reacción sobre el contenido de arsénico y el contenido de cal residual en el yeso.

**Tabla 6-4: Tiempo de residencia**

Tiempo de reacción [h]	Contenido de As [ppm]	Cal residual [mg/g yeso húmedo]
1	232	2.3
2.5	160	1.1
2	115	0.7
4	54	0.1
8	26	0

El efecto del tiempo de reacción es debido al grado de conversión de las partículas de cal. En el microambiente de una partícula de cal el pH es más alto que en la solución. Con el aumento de la conversión de la cal el rango de pH disminuye, conduciendo al arsénico al agua de lavado. Después de 8 horas la cal está completamente convertida y el arsénico contenido en el yeso fue de 26 ppm. El tiempo de reacción también influencia la humedad residual, como el crecimiento de los cristales de yeso con un largo tiempo de retención. Eso lleva a una mejor sequedad de acuerdo a la menor humedad residual.

La temperatura de reacción tiene un positivo efecto sobre el contenido de cal en el yeso. Una alta temperatura de reacción aumenta el valor de conversión de la cal, y con esto la pureza del yeso, esto se puede apreciar en la siguiente tabla. A una temperatura alta aumenta la conversión de cal y con esto la pureza del yeso,

**Tabla 6-5: Temperatura de reacción**

Temperatura de reacción [°C]	Contenido As [ppm]	Cal residual [mg/g yeso]
50	388	2
65	115	0.7
80	38	0.1

A una temperatura mayor que 80 °C, la cal fue casi completamente convertida. Así también un aumento en la temperatura de reacción lleva a una disminución de la humedad residual.

Con respecto de la humedad del yeso obtenido, no se obtuvieron resultados satisfactorios, si se deseara comercializar el yeso, este punto también podría afectar el resultado del producto final, por lo cual sería importante contar un análisis previo.

## 6.2 Fundición Cumerio

La fundición de Cumerio está ubicada en la localidad de Pirdop, Bulgaria. Su producción anual de cobre bordea las 220 [ktpa], y en los próximos años se espera aumentar llegando a las 250 [ktpa]. El concentrado de cobre es importado desde Bulgaria, Chile y Malasia. Cuenta con dos plantas de ácido, y su producción de sulfúrico es cercana a las 3.800 [tpd],

La actual Planta de Tratamiento es una modificación de la planta construida inicialmente, que constaba con una etapa de Neutralización y Precipitación con lechada de cal. Esto debió ser modificado por las nuevas normativas ambientales

La planta de Tratamientos de Efluentes fue diseñada por HGE en el año 2004, siendo elegida en un proceso de selección. Las principales etapas del proceso son:

- Homogenización de Efluentes
- Producción de yeso Limpio
- Precipitación de metales
- Remoción de arsénico

Cuenta con una capacidad de diseño de 100 m<sup>3</sup>/h, y entre los insumos que se utilizan están: lechada de cal, peróxido de hidrógeno, cloruro férrico y floculante

En la puesta en marcha de esta planta se presentaron una gran cantidad de problemas en los que se cuentan:

- Fallas de equipos.
- Existía una alta presencia de plomo en el yeso limpio debido a la contaminación del agua de limpieza del área de Fundición con concentrado.
- El control del pH final de la tercera etapa fue uno de los principales problemas de resolver.

Inicialmente en Cumerio el “yeso limpio” fue comercializado a una fábrica de cemento. Además se cuenta con un mercado amplio en países cercanos como Grecia, Turquía y Serbia.

En la actualidad el yeso cumple con la especificación química, pero la humedad no logra el requerimiento de venta para la industria cementera. Ante esta problemática, Cumerio empezó a reciclar un porcentaje del “yeso limpio” hacia el Horno Flash, como carga fría adicional al horno. Hoy en día sólo se comercializa el 50% del total producido.

El problema es generado en los filtros prensas, que no logran un lavado eficiente del queque limpio. Así como en Huelva, la humedad del yeso, suele ser una condición conflictiva del proceso, por lo cual, si es deseable comercializar el yeso en Caletones, se deben tener en cuenta estos aspectos .

### 6.2.1 Descripción de Planta Cumerio

En la Planta de Cumerio, el efluente, que ingresa al proceso, proviene de diferentes etapas previas, como de las Plantas de Ácido, refinería, almacenamiento del ácido de producto.

El “yeso sucio” es almacenado en un vertedero autorizado ubicado al lado de la PTE, éste cuenta con un recubrimiento doble de liner de PVDF, drenaje y monitoreo de filtraciones. Sería interesante analizar técnicamente los vertederos donde se almacena el “yeso sucio” de forma implementar uno similar.

La descarga del agua tratada generada en la Planta de Tratamiento, es enviada al enfriamiento de escoria, pero tiene la problemática de obstruir las cañerías, con la precipitación de yeso, que se encuentra saturada de sulfatos. Dado este problema se está estudiando enviar este efluente como agua de reposición en la sección de limpieza de gases. Por otro lado es importante mencionar, que esta descarga de agua cumple con la normativa medioambiental.

Entre los equipos principales existentes en la Planta de producción de yeso limpio, se tiene:

- Estanque de almacenamiento (2): 6000 m<sup>3</sup>
- Estanque de precipitación de yeso limpio (2): 80 m<sup>3</sup>
- Espesador de yeso limpio (1): Diámetro de 12 [m]
- Estanque de almacenamiento lodos de yeso limpio(1): 50 m<sup>3</sup>
- Filtro Prensa de yeso limpio (provisto de telas de propileno)

A continuación en la Figura 6-4, se entrega el diagrama de bloques del proceso.

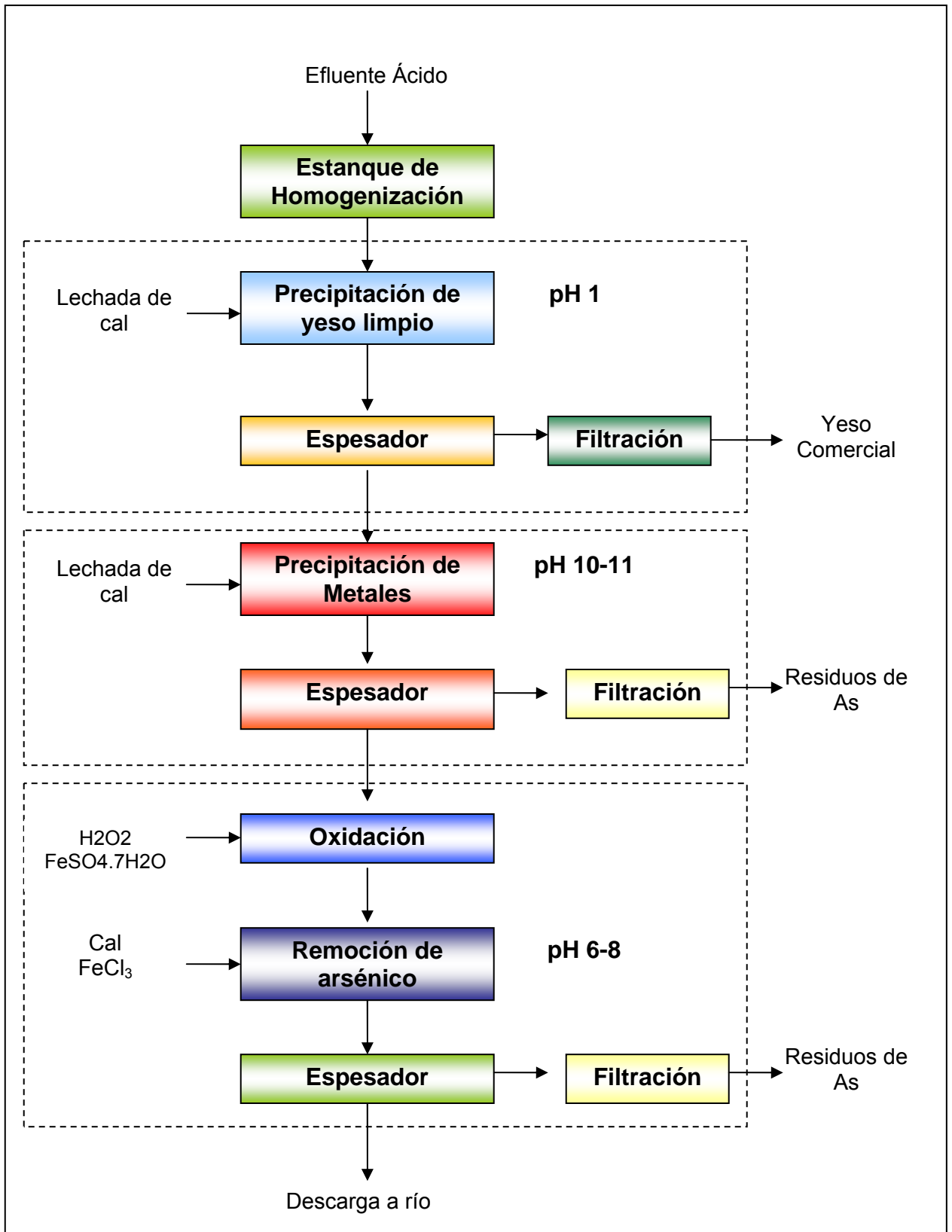


Figura 6-4: Diagrama de Planta de Efluentes de Cumerio, Bulgaria

## **CAPITULO 7 ANÁLISIS DE ADECUACIÓN A LAS PTE´S**

Con las características analizadas en el Capítulo anterior acerca de la Planta de producción de yeso de Huelva entregada, se homologará una modificación tentativa a las actuales Plantas de Tratamiento de Efluentes de Caletones, suponiendo que el proceso de producción de “yeso limpio” empleado en Huelva será el mismo.

A modo general de evaluación se estimarán las principales condiciones para lograr el proceso buscado. Según lo mencionado anteriormente es importante poder tener un análisis del pH de operación, entre otros parámetros. Esto fue logrado, mediante experimentación, realizada en forma paralela al desarrollo del modelo, de manera de obtener los valores o rangos más óptimos para una posible operación.

Además del estudio a nivel de laboratorio se obtuvieron datos del tipo teóricos para poder complementar cuales serían las condiciones de un posible cambio en el proceso. Con respecto a lo último se llegó a determinar que si se llegara a modificar el proceso, la cantidad de masa que llegaría a calcinación sería un tercio de lo actual, lo cual a todas luces sería un proyecto altamente conveniente, pero no sólo está en juego el calcinado obtenido sino también el yeso obtenido, que no debería ser enviado a Hidronor, lo cual se lograría impidiendo la contaminación de arsénico u otro elemento.

Dado que el objetivo principal del cambio en la estructura actual de las plantas es disminuir el volumen de descarga enviado a la empresa de tratamiento, es importante analizar las bases sobre las cuales se estructuraría un cambio en el proceso actual. Según esto último, se analizaron las condiciones, y características del proceso actual comparado con el utilizado actualmente en la Planta de Efluentes de Huelva, con la finalidad de poder estructurar y proponer una alternativa al proceso.



## 7.1 Evaluación Preliminar

La finalidad de modificar el proceso de Caletones, es lograr algún mecanismo, para reducir la carga de material clasificado como peligroso, y que deba ser estabilizado, ante éste escenario sería factible considerar la producción de dos sólidos:

- Uno no peligroso, sin impurezas
- El otro peligroso con todas las impurezas

Por lo cual se analizará la implementación del proceso de la Fundición Atlantic Cooper mostrada en el Capítulo anterior. La primera etapa es la neutralización del ácido del efluente en dos pasos, la primera precipitación generará un yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sin la precipitación de impurezas que sean peligrosas. Este material puede ser separado, y manejado como un material no peligroso, por lo cual no sería necesario calcinarlo o estabilizarlo. En algunos lugares donde se realiza este mismo proceso, éste material se utiliza en la producción de cemento.

Tal como se presentó anteriormente, la etapa adicional de precipitación debe ser acompañada por una etapa de prefiltrado del efluente, para poder eliminar los sólidos en suspensión, y también de una etapa de filtrado de los sólidos de la primera precipitación, con lavado del queque con agua industrial, o con agua tratada, para sustituir el efluente residual del queque, permitiendo arrastrar las impurezas en solución.

Por otro lado, sería necesario tener tres o cuatro etapas de lavado del queque con un filtro banda. Este tipo de filtro opera con la aplicación de un vacío a través de una cama de sólidos.

Según el DS 148, se indica que alternativamente a la aplicación del test de toxicidad por lixiviación, se podrá demostrar que los sólidos generados no son tóxicos extrínsecos en su disposición final en el suelo. El test realizado ante un laboratorio de

la autoridad sanitaria debe ser inferior a la concentración máxima permisible (CMP), indicada en el TEST EPA (1311). Para el caso del arsénico no debería ser mayor a 100 ppm en el yeso generado. Esto debería ser comprobado en el caso de que el yeso se quisiese ser enviado a disposición.

Para lograr este objetivo se deberá realizar un estudio pre-eliminar, de la implementación del proceso utilizado en España, con las modificaciones respectivas, a la Planta actual. Por lo tanto el modelo de balances modificado indicará las características más importantes y deberá ser capaz de identificar los puntos o conflictos del proceso.

Cabe mencionar, que paralelo al estudio del proceso de España, se analizaron algunas posibles alternativas, suponiendo que el proceso de España no fuese realmente lo más óptimo de implementar, principalmente debido a las diferencias que existen. Para efectos de este trabajo sólo será considerado este proceso.

Para la modificación final, se deben tener en cuenta una serie condiciones de operación. Entre algunos puntos relevantes de estas, se tiene:

- Evaluar la capacidad de espacio actual, ya que no es tan amplio, como para instalar un equipamiento de grandes dimensiones. Por otro lado se debería realizar una inversión adicional para la expansión de la planta.
- Como uno de los puntos más relevantes en la obtención del yeso, es la concentración que contiene de arsénico, debe ser primordial, que en la etapa de filtrado exista un lavado óptimo, si es deseable una obtención de yeso comercial.
- Como se mencionó en el punto anterior el lavado puede llegar a ser una parte importante del proceso, por lo que cantidad, y la calidad de agua son parámetros, que deben ser estudiados.

- En el proceso de filtración a vacío, la humedad teórica yeso podría ser más alta, porque la Fundición Caletones se encuentra a una presión menor que la normal atmosférica. Por lo cual, sería necesario tomar los resguardos pertinentes o instalar una etapa de secado después del filtrado.
- En la Planta de Efluentes de Huelva existieron problemas con la limpieza de los microfiltros, por lo cual sería importante estudiar alternativas a éste equipo, como por ejemplo una centrifuga, o un filtro prensa, o también se debería evaluar la instalación de varios microfiltros dejando alguno “stand by” de tal forma que sea factible la limpieza.
- Para el nuevo queque generado (“yeso limpio”), sería necesario contar con una etapa de ensacado. Esta etapa adicional será considerada en el análisis del gasto final.

## 7.2 Comparación entre Fundición Atlantic Cooper y Caletones

La comparación de ambos procesos es fundamental para analizar la producción de yeso, junto con diferenciar los aspectos más relevantes de los procesos. En la siguiente Tabla 7-1, se compararan algunos parámetros operativos, considerando ambas PTE’s:

**Tabla 7-1: Comparación entre Fundición Atlantic Cooper y Caletones**

Parámetro	Atlantic Cooper <sup>29</sup>	Caletones <sup>30</sup>
Producción Cu [kton/año]	300	400
Concentración ácido [g/l]	320	80
Flujo Efluente [m <sup>3</sup> /h]	12	20
Sólido en suspensión [g/l]	6	2

Como se pudo apreciar en la Tabla 7-1, existe una marcada diferencia en la concentración de ácido del efluente. Esto se debe a que en la Planta de Tratamiento

<sup>29</sup> Datos obtenidos de Informe de visita técnica, 2006

<sup>30</sup> Datos extraídos de operación de Fundición, 2006

de Huelva, ingresan efluentes ácidos desde el proceso de electrorefinación. Esta diferencia marca la potencial cantidad de yeso, que se podría formar en ambas plantas.

Juntando los efluentes de ambas Plantas de Caletones se llega a un flujo superior, que el de Huelva, por lo que el efluente, que será generado hacia el tratamiento convencional debería ser mayor, considerando, que debe existir además una etapa de lavado del yeso, donde el líquido remanente, también debería ser enviado a las Plantas de Tratamiento.

La concentración de sólidos en suspensión es superior en la Planta de Huelva, por lo que los microfiltros a ubicar, deberían tener menores problemas de obstrucción en las membranas, y por ende una mayor facilidad de limpieza.

Por otro lado, es importante señalar, que según los estudios analizados en el Capítulo anterior, se obtuvo como resultado partiendo de 3.8 [g/L] de arsénico en el efluente, una concentración en el yeso de 65 [ppm]. Normalmente en la operación de Caletones bordea los 12 [g/l], con lo cual se podría esperar un contenido mucho mayor que lo indicado por el Decreto 148, siendo entonces un residuo peligroso. Como sugerencia ante esta posible problemática, se debería buscar la forma de disminuir la concentración de arsénico, por ejemplo aumentando la eficiencia de los precipitadores electrostáticos, en la etapa de limpieza de los gases, que llegan a las Plantas de Ácido.

### **7.3 Análisis de modificaciones buscadas.**

A continuación se muestra el diagrama de bloques con las condiciones actuales, y la implementación de las nuevas etapas del proceso.

Como se puede apreciar en la Figura 7-1 la producción de yeso es similar a lo implementado en España. La principal diferencia viene dada por la separación de los efluentes que son descargados a las Plantas de Efluentes 1 y 2.

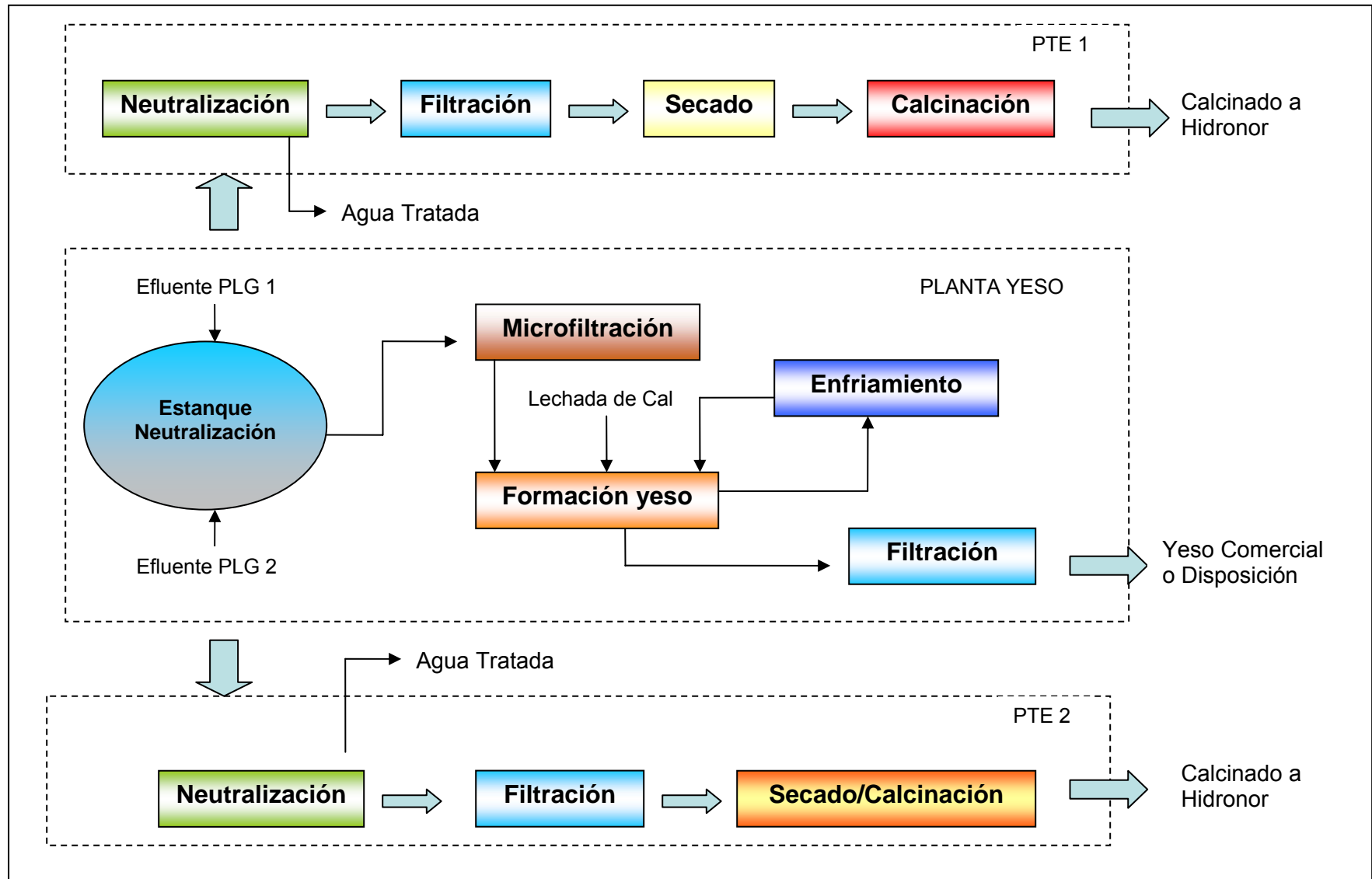


Figura 7-1: Alternativa de mejoramiento en las PTE's

Para tener una visión más clara acerca de cada etapa, que desea implementar, se hará una descripción de cada una:

- Adición de Cal

En el proceso desarrollado en Huelva, la cal es agregada en forma de polvo, lo que genera claros problemas, por la incrustación de microambientes básicos en el yeso, que hacen aumentar la precipitación de arsénico en forma de arsenitos y arseniatos, y además es absolutamente necesario, que la agitación sea lo más óptima posible. Por lo cual en Plantas de Efluentes de Caletones, se debería seguir utilizando el sistema de lechada de cal actual. Además este sistema no tendría problemas de dosificación, ya que actualmente existe una holgura.

- Estanque de Homogenización

El Estanque de homogenización que se desea instalar, debe ser de dimensiones importantes, de manera que pueda entregar flexibilidad a la operación, y así también que cumpla el objetivo de mezclar los efluentes provenientes desde las PLG's.

- Microfiltración

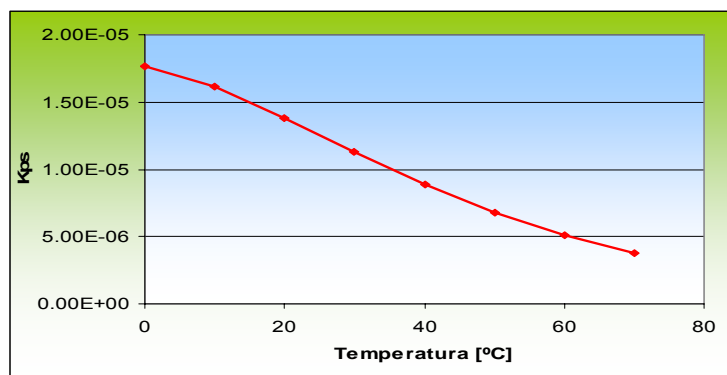
La microfiltración previa al proceso tiene como objetivo principal, extraer la mayor cantidad de partículas en suspensión que se encuentran presentes en el efluente líquido, que será procesado para la precipitación de yeso.

Debido a que los elementos, como el arsénico y el plomo, pueden llegar a ser determinantes en una posible venta o disposición del producto final. En el caso del plomo, se podría encontrar como un compuesto insoluble, según los análisis realizados previamente, por lo que se generaría un problema importante dado el pequeño tamaño del compuesto. Según lo anterior, el microfiltro debiera poseer una membrana altamente fina, para captar la mayor cantidad de compuesto de pequeño micronaje.

- Enfriamiento

En esta operación se requiere el uso de un intercambiador de calor, que enfríe la recirculación, que contiene principalmente cristales de yeso. Este enfriamiento del yeso, tiene como finalidad poder aumentar la solubilidad del Sulfato de Calcio presente en la recirculación, y agregarlo en un Estanque de Precipitación, dada la exotermicidad de la reacción de Neutralización.

La temperatura influye la solubilidad de los compuestos, ya que la constante de equilibrio es una función de la temperatura. Para determinar, el comportamiento, en este sentido se debe tener claro, la entalpía de reacción, ya que si es una reacción endotérmica, la constante de equilibrio aumenta, ante un aumento de temperatura, si la reacción es exotérmica, ocurre lo contrario. En la Figura 7-2, se aprecia el comportamiento del Sulfato de calcio.



**Figura 7-2: Influencia de Temperatura en Solubilidad del Sulfato de Calcio.**

Como se puede apreciar claramente en el gráfico, una disminución de la temperatura llevaría a un aumento de la solubilidad del sulfato de Calcio.

- Separación de los sólidos

Posterior al paso de formación del yeso es importante contar con un sistema de separación de sólidos. Esta división de partículas tendrá como objetivo, que sólo pasen a la filtración final los sólidos mejor cristalizados, dejando los de menor tamaño a una recirculación. Con este sistema, que será operado por hidrociclones,

se garantiza que las partículas de yeso que son enviadas al filtro banda sean las de mayor tamaño.

- Formación del yeso

La precipitación del yeso será realizada en tres estanques consecutivos, los cuales entreguen un tiempo de residencia necesario para la formación de los cristales de yeso. Estos estanques deben ser fuertemente agitados, lo cual es necesario para que no exista formación de microambientes básicos, generados por la cal, que en cierta medida aumentan la probabilidad de la precipitación de arsénico.

- Filtración

La filtración realizada en un filtro banda, tiene como objetivo extraer la mayor cantidad de agua de la borra de yeso. Otra particularidad de la filtración utilizada es la de lavar mediante contracorriente el yeso, para disminuir la acidez, y limpiar las impurezas presentes.

## **7.4 Estudio preeliminar de modificaciones.**

### **7.4.1 Producto obtenido**

Para analizar las modificaciones que se desean implementar en las Plantas de Tratamiento de Efluentes, es importante tener presente las condiciones de Operación (pH, Temperatura, tiempo de residencia).

Ante este escenario, se realizó un estudio preeliminar para analizar los reales efectos que podría tener la implementación de la modificación en las plantas con las condiciones actuales. El primer punto a considerar es analizar, lo referente a la producción de yeso comercial, para lo cual se realizó un análisis a una planta del modelo por separado, para poder obtener relaciones importantes entre las distintas



variables del proceso. La planta a analizar es la PTE N°2. Los parámetros de operación utilizados se muestran a continuación<sup>31</sup>

**Tabla 7-2: Parámetros de operación PTE 2, 2005**

Parámetro	Valor
Flujo a PTE [m <sup>3</sup> /h]	8.6
Concentración SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> [g/L]	98.7
Arsénico [mg/L]	11500
pH Efluente	-0.31
pH tope de formación de yeso <sup>32</sup>	1

En primer lugar es importante tener una visión bien clara acerca de la influencia del pH sobre la formación de yeso, de manera de tener conciencia acerca de la cantidad de yeso que se podría llegar a producir trabajando a un pH bajo. En la Tabla 7-3, se muestran los valores teóricos obtenidos, para varios pH:

**Tabla 7-3: Cantidad de yeso teórico en función del pH**

pH	Yeso teórico [kg/h]
0	740,2
0,5	234,1
1	74,0
1,5	23,4
2	7,4
2,5	2,3
3	0.7

Como se puede apreciar en la Tabla 7-3, el total teórico de yeso es muy significativo a valores de pH bajos, en cambio a valores más altos la diferencia es ínfima. Esto es importante tenerlo presente dado que el pH final de operación será un indicador de la cantidad máxima de yeso a producir.

<sup>31</sup> Datos obtenidos de operación PTE 2, 2005

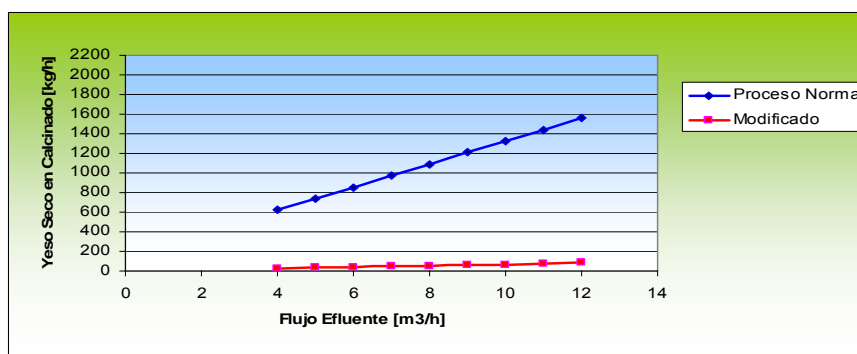
<sup>32</sup> pH máximo en Proceso de Producción de Yeso de Huelva, España

A modo de estimación de cálculo, se realizará un análisis en el modelo definido anteriormente para PTE 2, el cual será trabajado con los datos operativos del año 2005, y que tendrá por objetivo mostrar la disminución de producción de calcinado.

Con el flujo dado, del modelo de la planta se obtuvo como resultado 1160 [kg/h] de yeso seco en calcinado. Los resultados obtenidos indican que existe una notable disminución, si se compara el yeso seco obtenido en el calcinado, con respecto a una hipotética situación en donde se precipita yeso, utilizando como punto de operación pH 1. La cantidad de yeso seco, que se generaría en el calcinado, andaría en el orden de los 58.5 [kg/h]. Como se puede notar, teóricamente la masa de calcinado se vería ampliamente disminuida, lo cual sería favorablemente económico, desde el punto de vista de la cantidad de residuo que se enviaría a Hidronor. El pH residual, será comprobado, mediante experimentación, de forma de determinar en forma real, la concentración de elementos como Arsénico y Plomo, que podrían afectar la posterior comercialización del yeso.

Para poder complementar éste estudio, se trabajó una tabla resumen que indica la cantidad de yeso seco existente en las actuales condiciones, con respecto a una posible modificación, pero variando el flujo de entrada del efluente.

A continuación se muestra en la Figura 7-3, los resultados obtenidos al sensibilizar el flujo, con respecto a la masa de yeso seco con y sin modificación.



**Figura 7-3: Comparación de Yeso en Calcinado respecto del Flujo**

Como se puede apreciar existe una diferencia importante entre la masa del yeso seco en calcinación con el proceso normal para la Planta de Tratamiento de Efluentes N°2, con respecto al proceso modificado con la extracción previa del yeso. La disminución del yeso, es prácticamente de un 90%, respecto del proceso normal, lo cual indicaría una disminución importante del material final.

Por otro lado se analizó, el comportamiento de la planta con respecto a la cantidad total de calcinado emitido. Con las condiciones supuestas y se realizó una comparación entre la masa total que es emitida actualmente en comparación con una supuesta modificación solo extrayendo el Sulfato de Calcio de la Planta N° 2.

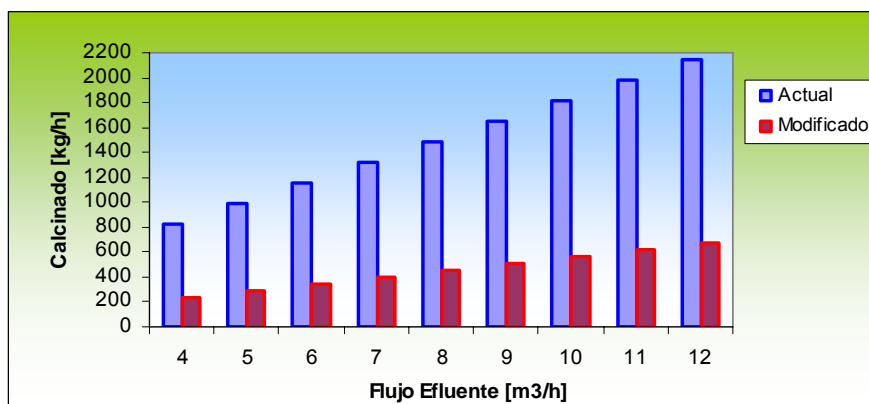
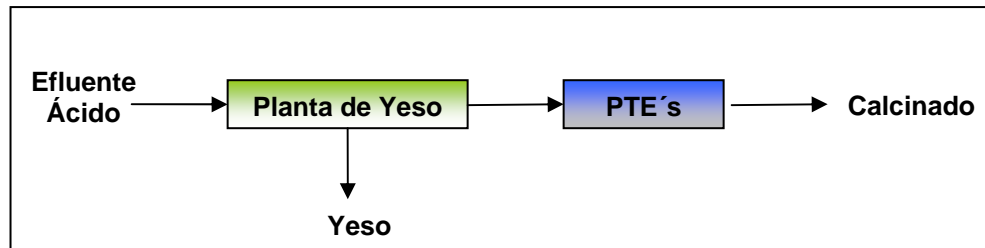


Figura 7-4: Variación de calcinado con extracción de yeso

#### 7.4.2 pH de operación

Para determinar de forma teórica, el pH de operación, se entregarán los cálculos orientados a establecer el pH de salida del Estanque de Precipitación de yeso, el cual será objeto de variación. La idea es poder determinar en forma estimativa, el porcentaje de lodos, que seguiría enviándose a tratamiento, y por otro lado estimar, la relación de yeso, que se obtendría.

En la Figura 7-5 se presenta un esquema simplificado de los cálculos desarrollados.



**Figura 7-5: Esquema de estimación realizada**

Para realizar los cálculos, se consideraron las condiciones del año 2005, para ambas plantas, se presentan en la Tabla 7-4.

**Tabla 7-4: Parámetros de operación PTE's, 2005**

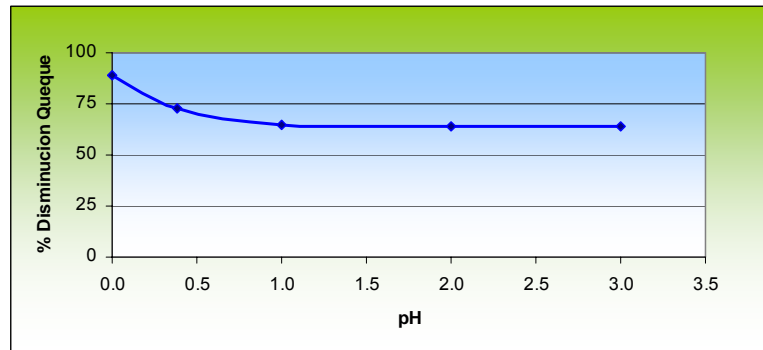
Condición	PTE 1	PTE 2
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	10.6	8.6
g/l As	10.1	11.5
g/l SO <sub>4</sub>	46.2	98.7
Queque Húmedo [kg/h]	920	1584

Las condiciones requeridas fueron ingresadas en los modelos de ambas plantas de forma de encontrar la masa de queque húmedo respectivo. Con los cálculos estimativos necesarios para determinar las características, de los flujos que debían ser ingresados a los modelos, se tienen como resultados, los siguientes datos, a partir de la variación del pH de precipitación del yeso. A continuación se entrega un resumen con los cálculos realizados para las distintas condiciones de salida:

**Tabla 7-5. Resultados de estimaciones realizadas para el pH**

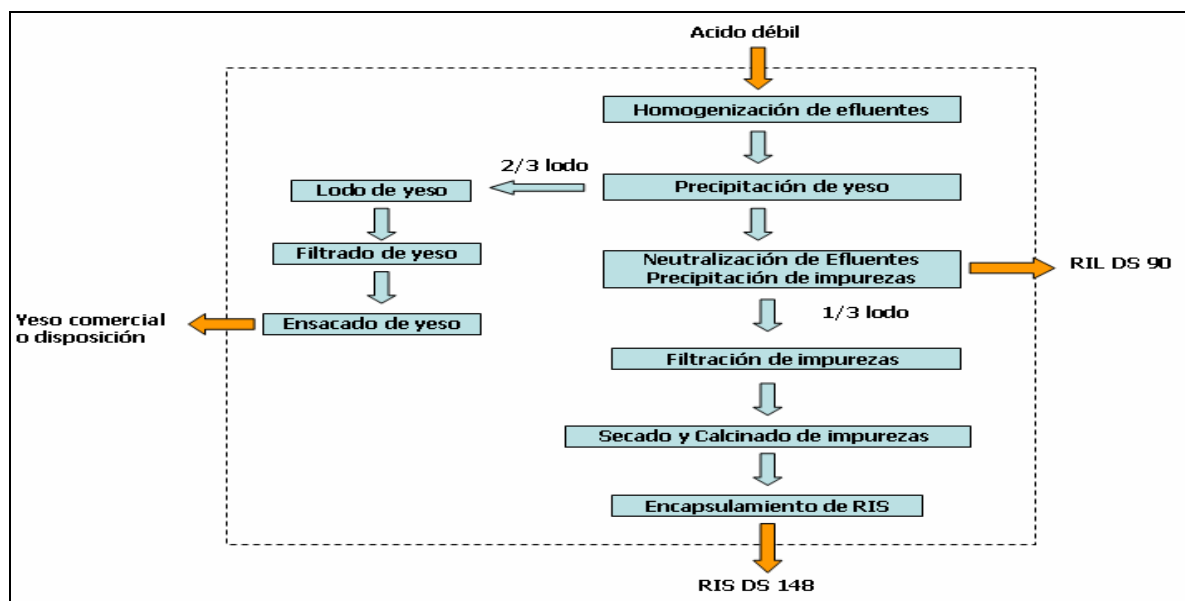
Variable	pH 0	pH 0.38	pH 1	pH 2	pH 3
pH entrada	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16
Yeso formado [kg/h]	747.4	1711.4	2234.7	2383.5	2398
Masa SO <sub>4</sub> libre [kg/h]	921.6	384	92.16	9.2	0.92
Concentr. SO <sub>4</sub> libre [g/l]	48	20	4.8	0.48	0.048
Yeso Húm. a calc. [kg/h]	1652.5	688.6	165.3	16.5	1.7
Yeso seco en calc. [kg/h]	1306.4	544.3	130.6	13.1	1.3

Una relación importante de los datos obtenidos, es la referente al pH de salida de la precipitación del yeso con respecto de la del porcentaje de disminución del queque húmedo que se podría obtener tentativamente.



**Figura 7-6: Porcentaje Disminución de Queque Húmedo respecto del pH de precipitación**

Según el porcentaje de disminución del queque húmedo, que podría ser obtenido a partir de la extracción del yeso previamente, se puede apreciar claramente, que el porcentaje de disminución bordearía el 65% si se extrae el yeso a un pH mayor que uno, pero por otro lado existe la limitante de que a valores de pH más altos, exista la precipitación de compuestos arseniacales en el producto extraído. Un diagrama de flujo tentativo con los resultados obtenidos, se presenta en la Figura 7-7.



**Figura 7-7: Diagrama de Flujo de Alternativa en Estudio**

Los beneficios, que se obtendrían a partir de menores costos de operación, utilizando esta alternativa de tratamiento, de incorporación de un circuito de pre-neutralización, que reduce en casi dos tercios, la cantidad de residuos peligrosos a ser tratado. Por otro lado, se reduce a un tercio la carga de sólido, que debe ser tratada externamente, lo que reduce altamente los costos operacionales, en comparación a los procesos de calcinación o de tratamiento del residuo peligroso fuera de Caletones.

## **7.5 Muestreos de precipitación de yeso**

Para poder ser rigurosos en el análisis que se está realizando, paralelamente al desarrollo del modelo, se realizaron estudios, a nivel de laboratorio, con el objeto de obtener datos relevantes. A continuación se presentan los resultados de ese análisis realizado.

Como ha sido mencionado anteriormente, uno de los puntos más importantes de éste estudio, sin lugar a dudas es la concentración de Sulfato, que se deberá dejar libre de manera que el yeso, cumpla con las normativas medioambientales. Esto es principalmente porque la cantidad de arsénico que debe contener el yeso para que sea comercial debe cumplir con un estándar, y si esto no ocurre, el yeso debería ser enviado a botadero.

### **a). Filtración previa**

Para verificar la efectividad de una filtración al efluente se filtro a vacío, para lograr este objetivo. Asimismo, como se indicó, la experiencia de filtrar se debió repetir varias veces de manera que el líquido extraído contuviera un menor porcentaje de sólidos. Luego, las muestras del polvo y líquido remanente fueron enviadas a análisis para poder determinar cual fue la eficiencia de la extracción.

Los resultados de éste análisis se indican en la Tabla 7-6

**Tabla 7-6: Resultados de muestreo de efluente filtrado**

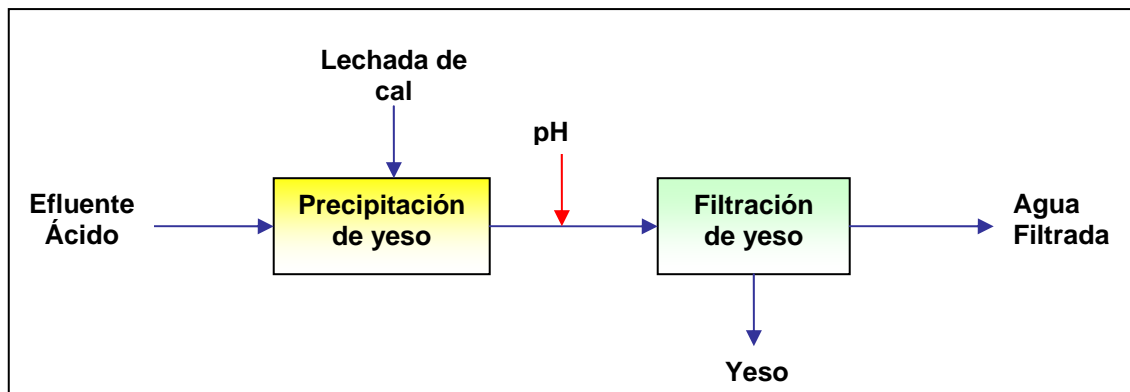
Parámetros		EFLUENTE	
		Líquido	Polvo
<b>pH</b>	[ppm]	0.1	2
<b>As</b>	ppm	22600	9420
<b>As<sup>+3</sup></b>	ppm	22100	9305
<b>As<sup>+5</sup></b>	ppm	540	115
<b>Fe</b>	ppm	725	8770
<b>SO<sub>4</sub></b>	%	23.5	14.8
<b>Pb</b>	ppm-%	16	25.30%
<b>Hg</b>	ppm	<0,01	1740
<b>Zn</b>	ppm	2000	6180
<b>Se</b>	ppm	<0.01	3115

Según estos resultados obtenidos, se puede apreciar que:

- El pH del líquido es más bajo dada la concentración de sulfatos presentes, y es menor en el caso de los polvos, ya que hay menos sulfatos presentes.
- El arsénico sigue manteniendo una alta concentración después del prefiltrado en sus dos estados, dada la alta solubilidad que presenta.
- El plomo tiene una alta concentración en los polvos, y baja en el líquido, con lo que se asume una importante separación de este elemento.
- El mercurio y el selenio tienen una baja concentración en el líquido, por lo que es atrapado casi en su totalidad en los polvos.
- El hierro y el Zinc, pasan una cantidad importante hacia el líquido, pero alcanzan una concentración considerable en el polvo.

b). Precipitación de yeso

Para poder estimar el rango de pH óptimo para realizar la precipitación del yeso, se realizaron varias experiencias a distintos pH de neutralización, de manera de poder obtener las distintas concentraciones generadas, ante éstos cambios. Lo importante era medir el pH hasta cual se realizó la precipitación, y posteriormente, la concentración del yeso obtenido. El esquema de la Figura 7-8 muestra, la operación desarrollada.



**Figura 7-8: Esquema de mediciones a producción de yeso**

Los resultados<sup>33</sup> más relevantes de las concentraciones de arsénico, en las muestras anterior y posterior a la etapa de lavado, se muestran a continuación en Tabla 7-7.

**Tabla 7-7: Resultados de precipitación de yeso**

Parámetro	pH 0.35	pH 0.19
Arsénico antes lavado [ppm]	14.800	12.000
Arsénico después de lavado [ppm]	12.7000	10.085
Humedad del yeso %	50.6	51.2

La concentración de arsénico en el yeso es un punto fundamental de éste análisis, ya que indicaría cual debiese ser el pH óptimo para trabajar. Según los resultados obtenidos se puede apreciar que a pesar del bajo pH de la precipitación, la cantidad de arsénico presente en el yeso es extremadamente alta, antes y después de la etapa de lavado. Esto último debería ser analizado en mayor profundidad, de tal manera de poder ajustar, y mejorar la concentración de arsénico presente en el yeso. Una explicación ante tales resultados, es que no se realizaron los lavados necesarios para extraer el arsénico, lo cual es perfectamente solucionable, en una operación. La humedad contenida resultó elevada, lo cual también puede ser solucionable, mejorando la filtración, o tal vez instalando una etapa de secado para el yeso, que puede ser potencialmente comercializable.

<sup>33</sup> En anexo A.1.4 se presentan el resto de los resultados entregados.



## **CAPITULO 8 MODELACIÓN DE LAS PTE'S ADECUADAS**

Una vez que ya se conocen las condiciones generales de operación de la planta de producción de yeso, se optó por anexar, esta etapa, al modelo de las Plantas de tratamiento de efluentes actuales. Esto tenía como objetivo principal estudiar y poder determinar a nivel de modelo, el comportamiento de las plantas, con la implementación de diversos cambios a las actuales condiciones operativas. Con el respectivo análisis de sensibilidad, se obtendrán las conclusiones preeliminares a partir del modelo desarrollado.

Para realizar los balances en la etapa previa se recurrió a las condiciones de operación del año 2006 de ambas Plantas, de tal forma de tener los antecedentes más cercanos para el balance final realizado.

En este Capítulo se desarrollan los balances de masa requeridos para la etapa anexa al proceso buscando obtener como resultados cuales serían las condiciones y comportamiento operativo modelado.

Dado que el presente trabajo de titulación, está principalmente orientado a analizar y proponer alguna acción para la adecuación de las Plantas de Efluentes, en este análisis final, se entregarán los aspectos más importantes del modelo modificado. Por otro lado, el estudio está basado en una serie de suposiciones, que sólo tienen están orientadas para poder inferir, el comportamiento operativo de cada una de la Plantas, con el cambio de estructura señalado.

## 8.1 Estructura general de modificación

Con todos los antecedentes recabados del proceso de producción de yeso de Huelva, en la Figura 8-1, se muestra el diagrama de flujo con la estructura tentativa para el proceso actual.

Al proceso alternativo, se pueden mencionar algunas observaciones, que serán planteadas, pero que no serán abarcadas, dados los alcances del presente trabajo:

- En el caso del Estanque de Homogenización, que se desea instalar en la actual piscina de efluentes, debe existir un análisis previo que indique, que las dimensiones de dicho estanque sean las indicadas para tener un sector resguardado en caso de emergencia. En caso de que el estanque no cumpla con los parámetros señalados, se pueden generalizar dos opciones: realizar una excavación en la actual piscina, o ubicar dos estanques de dimensiones menores, que cumplan con el volumen de almacenamiento deseado.
- Como se desea instalar un Estanque de homogenización, podría surgir problemáticas relacionadas con la agitación de la mezcla, debido a las dimensiones de dicho estanque. Por lo que se debería estudiar algún mecanismo, que pueda soslayar esto. Actualmente existen sistemas de agitación basados, en la instalación de toberas en el interior de los estanques, y que se encuentran conectadas a una bomba externa, para alcanzar una alta homogenización.
- Para la nueva piscina de efluentes, que se desea implementar, podrían existir problemas de decantación de sólidos, que podrían afectar la homogeneidad del efluente a tratar, por lo que una alternativa, podría ser la instalación de un estanque, que almacene dicho volumen.
- Si se desea lograr una óptima limpieza del efluente que entra al proceso de formación de yeso, sería recomendable realizar un filtrado previo a la

microfiltración. Este filtrado podría ser realizado con un filtro común como uno de prensa. La idea es que sólo las partículas más finas sean captadas en el microfiltro. Esta recomendación vendría dada por los constantes problemas que han afectado la operación normal de la planta de Huelva.

- Dado, que un punto crucial en la obtención del yeso es la precipitación de arsenitos y/o arsenitos de calcio, una alternativa para este problema podría ser el enfriamiento de la borra de yeso, previo al paso de filtración. Esto se fundamenta en el comportamiento del arsénico en medios ácidos (Figura 2-1), en el cual un enfriamiento de la corriente generaría una cantidad importante de arsénico decantado, y que posteriormente debiera ser filtrado, de forma de extraerlo. Esto tendría como objetivo el poder disminuir la carga de arsénico, que se tendría en la Etapa de Precipitación del yeso, y que podría generar algún tipo de problemática.

A continuación se presenta en la Figura 8-1, un diagrama con la estructura de la etapa previa a analizar.

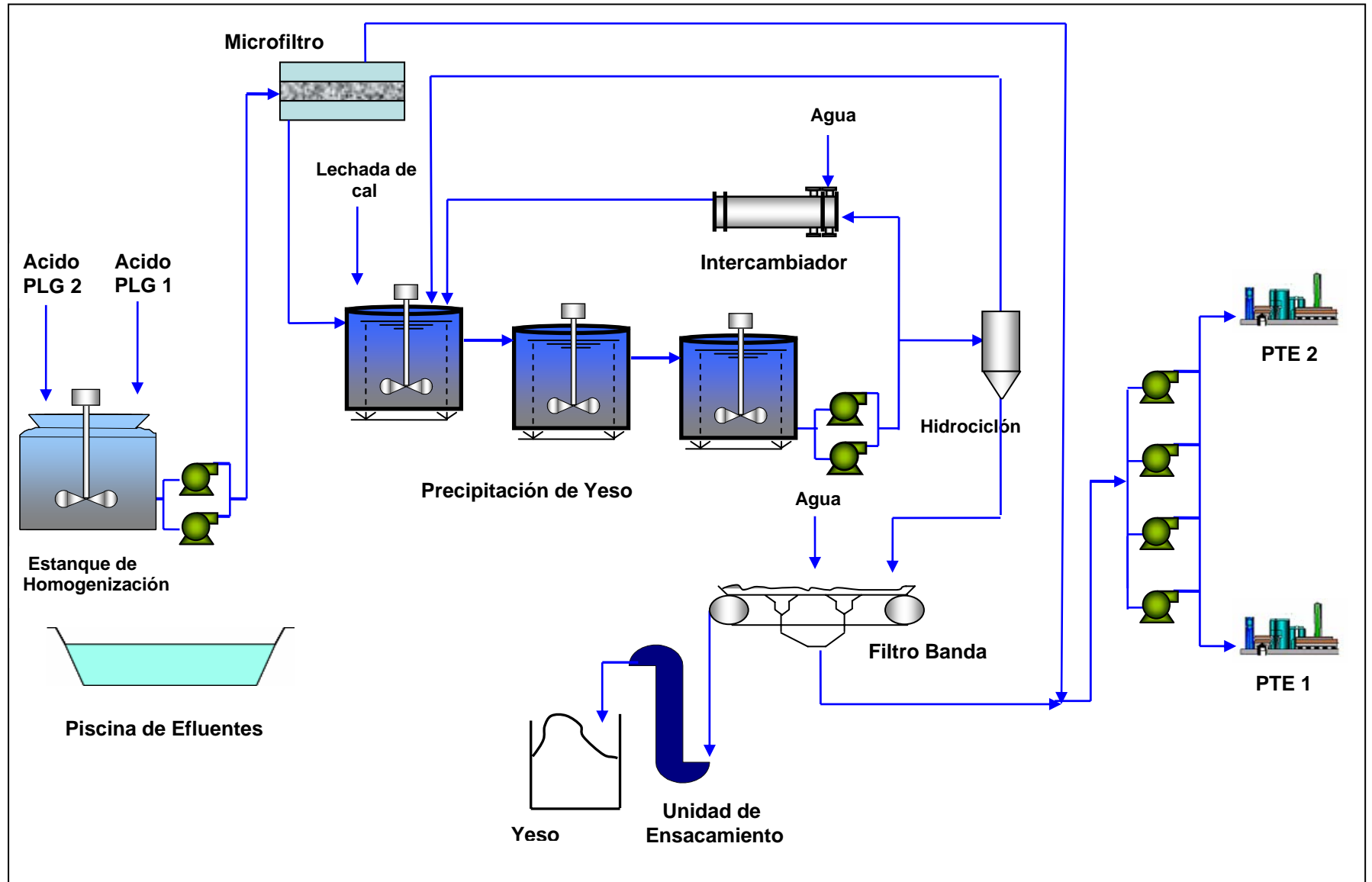


Figura 8-1: Diagrama de Proceso de Producción de yeso

## 8.2 Balances de masa a Producción de yeso

Los balances a esta etapa previa fueron realizados para cada equipo por separado tomando algunas suposiciones, que enuncian se a continuación:

- La etapa de microfiltración será considerada como una etapa única, ya que para efecto de estimación de costos y equipos, deben ser consideradas como un conjunto de varias unidades paralelas separadas.
- Al igual que en el caso del microfiltro, se hará la suposición de una etapa de hidrociclado, pero que en realidad deben ser considerados varios ciclones pequeños como un conjunto. Esto será considerado en los costos preeliminares del Capítulo siguiente.

Antes de comenzar el análisis al balance es importante mencionar la preponderancia, que tiene el valor del pH residual, el cual va a jugar un valor fundamental en la conveniencia del proyecto. Por otro lado se debe mencionar, lo referente a la concentración de arsénico y sulfato del flujo de descarte a las plantas de Tratamiento de Efluentes N° 1 y 2, el que indicará las actuales condiciones de las plantas.

Los balances a desarrollar tienen como objetivo, determinar cuales son los requerimientos, y condiciones en las cuales se trabajaría esta alternativa. A continuación se entrega el desglose por equipos desarrollados, para el balance de masa<sup>34</sup> de la “etapa previa”, a anexar en el modelo inicial.

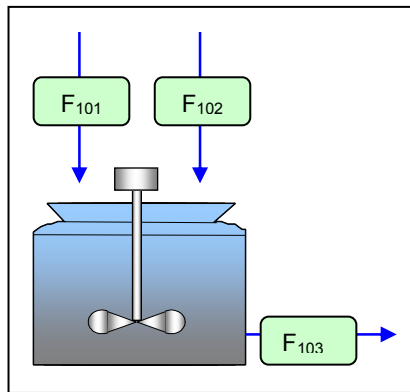
---

<sup>34</sup> Los balances de masa están estructurados, con números de corrientes, que indican los flujos supuestos

a). Estanque de Homogenización

En este estanque se pretende juntar, el efluente de ambas plantas, de manera que e el flujo enviado a la precipitación del yeso sea de una concentración uniforme de sulfato principalmente.

El balance de masa queda:  $F_{101} + F_{102} = F_{103}$  (8.1)



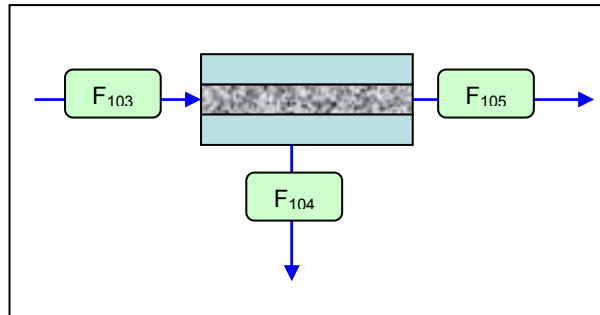
**Figura 8-2: Balance de Masa a Estanque de Homogenización**

Número de corriente		F <sub>101</sub>	F <sub>102</sub>	F <sub>103</sub>
Descripción		Efluente PLG 1	Efluente PLG 2	Entrada a Microfiltración
Flujo	m <sup>3</sup> /h	10.6	8.6	19.2
	kg/h	11108.8	9012.8	20121.6
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1048	1048	1048
PH		0	-0.3	-0.1

- Las variables de entrada a la planta, que en este caso, serían ambos flujos del efluente de las Plantas de Limpieza de Gases. Contienen las características principales de los balances a desarrollar.

b). Microfiltro

Balance de masa:  $F_{103} = F_{104} + F_{105}$  (8.2)



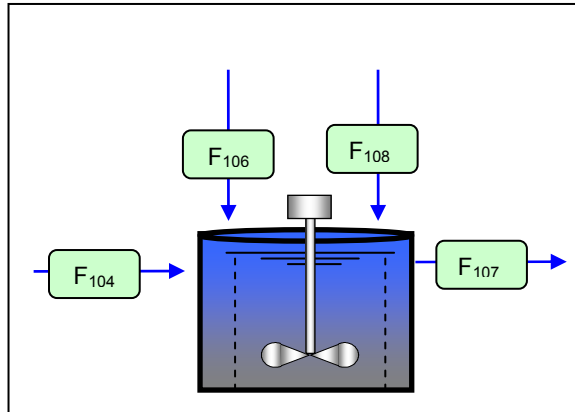
**Figura 8-3: Balance de Masa a Microfiltro**

Número de corriente		F <sub>103</sub>	F <sub>104</sub>	F <sub>105</sub>
Descripción		Entrada a Microfiltración	Salida Microf. a opción yeso	Salida Microfiltro a Plantas
Flujo	m <sup>3</sup> /h	19.2	19.15	0.1
	kg/h	20121.6	200121.4	53
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1048	1048	1000
PH		-0.1	-0.1	

- Los sólidos extraídos por la operación de microfiltrado, se encuentran en un rango entre 85 y 95%, respecto de los que ingresan a la operación.
- La operación de microfiltrado, fue considerada sólo como una unidad de extracción de sólidos en suspensión, y que desde el punto de vista particular de los costos, fue analizada como una serie de equipos similares asociados.

c). Estanque de Precipitación de yeso

Balance de masa:  $F_{104} + F_{106} + F_{108} = F_{107}$  (8.3)



**Figura 8-4: Balance de Masa a Estanque de Precipitación de Yeso**

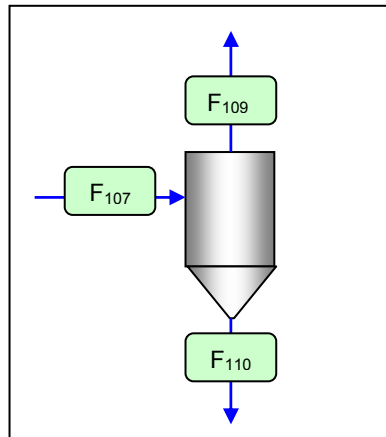
Número de corriente		F <sub>104</sub>	F <sub>106</sub>	F <sub>108</sub>	F <sub>107</sub>
Descripción		Salida Microf. a ppción yeso	Cal a Ppción yeso	Recirculación intercambiador	Descarga desde Ppción yeso
Flujo	m3/h	19.2	5.3	3.8	28.1
	kg/h	20077.4	5784.3	4015.5	29877.2
Densidad	kg/m3	1048	1085	1064	1064
PH		-0.1	11.5	1.5	1.1

- El pH de precipitación de yeso utilizado, es el máximo, que es utilizado en la operación de Precipitación de yeso en la Planta de Efluentes de Huelva, o sea uno (1)
- La reacción de Neutralización del ácido tiene un grado de conversión de un 100%
- Los Estanques de precipitación, seguidos del inicial, tenían como objetivo entregar un mayor tiempo de residencia global, por lo que para efectos de cálculo sólo se evaluó el primero.



d). Hidrociclón

Balance de masa:  $F_{107} = F_{110} + F_{109}$  (8.4)



**Figura 8-5: Balance de Masa a Hidrociclón**

Número de corriente		F <sub>107</sub>	F <sub>109</sub>	F <sub>110</sub>
Descripción		Descarga desde Ppción yeso	Recirculación Hidrociclón	Descarga Hidrociclón
Flujo	m <sup>3</sup> /h	28.1	3.8	24.3
	kg/h	29877.2	4015.5	25861.7
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1064	1064	1064
PH		1.1		1.1

- El porcentaje de eficiencia del hidrociclón está considerado en un rango entre un 80 y 90%, de la separación de los sólidos de la etapa anterior.
- Esta etapa de separación de sólidos, será considerada como un conjunto de equipos similares, y que para efectos de cálculo se tomó como una unidad única.

e). Filtro banda

Balance de masa:  $F_{111} + F_{112} = F_{110} + F_{113}$  (8.5)

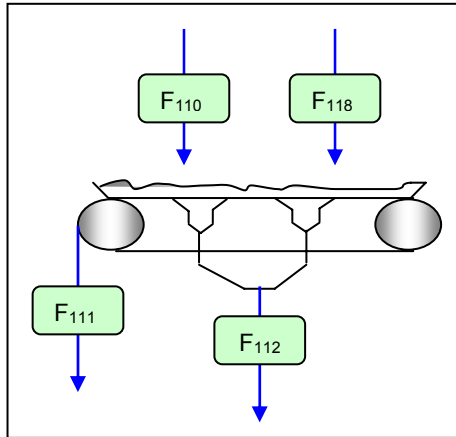
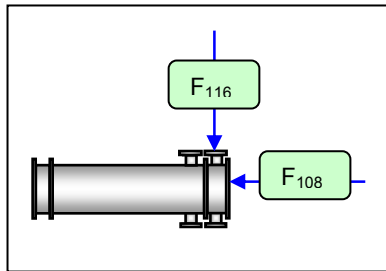


Figura 8-6: Balance de Masa a Filtro Banda

Número de corriente		F <sub>110</sub>	F <sub>118</sub>	F <sub>111</sub>	F <sub>112</sub>
Descripción		Descarga Hidrociclón	Agua de Lavado	Masa yeso (kg/h)	Líquido Filtrado
Flujo	m <sup>3</sup> /h	24.3	1.3		24.7
	kg/h	25861.7	1293.1	2239	24915.8
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1064	1000		1010
PH		1.1			

- Las etapas de lavado eran las necesarias de forma de extraer la mayor cantidad de arsénico presente en el yeso.
- La eficiencia teórica del filtro banda, fue considerada en un rango de 95 a 98%
- El agua de lavado adicionada se encuentra relacionada con el porcentaje de sólidos, provenientes desde el Hidrociclón. Esto es en un rango de 0.05 a 0.08 [m<sup>3</sup> de agua / ton sólidos].

f). Intercambiador de calor



**Figura 8-7: Balance de Masa a Intercambiador de Calor**

Número de corriente		F <sub>108</sub>	F <sub>116</sub>
Descripción		Recirculación intercambiador	Agua de Enfriamiento
Flujo	m <sup>3</sup> /h	3.8	5.7
	kg/h	4015.5	5720
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1064	1000
PH		1.5	
Temp entrada	°C	40	15
Temp salida	°C	25	25

### 8.3 Resultados de la modificación

Existen varios puntos importantes, que deben ser analizados, y que entregan el comportamiento de cada Planta de Efluente. Entre los puntos a considerar en los resultados, se tienen:

- Características del yeso
- Efluente enviado a las Plantas
- Calcinado en las Plantas
- Agua tratada en Plantas
- Insumos de las Plantas

El primer resultado relevante de esta parte final del trabajo, es el referente a las características, con las que cuenta el yeso, que se muestran en la Tabla 8-1.

**Tabla 8-1: Características del yeso obtenido**

Parámetro	Valor
Yeso Total, kg/h	2201
Yeso puro, kg/h	1771
Humedad	20%
As, ppm	130
Pb, ppm	5

Posterior al proceso de la obtención del yeso, el líquido del lavado del yeso, junto con el lavado de los microfiltros, fue enviado al proceso convencional utilizado actualmente. En la Tabla 8-2, se entrega el resultado obtenido.

**Tabla 8-2: Resultados del efluente enviado a las PTE's**

Parámetro	Valor
Flujo, [m <sup>3</sup> /h]	12.1
As, [ppm]	12939
Fe, [ppm]	619.6
Cu, [ppm]	1554
Zn, [ppm]	1208
Pb, [ppm]	6.1
SO <sub>4</sub> , [g/l]	12

Dado, que las PTE's deben tratar igualmente el efluente, que es enviado al procesamiento normal, los resultados se presentan en la Tabla 8-3.

**Tabla 8-3: Resultados Agua Tratada de las PTE's**

Parámetro	PTE 1	PTE 2
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	13.4	13.5
As [ppm]	8.9	13.2
Fe [ppm]	0.08	0.5
Cu [ppm]	0.3	0.8
Zn [ppm]	0.3	0.9

El calcinado obtenido después del procesamiento del nuevo efluente generado, tiene las siguientes características, presentadas en la siguiente Tabla.

**Tabla 8-4: Resultados de Calcinado de las PTE's**

Parámetro	PTE 1	PTE 2
Flujo [kg/h]	736	850
% As	14.4	16.7
%Ca	24.1	25.9
%SO <sub>4</sub>	12.8	15.9
%H <sub>2</sub> O	6	9.8

Las plantas, consumirían las siguientes cantidades de insumos, presentadas en la Tabla 8-5.

**Tabla 8-5: Resultados de insumos de PTE's**

Parámetro	PTE 1	PTE 2
Cal [m <sup>3</sup> /h]	2.3	2.4
Polímero [m <sup>3</sup> /h]	0.2	0.27
Sulfato férrico [m <sup>3</sup> /h]	0.06	0.12

## 8.4 Análisis de Resultados

Desde los resultados obtenidos se pueden desprender varias conclusiones, que se presentan a continuación:

- A partir del pH supuesto para la precipitación, se generarían cerca de 2,2 [ton/h] de yeso total, con un porcentaje de humedad, del 20%, el cual podría ser mayor al requerido por alguna cementera, y que también debe ser evaluado.
- La concentración obtenida de arsénico en el yeso, es superior a la especificada en la normativa, esto resultó por las suposiciones realizadas en el balance. Realizando un lavado más extenso se lograría el objetivo.

- Los flujos enviados a las plantas, deberían contener una mayor carga de agua, que lo actual. Esto se debe, a que se realiza un lavado del yeso, generando un flujo mayor. Comparando el flujo obtenido, con los diseños de ambas plantas, sólo en el caso de la PTE 2, se excedería en un 17%, pero cabe mencionar, que actualmente hay ocasiones, en las que se recibe dicho flujo, y la planta soporta, además la carga de sulfatos es muy menor, generando una menor cantidad de sólidos, y por lo tanto menos problemas en la línea de sólidos (espesadores, filtros, etc).
- En los flujos de aguas de descarte final, se puede apreciar un alto contenido de arsénico, lo que complicaría la posibilidad de reutilizar esta agua en algún proceso. Si supuestamente cumpliera con tener una baja concentración de arsénico, sería interesante el planteamiento de utilizarla como agua de lavado. Por otro lado, si la concentración de arsénico, realmente es el componente, que afectaría la posterior utilización del yeso, sería interesante analizar la alternativa de un enfriamiento con una posterior filtración, previo a la precipitación de yeso, de manera de extraer la mayor cantidad de arsénico posible.
- Con respecto a la adición de insumos en el proceso normal, se ve ampliamente disminuido con respecto a un proceso normal de operación, principalmente, en lo referente a la cal, que disminuye en cerca de un 40%, su adición, ésta disminución se debe a la menor carga de sulfatos agregadas a la planta. En el caso del floculante adicionado también, se ve ampliamente disminuido, ya que la carga de sólidos es menor.
- En el caso del calcinado obtenido, tal como se presentó en el Capítulo anterior, se vería ampliamente disminuido, el volumen de calcinado, que sería clasificado como peligroso.

## **CAPITULO 9 ESTIMACIÓN DE EQUIPOS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Con el análisis del Capítulo anterior se obtuvieron las características principales de una alternativa de modificación a las Plantas de Efluentes actuales. Dado, que el objetivo es implementar el proceso de producción de yeso desarrollado en la Planta de Efluentes de Huelva, en la actual operación de las PTE's de Caletones, se tomará esa estructura, para determinar los equipos asociados en forma global. Las nuevas adquisiciones o instalaciones requeridas, para la adecuación estudiada, se presentan a continuación:

- Piscina de emergencia
- Estanque de homogeneización
- Estanques de precipitación del yeso
- Microfiltro
- Hidrociclón
- Intercambiador de calor
- Filtro de banda
- Unidad de ensacamiento

En este Capítulo se estimarán a grueso modo las principales características de los equipos e instalaciones mencionados, ya que la idea es poder tener en forma global el estructuramiento de la modificación final. El dimensionamiento de los equipos será determinado, de forma estimativa, ya que no se encuentra dentro de los alcances del presente trabajo.

Con los equipos e instalaciones estimadas, es necesario determinar los costos de inversión globales, y a través de una evaluación económica determinar el impacto del proyecto, junto con la viabilidad de la inversión, entregada por los indicadores económicos.

## 9.1 Dimensionamiento general de equipos

El objetivo primordial de éste análisis, es realizar una estimación a modo global. El dimensionamiento realizado está basado en los balances de masa, que fueron identificados en el Capítulo anterior, así también por las condiciones técnicas entregadas por distribuidores de equipos<sup>35</sup>.

### a). Piscina de emergencia

La idea es ubicar una nueva piscina de emergencia, para periodos en los que exista un desbordamiento de la planta, de manera de asegurar el proceso normal, del resto de las operaciones adjuntas. Las características de la piscina son:

- Capacidad estimada: 5000 m<sup>3</sup>
- Días de operación: 10
- Área requerida: 1700 m<sup>2</sup>

### b). Estanque de Homogenización

Los criterios para el dimensionamiento se entregan a continuación:

- El Estanque debe ser diseñado para almacenar dos días de operación
- Capacidad normal del servicio 20 m<sup>3</sup>/h
- Largo del cuerpo es igual a 40% el diámetro
- Volumen libre del estanque igual a 18% del volumen del líquido
- Techo y fondo del estanque son bases planas unidas al cuerpo

El cuerpo del Estanque tiene las siguientes características

- Cilindro Vertical
- Material: Acero carbono galvanizado, interiormente lleva un liner de PVC
- Dimensiones
  - Volumen Nominal: 1260 m<sup>3</sup>
  - Volumen Efectivo: 1060 m<sup>3</sup>
  - Diámetro: 15.9 m
  - Altura: 6.35 m

---

<sup>35</sup> Cotizaciones entregadas en Anexo 4



c). Estanques de Precipitación de yeso

Los tres estanques a considerar tendrán las mismas características. Los criterios del dimensionamiento utilizados son los siguientes:

- Largo del cuerpo igual a 1.5 veces el diámetro
- Volumen libre del estanque igual a 15% del volumen del líquido
- fondo del estanque plana unida al cuerpo y tapa toriesférica.

El Cuerpo de cada Estanque debería contar con las siguientes características:

- Cilindro vertical
- Material: FRP (Plástico reforzado con fibra de vidrio)
- Dimensiones
  - Volumen Nominal: 108 m<sup>3</sup>
  - Volumen Efectivo: 93 m<sup>3</sup>
  - Diámetro: 5 m
  - Altura: 5.5 m

b) Agitadores

El agitador para el Estanque de Homogenización, tendría las siguientes características:

- Potencia del motor: 15 [kW]
- Velocidad: 1500 RPM
- Diámetro del eje: 102 [mm]
- Extensión del eje: 3962 [mm]
- Material: acero inoxidable (316)

El agitador para cada Estanque de Precipitación, tiene estas características:

- Potencia del motor: 2.24 [kW]
- Velocidad: 1000 RPM
- Diámetro del eje: 51 [mm]
- Extensión del eje: 4509 [mm]
- Material: acero inoxidable (316)

f). Intercambiador de calor

Las características son las siguientes:

- Largo: 3.6 [m]
- Diámetro de Carcaza: 12 [pulg]
- Diámetro de tubos:  $\frac{3}{4}$  [pulg]
- Número de tubos: 92
- Arreglo triangular

d). Microfiltro

Los microfiltros estimados para esta etapa son tres con similares. Las características del microfiltro se muestran a continuación:

- Número de tubos internos: 3
- Material de tubos internos: Teflón y propileno
- Tamaño de poro de membrana: 0.3 [ $\mu\text{m}$ ]
- Material de carcaza: Acero inoxidable
- Diámetro de carcaza externa: 0.15 [m]
- Largo del equipo: 3 [m]

e). Filtro Banda

Este filtro deberá contar con dos bombas de vacío a modo de resguardar la operación óptima, ya que en caso de falla de alguno exista otro de recambio. Entre algunas de las características, se tiene:

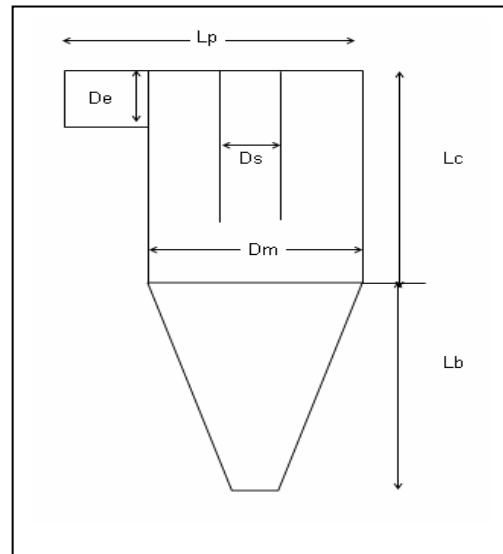
- Ancho: 3 [m]
- Largo: 5 [m]
- Potencia bomba de vacío: 150 [kW]

c). Hidrociclón

Se requerirán seis hidrociclones con similares dimensiones

Dimensiones

Parámetro	Magnitud [cm]
De (cm)	10.2
Dc (cm)	7.6
Dm (cm)	30.5
Ds(cm)	7.62
Lp (cm)	50
Lc (cm)	40
Lb (cm)	40



g). Bombas

Las bombas requeridas tienen un duplicado de igual capacidad instalada en paralelo, y utilizado como bomba auxiliar. El material es acero inoxidable.

Bomba 1: Centrífuga, con una potencia de 7.7[Hp]

Bomba 2: Centrífuga con una potencia de 8 [Hp]

Bomba 3: Centrífuga con una potencia de 6 [Hp]

## 9.2 Costos Asociados

### 9.2.1 Capital de Inversión

#### a). Capital fijo directo

Se entregarán los costos de equipos e instalaciones necesarias más importantes, que fueron señalados anteriormente

**Tabla 9-1: Costo de nuevas adquisiciones**

<b>Equipo o Instalación</b>	<b>Costo [kUS\$]</b>
Piscina de emergencia	200
Estanque homogenización	203
Estanque para precipitación del yeso (3)	105
Microfiltro (3)	180
Hidrociclón (6)	8
Intercambiador de calor	50
Filtro de banda (con 2 bombas de vacío)	400
Agitadores (4)	88
Bombas (8)	35
Unidad de Ensacamiento <sup>36</sup>	100
<b>Total equipos</b>	<b>1369</b>

Los costos asociados se detallan a continuación, en la Tabla 9-2, para determinar el capital fijo directo total

**Tabla 9-2: Costos asociados a los equipos.**

<b>ITEM</b>	<b>Costo [kUS\$]</b>
Equipos instalados	409.2
Cañerías de procesos	342.3
Instrumentación	136.9
Aislación	164.5
Pinturas y Terminaciones	20.5
Instalaciones eléctricas	150.6
<b>Total Costos</b>	<b>1223.7</b>

<b>Total Capital Fijo directo de la Planta</b>	<b>2592.7</b>
--	---------------

<sup>36</sup> Costo referencial similar a la Unidad actual de la Planta

b). Capital Fijo Indirecto

**Tabla 9-3: Costo capital fijo Indirecto**

ITEM	Costo [kUS\$]
Preparación de terreno	136.9
Ingeniería	388.9
Honorarios contratista	259.3
Gastos del dueño	259.3

<b>Total Capital Fijo indirecto de la Planta</b>	1044.3
--	--------

<b>Total Capital Fijo de la Planta</b>	3637.1
--	--------

<b>Imprevistos y Contingencias</b>	1273.0
------------------------------------	--------

<b>Capital de Trabajo</b>	545.6
---------------------------	-------

<b>Total Capital de Inversión</b>	5455.6
-----------------------------------	--------

**9.2.2 Costos de Producción**

a) Costo de Producción directo

**Tabla 9-4: Costos de producción directos**

ITEM	Costo [kUS\$]
Suministros de Operación	747.7
Sueldos	300
Supervisión	60
Mantenimiento y Reparación	181.9
Servicios generales	27.3
Gastos de Laboratorio	45
Total	1361.8

b) Costo de Producción indirecto

**Tabla 9-5: Costos de producción indirectos**

ITEM	Costo [kUS\$]
Impuestos locales	145.5
Seguros	36.4
Tratamiento de Calcinado a Hidronor	1700
Total	1881.9

<b>Costo total producción</b>	<b>3514.6</b>
-------------------------------	---------------

<b>Costo total producto<sup>37</sup></b>	<b>3936.3</b>
--	---------------

### 9.3 Evaluación Económica

A partir de los datos obtenidos en el apartado anterior se entregará la evaluación de tipo económico considerando sólo la nueva instalación en las PTE's. La idea de la evaluación a estimar con el flujo acumulado, la validez de este proyecto, ya que actualmente se encuentra en etapa de estudio.

Como ingreso, fue considerado, el yeso, que tendría características mostradas anteriormente. El precio de venta fue obtenido desde una cementera, que actualmente compra yeso. Lógicamente, que el yeso producido deberá con contar algunas características necesarias para su venta, pero como el enfoque es sólo analizar la alternativa, se supuso la venta total de yeso, con las condiciones indicadas anteriormente. Además se consideraron como ingresos anuales, el no envío de calcinado al tratamiento de Hidronor, después de desarrollada la adecuación a la Planta

---

<sup>37</sup> Se incluyeron costos administrativos, distribución y ventas, e investigación y desarrollo

Los datos y/o antecedentes utilizados para el análisis son los siguientes:

- Tasa de descuento: 8% (Codelco)
- Moneda base: 2007
- Tipo de cambio: 530 \$ / US\$ (año 2006)
- Tasa de impuesto: 57%
- Método de Depreciación: Lineal
- Vida útil de los equipos: 10 años
- Venta de activos: 10% del valor de equipos e instalaciones
- Inversión con Financiamiento propio
- Los años iniciales fueron considerados como periodos de construcción y donde se realizaron las inversiones de Capital Fijo y Capital de Trabajo.

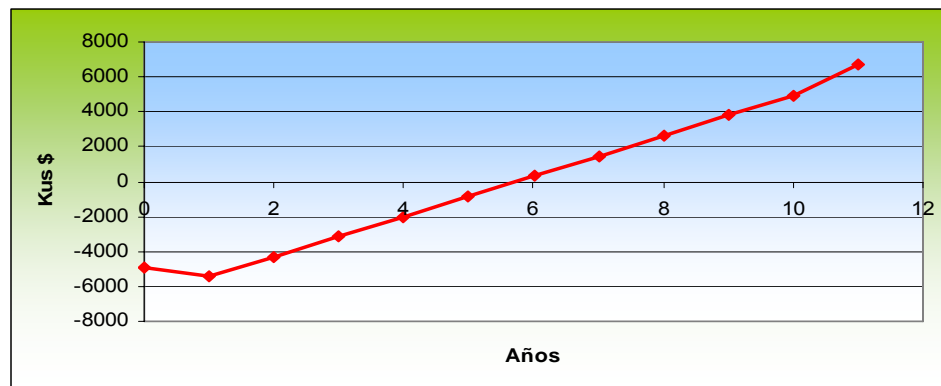
En la Tabla 9-6. se adjunta el flujo de caja para la alternativa evaluada

**Tabla 9-6: Flujo de caja de Alternativa estudiada ([kUS\$])**

Periodo	Año Calendario	Ingresos	Costo total Producto	Utilidad operacional	Depreciación	Venta de activos	Renta Gravable	Impuesto	Utilidad neta	Capital Total de inversión	Capital de Trabajo	Flujo Caja Neto
Año 0	2007									-4910		-4910
Año 1	2008										-546	-546
Año 2	2009	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 3	2010	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 4	2011	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 5	2012	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 6	2013	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 7	2014	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 8	2015	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 9	2016	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 10	2017	6280	3936	2343	259		2084	1188	896			1155
Año 11	2018	6280	3936	2343	259	137	2221	1266	955		546	1760



El flujo de caja proyectado, procede a partir de la estimación de inversiones, ingresos y costos de operación, generados a partir de parámetros comerciales (precios). Cabe mencionar, que estos beneficios económicos, observados, responden a antecedentes evaluados en este estudio, por lo tanto, si se desea evaluar más profundamente, los indicadores económicos, se debería contar con información más detallada. En la Figura 9-1 se presenta el flujo de caja acumulado, de la alternativa estudiada.



**Figura 9-1: Flujo de Caja Acumulado**

Los indicadores económicos de esta alternativa evaluada se muestran en la Tabla 9-7

**Tabla 9-7: Indicadores económicos de alternativa evaluada**

Indicador	Resultado
VAN (kUS \$)	2.386
TIR (%)	17

Según los resultados obtenidos, se tiene que:

- Con la curva del flujo acumulado, se tiene que la alternativa evaluada en aproximadamente en 6 años, debería comenzar a tener algún tipo de rentabilidad, eso es realizando todas las suposiciones, que fueron señaladas previamente.

- Con los resultados obtenidos se genera un antecedente favorable, para la materialización del proyecto, pues los indicadores muestran resultados aceptables. Según el VAN obtenido, que es mayor que cero (0), indica que la inversión es económicamente viable. Por otro lado el TIR obtenido es mayor que la tasa de descuento, lo que se traduce en una viabilidad de la alternativa estudiada.

Los costos actuales de encapsulamiento, por parte de la empresa externa Hidronor, corresponden a 5 [UF/ton], aproximadamente 170 [US\$/ton]. Este considera el costo de encapsulado, más el costo de vertedero, más el costo del transporte del queque fuera de Caletones.

Hoy en día, se producen cerca de 23.000 [ton/año], lo cual si es enviado a la Empresa de tratamiento, se traduce en 3910 [kUS\$/año]. Analizando la alternativa de extracción del yeso previa, se generarían unas 10.000 [ton/año], con un gasto de 1700 [kUS/año], por lo que la reducción de gasto de tratamiento se encontraría en un 56%. Por otro lado, se debería analizar el impacto comercial a nivel de planta, con una nueva instalación, comparando, los costos de secado - calcinado, y envío del calcinado final hacia Hidronor, versus las alternativas, existentes con el yeso obtenido.

Otra alternativa de analizar, vendría determinada por el tratamiento del queque húmedo, sin realizar los procesos finales de Secado y Calcinación, lo que disminuiría, los gastos de combustible y operación, pero aumentaría los costo de encapsulamiento debido al mayor volumen del calcinado.

## CONCLUSIONES

Con la “Incorporación de una Nueva Alternativa Tecnológica, en las Plantas de Tratamiento de Efluentes”, se cumplió uno de los principales objetivos planteados, el cual era estructurar un proyecto para la adecuación de las PTE's, teniendo un alto impacto en los costos de inertización actuales. Mediante la implementación del modelo de balance de masa, además se obtuvieron importantes datos operacionales, que permitirán entender el comportamiento de los procesos.

El efluente generado por las Plantas de Ácido, es altamente complejo de analizar debido a la gran cantidad de elementos que contiene. Particularmente, las variaciones en concentraciones de sulfato y arsénico, determinan cuan normal es el funcionamiento de las plantas, lo cual genera la necesidad de continuar desarrollando estudios más exhaustivos para entender como impacta el arsénico y otros elementos presentes en las operaciones.

Según los resultados obtenidos a través del modelo, se indica que aproximadamente un 65% del total de los sólidos generados podrían, ser extraídos, en un tratamiento de precipitación, previo al proceso normal de operación. El yeso generado a partir de esta alternativa debe ser analizado, para determinar si es un producto comercial o debe ser confinado en lugares autorizados como residuo no peligroso.

Para corroborar las calidades del yeso generado, en forma paralela al desarrollo del proyecto, se efectuaron análisis de laboratorio que mostraron que el yeso contenía una alta concentración de arsénico, situación que podría complicar esta solución. Lo anterior es posible superarlo realizando un mejor lavado del yeso, con lo que se extraería una mayor cantidad de arsénico contenido.

En el caso de que el yeso, no cumpliera con las condiciones de venta, ni la norma establecida y, para evitar enviarlo para su estabilización en la Empresa externa (Hidronor), es posible implementar lo desarrollado en la Fundición Cumerio

(Bulgaria), o sea reciclar parte del yeso, como carga fría. Con respecto a esto último, la diferencia se da que en Bulgaria utilizan un Horno Flash, por lo que se deberían estudiar los efectos potenciales de esta utilización en la operación de Caletones.

Otra alternativa a estudiar, en el caso que el yeso no cumpla las normas establecidas, se refiere a aplicar una etapa de enfriamiento previo al efluente, seguido de una filtración, con lo cual se aseguraría que el arsénico que llega a la etapa de precipitación, se encuentre soluble y sea más fácil de arrastrar por el lavado del filtrado final.

El análisis económico desarrollado entrega un VAN kUS\$ 2.386, y una TIR 17% que indican la conveniencia de continuar los estudios preinversionales. Por otro lado, es importante dejar en claro, que se supusieron condiciones de venta del yeso a una cementera, que debe cumplir con las especificaciones de calidad mínimas, situación que debe ser estudiada y analizada, de acuerdo a las condiciones de mercado.

Tomando en consideración todos los elementos antes indicados, se recomienda que la propuesta sea estudiada para comprobar su factibilidad y se verifique la gran cantidad de oportunidades de mejoramiento que existen, y que van desde la adecuación del transporte de material hasta el mejoramiento en el control e instrumentación.

Adicionalmente, a los resultados de este trabajo se recomienda analizar las siguientes alternativas de tratamientos de residuos de las Plantas de Acido:

- Estudiar algún mecanismo de neutralización, tal como sería el caso de la adición de Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en la primera precipitación, el cual no generaría yeso, sino que Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), soluble, y en una segunda etapa de precipitación adicionar lechada de cal para decantar el arsénico presente, disminuyendo de esta forma la carga de sólidos enviados a calcinación.

- Otra alternativa de procesamiento sería la adición de un reactivo como Sulfhidrato de sodio (NaHS), de tal manera de generar Trisulfuro de Arsénico ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), el cual debería ser enviado a tratamiento externo, y la carga de sólido restante sería ampliamente menor a lo actual. En este caso se deberían tomar los resguardos pertinentes por la potencial generación de Acido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dado el pH de operación. Cabe mencionar, que, se deberían analizar la limitante que la podría generar el valor de los reactivos en todos los casos.
- Una tercera alternativa, sería la adición de Oxido cuproso o cúprico ( $\text{CuO}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  respectivamente), de tal forma de generar Sulfato de Cobre ( $\text{CuSO}_4$ ), soluble, y no producir carga de sólidos. La corriente generada, podría ser enviada a la planta de extracción por Solventes (SX), de tal manera de poder extraer el cobre presente. Las limitantes podrían estar dadas por la obtención del reactivo, y así también por la capacidad que podrían soportar las plantas de extracción, junto con el alto contenido de arsénico, presente en el efluente.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- 1). A. Angela, R. Brockl J. A. Suarez, S. Schonbrunner, "Production of Marketable Gypsum from weak acids –an off products- Saving of disposal volumen and cost", World of Metallurgy, N°2, p 75-82, (2005).
- 2) A. Kontopoulos and M. Stefanakis, "Production of environmentally acceptable arsenites-arsenates from solid arsenic trioxide", Arsenic metallurgy fundamentals and applications, J. Hendrix, P. Queneau and R.G. Reddy, The TMS society, p. 287-301, (1988)
- 3). A. Kontopoulos, M. Stefanakis, and N. Papassiopi "Removal of arsenic from solutions by precipitation as Ferric Arsenates", Arsenic metallurgy fundamentals and applications, J. Hendrix, P. Queneau and R.G. Reddy, The TMS society, p. 321-324, (1988).
- 4). Codelco-Chile, División el Teniente, "Manual de Operaciones de Planta de Tratamiento de Efluente 1y 2", p. 3-80, (2004), (GFUN-PTE-M-002).
- 5). Codelco-Chile, División el Teniente, "Manual de Procesos Plantas de Limpieza de Gases- Zona de Limpieza de Gases, p. 3-60, (Marzo, 2004), (GFUN-PLG-M-001).
- 6). David R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", CRC press, 84<sup>th</sup> Edition, Section 5,(2003-2004)
- 7). Environmental Engineers Handbook - Irene Liu - 1999 - p974 - 989
- 8). Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), "Análisis de la Estabilidad de los Residuos Sólidos arsenicales producidos en la Planta de Tratamiento de Efluentes, División El Teniente", p.8-32, (Noviembre, 2004).

9). Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), “Estudio de la Distribución de Plomo en Fundición Caletones, División El Teniente”, p.2-35, (Diciembre, 2005).

10). J.C.Y Huang, G. H. Khoe, R.G. Robins and T. Nishimura , “The adsorcion of arsenate ion by ferric hydroxide”, Arsenic metallurgy fundamentals and applications, J. Hendrix, P. Queneau and R.G. Reddy, The TMS society, p. 99-107, (1988).

11) J. Donnelly, D. Anderson, C. Evans, “Arsenic Control in Effluents from Copper Smelter Acid Plant”. Air & Waste Management Association Annual Meeting, Salt Lake City, June 2000

12). O. Hougen, A. Watson, K. M. Ragatz, R.A. 1980. “Principios de los Procesos Químicos”, Vol. 2, Termodinámica, p 307-359.

13) Pourbaix Marcel, “Atlas D'Équilibres Electrochimiques”, Publication du centre Belge D'Étude de la corrosion, Paris: Gauthier-Villars and Cie., 1963. 639 p

13). R. Brockl S. Schonbrunner, “Production of Salable Pure Gypsum”, Processing of weak acid, a waste product from cooper smelting, Lurgi-Bamag an Azurix Company, p 1-10, (2005)

14). Robert H. Perry, Don W. Green y James O. Maloney, “Manual del Ingeniero Químico”, Sexta Edición, McGraw Hill, Sección 2, 7y 19, (1999).

15). Software HSC Chemistry 5.0, Outokumpu Research, Pori, Findland, Licence Codelco El Teniente, SN: 50163.

16) T. Nishimura and K. Tosawa, “Removal of arsenic from waste water by of addition of calcium hydroxide and stabilization of arsenic-bearing precipitates by calcination”, Proceedings of impurity control and disposal, CIM, Annual Conference, Vancouver, Canadá, Agosto 1985, Cap. 3, p 1-16.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Desecho:** Cualquier materia líquida, sólida, gaseosa o radioactiva que es descargada, emitida, depositada, enterrada o diluida en volúmenes tales que puedan, tarde o temprano, producir alteraciones en el ambiente.

**Disposición final:** Se entiende por disposición final de residuos peligrosos que implique la incorporación de toda operación de los mismos a cuerpos receptores, previo tratamiento.

**Efluentes:** Descargas emitidas por procesos industriales.

**Estabilización:** Proceso mediante el cual un residuo es convertido a una forma química más estable, el que puede incluir la solidificación cuando ésta produce cambios químicos para reducir la movilidad de los contaminantes.

**Cobre Blister:** Cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores, con una pureza del 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refinación y de moldeo desde donde se obtiene el cobre ánodico, que va hacia la refinación

**EPA:** Siglas en inglés Environmental Protection Agency (Ambiental de Protección Ambiental), organismo a nivel federal de los Estados Unidos.

**Lixiviado:** Hace referencia a cualquier líquido y sus componentes en suspensión, que han percolado o drenado a través de la masa de residuos.

**Manejo:** Acción planeada para hacer evolucionar un sistema, de modo tal que se puede derivar el mejor provecho de él a corto plazo y a la vez, preservándolo para su utilización a largo plazo.



**Máximo nivel permisible:** Norma impuesta por instituciones nacionales de tipo gubernamental, Comités Nacionales o Internacionales, que indican la concentración o dosis de un contaminante que no debe ser sobrepasada, para evitar poner en peligro un organismo, con la finalidad de proteger la calidad ambiental y salud humana.

**Norma de emisión:** Caudal de emisión especificado, que tiene un estado legal. Se define frecuentemente en forma estadística fijando un límite al caudal de emisión. Se especifica en el caso de concentración, el nivel de dilución u opacidad de referencia.

**Relleno de Seguridad:** Instalación de eliminación destinada a la disposición final de residuos peligrosos en zanjas completamente impermeabilizadas, que permiten minimizar el riesgo para la salud y el medio ambiente.

**Residuos:** Sustancias, elementos u objetos que el generador elimina, se propone a eliminar o está obligado según la normativa a eliminar.

**Sólido Pulpas Residuales:** Sólidos resultantes del filtrado de las pulpas residuales productos de la etapa de precipitación de arsénico, principalmente, y que es almacenado en bolsas como RIS.

**Toxicidad:** Capacidad de una sustancia de ser letal en baja concentración o de producir efectos tóxicos acumulativos, cancerígeno, mutagénicos, etc.

## **ABREVIATURAS**

**CT:** Convertidor Teniente

**CPS:** Convertidor Peirce – Smith

**DS:** Decreto Supremo

**HLE:** Horno de Limpieza de Escoria

**MAGA:** Manejo de Gases emitidos por Convertidores

**MSNM:** Metro Sobre el Nivel del Mar

**PFD:** Process Flow Diagram (Diagrama de flujo del proceso)

**PI SYSTEM:** Sistema de Información en línea de las Plantas

**PLG:** Planta de Limpieza de Gases

**PPEE:** Precipitador Electrostático

**PTE:** Planta de Tratamiento de Efluente

**PTPF:** Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición

**RAF:** Refinación a fuego

**TCLP:** Procedimiento para lixiviado con características toxicas (Toxicity Characteristics Leaching Producer)

**USPP:** Unidad de servicios a procesos y productos

## **ANEXOS**

## Anexo 1 Resultados de Ensayos de Laboratorio

### A.1.1 Muestreo a la Planta

MUESTRA		PTE 1	PTE 2
Lechada de Cal	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	13.7	27.2
	Pb [ppm]	1.88	1.63
	Cd [ppm]	0.05	0.01
	Sólidos [%]	17.2	18.6
Efluente	Pb [ppm]	200	240
	Cd [ppm]	31.9	50
	SO <sub>4</sub> [g/l]	41.8	117
	As <sup>+5</sup> [ppm]	105	8.5
	As <sup>+3</sup> [ppm]	10415	14310
	Fe [ppm]	210	570
	Cu [ppm]	1955	3690
	Zn [ppm]	815	1460
Rebose Espesador 1	As <sup>+5</sup> [ppm]	4.4	11
	As <sup>+3</sup> [ppm]	55	23
	Fe [ppm]	0.08	0.18
	Cu [ppm]	0.63	1.41
	Sólidos [%]	0.39	0.45
Underflow Espesador 1	SO <sub>4</sub> [g/l]	6.53	14.7
	As <sup>+5</sup> [ppm]	1250	2320
	As <sup>+3</sup> [ppm]	24150	17660
	Ca [g/l]	8.77	28
	Sólidos [%]	4.66	20.5
Precipitación de As	As <sup>+5</sup> [ppm]	55	110
	As <sup>+3</sup> [ppm]	10	0
	Fe [ppm]	142	263
	Sólidos [%]	0.44	0.54

## Continuación de resultados (A.1.1)

<b>MUESTRA</b>		<b>PTE 1</b>	<b>PTE 2</b>
<b>Agua Tratada</b>	Pb [ppm]	0.12	0.07
	Cd [ppm]	<0.01	0.01
	As+5 [ppm]	7.4	9.8
	As+3 [ppm]	1.8	0
	Fe [ppm]	0.29	3
	Cu [ppm]	0.15	1.1
	Zn [ppm]	0.1	0.79
<b>Estanque de Lodos</b>	SO <sub>4</sub> [g/l]	37.1	8.76
	As+5 [ppm]	1380	1240
	As+3 [ppm]	13160	16380
	Sol. Susp. [%]	23.8	3.6
	Ca [g/l]	37.3	1.11
<b>Filtro Prensa</b>	SO <sub>4</sub> [%]	32	48.9
	As+5 [ppm]	13580	11160
	As+3 [ppm]	68120	54340
<b>Calcinado</b>	Pb [%]	0.68	0.73
	SO <sub>4</sub> [%]	33.8	53.4
	As+5 [ppm]	86000	34800
	As+3 [ppm]	500	28400
	Fe [%]	0.41	0.33
	Cu [%]	1.69	1.54
	Ca [%]	34.3	34.6

## A 1.2 Muestreo a Planta para ajuste de modelo

MUESTRA		PTE 1	PTE 2
Efluente	Pb total [ppm]	530	2090
	Pb sol. [ppm]	6.7	7.1
	Cd [ppm]	60	50
	As+5 [ppm]	95	235
	As+3 [ppm]	16705	16365
	Sol. Susp. [ppm]	950	4800
	Sol. Dis. [g/l]	26.7	61.1
Rebose Espesador 1	Pb [ppm]	16	6.7
	As+5 [ppm]	2	1.2
	As+3 [ppm]	16	18
	Cd [ppm]	0.03	0.01
	Sol. Susp. [ppm]	130	22
	Sol. Dis. [g/l]	4240	4370
Precipitación de As	As+5	1	3.4
	As+3	28	27
	Sol. Susp. [ppm]	865	710
	Sol. Dis. [g/l]	3990	4470
	Fe [ppm]	36	65
Rebose Espesador 2	Pb	0.14	0.22
	As+5	0.74	1.5
	As+4	1.1	2.8
	Cd [ppm]	<0.01	<0.01
	SO4 [ppm]	1390	1320
	Sol. Susp. [ppm]	48	20
	Sol. Dis. [g/l]	4310	4920
Adición Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Fe+3[g/l]	163	31

## A.1.3 Muestreo a Calcinado para comparación de Test EPA (PTE 1)

	Queque húmedo		Calcinado		Calcinado LAB	
	EPA	Concentración	EPA	Concentración	EPA	Concentración
As	13	5.9%	75	6.50%	0.72	6.40%
Cd	< 0.01	215 ppm	0.15	230 ppm	<0.01	200 ppm
Pb	0.79	0.65%	<0.01	0.78%	6.9	0.70%
Cr	<0.01	55 ppm	0.06	65 ppm	0.05	55 ppm
Se	0.04	42 ppm	0.37	38 ppm	0.25	39 ppm
Hg	0.05	22 ppm	0.02	<0.1 ppm	<0.01	<0.1 ppm
Ba	<0.01	<0.01 ppm	0.03	0.03 ppm	0.12	0.12 ppm
Cu	0.18	2.45%	0.45	2.30%	0.15	2.08%
Fe	<0.01	0.50%	<0.01	0.49	<0.01	0.42%
Zn	0.47	7160 ppm	21	7400 ppm	3	6850
Ag	<0.01	<0.01 ppm	<0.01	<0.01 ppm	<0.01	<0.01 ppm

## A.1.4 Muestreo a Calcinado para comparación de Test EPA (PTE 2)

	Queque húmedo		Calcinado		Calcinado LAB	
	EPA [ppm]	Concentración	EPA [ppm]	Concentración	EPA [ppm]	Concentración
As	935	4.10%	355	5.50%	330	5.10%
Cd	0.69	120 ppm	0.15	240 ppm	0.84	130 ppm
Pb	5.6	0.50%	0.45	0.75%	29	0.50%
Cr	<0.01	39 ppm	<0.01	65 ppm	<0.01	37 ppm
Se	0.03	60 ppm	<0.01	38 ppm	0.2	50 ppm
Hg	0.03	3.4 ppm	21	<0.1 ppm	43	<0.1 ppm
Ba	0.11	<0.01	0.06	<0.01 ppm	0.11	< 0.01 ppm
Cu	5.6	1.33%	0.37	1.65%	0.93	1.38%
Fe	<0.01	0.43%	0.02	0.47%	<0.01	0.42%
Zn	34	5930 ppm	0.03	7350 ppm	<0.01	6140 ppm
Ag	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01



## A.1.5 Muestreo a Calcinado en PTE´s

	<b>PTE 1</b>			
	<b>Queque húmedo</b>		<b>Calcinado</b>	
	<b>EPA [ppm]</b>	<b>Concentración</b>	<b>EPA [ppm]</b>	<b>Concentración</b>
As	18	5.40%	200	5.60%
Cd	<0.01	100 ppm	0.02	70 ppm
Pb	0.44	0.40%	<0.01	0.44%
Se	0.11	55 ppm	0.61	38 ppm
Hg	<0.01	32 ppm	<0.01	<0.1 ppm
Cu	<0.01	1.15%	<0.01	1.24%
Fe	<0.01	0.45%	<0.01	0.43%
Zn	0.25	0.53%	0.18	0.57%

	<b>PTE 2</b>			
	<b>Queque húmedo</b>		<b>Calcinado</b>	
	<b>EPA [ppm]</b>	<b>Concentración</b>	<b>EPA [ppm]</b>	<b>Concentración</b>
As	370	5.30%	350	5.50%
Cd	0.92	125 ppm	2.7	95 ppm
Pb	0.06	0.66%	0.82	0.65%
Se	0.04	65 ppm	0.7	60 ppm
Hg	<0.01	22 ppm	<0.01	<0.1 ppm
Cu	0.79	1.10%	135	1.08%
Fe	<0.01	0.36%	<0.01	0.33%
Zn	44	0.68%	100	0.70%

## A.1.6 Resultados de muestreos de producción de yeso

Parámetro	pH =0.185		pH =0.35	
	Yeso húmedo lavado	Yeso húmedo sin lavar	Yeso lavado húmedo	Yeso húmedo sin lavar
As [ppm]	10500	12000	12700	14800
As <sup>+3</sup> [ppm]	10085	11490	12410	14270
AS <sup>+5</sup> [ppm]	415	510	290	530
Cu [ppm]	2970	3770	3520	4090
Fe [ppm]	4300	2500	780	990
Pb [ppm]	55	38	50.0	65.0
Zn [ppm]	1600	2400	2500	6400
Se [ppm]	<0.1	<0.1	0.6	<0.1
Ag [ppm]	<0.1	<0.1	1.7	0.8
SO <sub>4</sub> [ppm]	53.3%	50.7%	68.1	61.8
Hg [ppm]	1.2	6.5	0.74	2.2
Ba [ppm]	24	23	30	40
Sb [ppm]	280	320	340	370

### A.1.7 Imágenes de las muestras tomadas



Lechada de Cal



Efluente Ácido



Efluente con Sólidos  
Decantados



Efluente Filtrado



Rebose Espesador 1



Efluente Final



Descarga de Espesador 1  
PTE 1



Descarga Espesador 1  
PTE 2



Rebose Estanque de  
Precipitación de As



Rebose Estanque de  
Precipitación de As



Queque Húmedo PTE 1



Queque Húmedo PTE 2



Calcinado PTE 1



Calcinado PTE 2



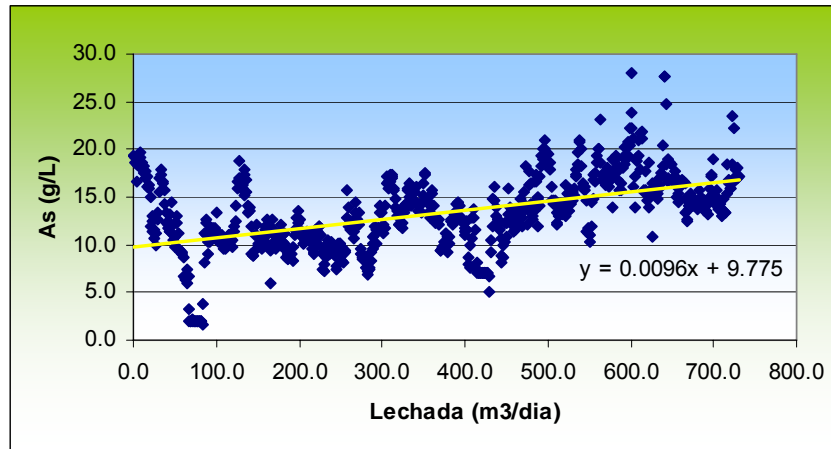
Queque Húmedo previo a  
proceso de Calcinación en  
Horno Harrop



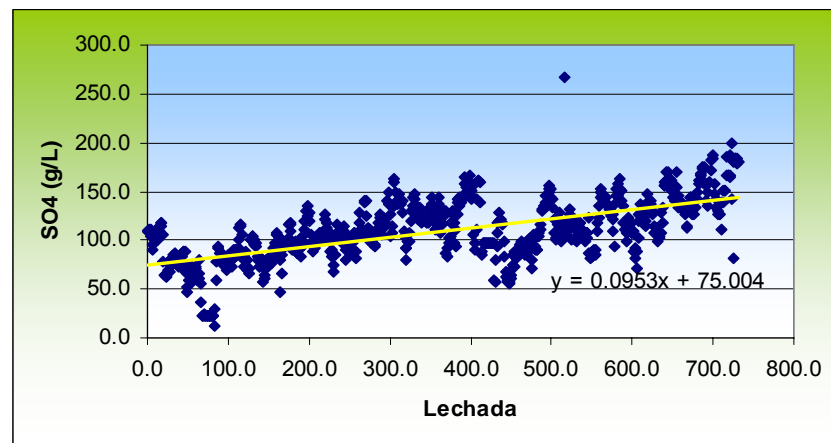
Crisoles con sólidos calcinados

## Anexo 2 Ajustes realizados al Modelo de la PTE 2

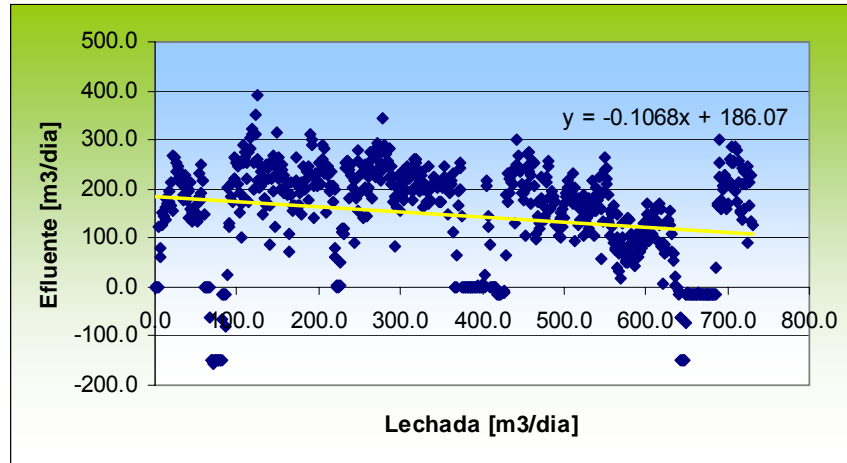
- Relación entre el Flujo de Lechada adicionado diario, respecto de la concentración de arsénico que ingresa a la Planta



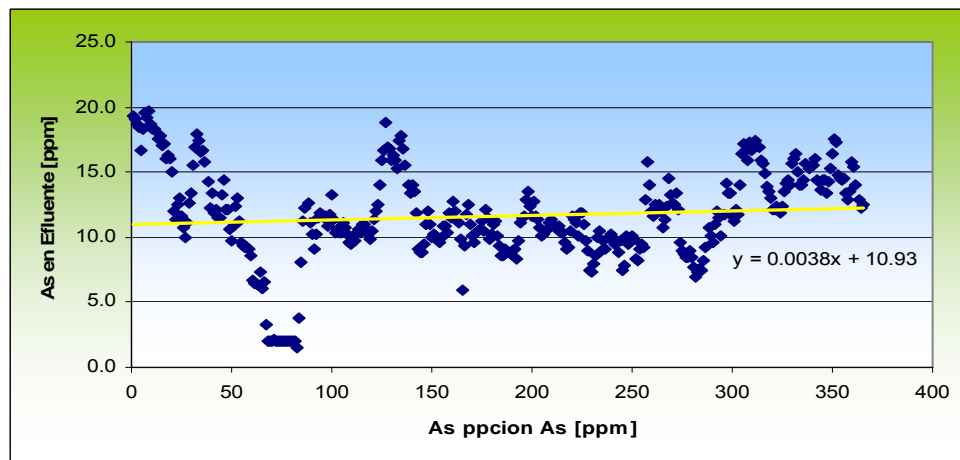
- Relación entre el Flujo de Lechada diario adicionado respecto de la concentración de Sulfato que ingresa a la Planta



- Relación entre el Flujo de Lechada diario adicionado respecto del Flujo diario de efluente de la PLG2



- Relación entre la concentración de arsénico en el efluente de la PLG respecto de la concentración en la etapa de precipitación de Arsenico





## Anexo 3 Descripción de Equipos Principales de la PTE 2

### Estanque Colector de Efluentes



Características	
Material	FRP
Capacidad	260 [m <sup>3</sup> ]
Altura	7.6 m
Diámetro	6.6 m

### Estanque de Neutralización



Características	
Material	FRP
Capacidad	38.8 [m <sup>3</sup> ]
Altura	4m
Diámetro	3.5

Estanque de Precipitación



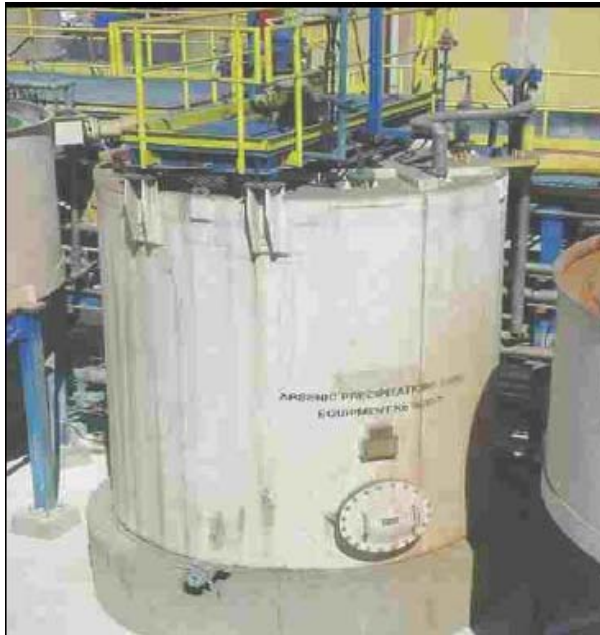
Características	
Material	FRP
Capacidad	38.5 [m <sup>3</sup> ]
Altura	4 [m]
Diámetro	3.5 [m]

Espesador Primario



Características	
Material	
Capacidad	30.4 [m <sup>3</sup> ]
Altura	2 [m]
Diámetro	4.4 [m]

Estanque de Precipitación de Arsénico



Características	
Material	FRP
Capacidad	38.8 [m <sup>3</sup> ]
Altura	2 [m]
Diámetro	3.5 [m]

Espesador Secundario



Características	
Material	
Capacidad	39.3 [m <sup>3</sup> ]
Altura	2 [m]
Diámetro	5 [m]

Estanque de Efluente Neutralizado



Características	
Material	FRP
Capacidad	39.3 [m <sup>3</sup> ]
Altura	4 [m]
Diámetro	3.5 [m]

Estanque de Lodos



Características	
Material	FRP
Capacidad	24.7 [m <sup>3</sup> ]
Altura	3.5 [m]
Diámetro	3 [m]

Estanque Mezclador de Sulfato Férrico



Características	
Material	FRP
Capacidad	16 [m <sup>3</sup> ]
Altura	3 [m]
Diámetro	2.6 [m]

Filtro Larox



Características	
Área Filtro	25.2 [m <sup>2</sup> ]
Largo	4.2 [m]
Alto	4.1 [m]
Ancho	3.8 [m]

Secador-Calcinador



Características	
Material	Acero Carbono, Ladrillos refractarios
Volumen	110 [m <sup>3</sup> ]
Largo	24.4 [m]
Diámetro	2.4 [m]

Ciclón



Características	
Material	Acero Carbono,
Capacidad	17.2 [kg/h]

Filtro de Mangas



Características	
Material	Acero Carbono
Capacidad	17.0 [kg/h]

Chimenea



Características	
Material	Acero Carbono
Diámetro	1.2 [m]
Altura	17.5 [m]

## **Anexo 4 Cotizaciones**

### **Estanques**

#### a) Estanque de Homogenización

Empresa: "Dinatex"

Fono: 204 86 13

Pioneer Water Tanks de Australia son estanques prefabricados, constituidos básicamente por el manto en planchas de acero carbono galvanizado o poliéster al horno, todas las planchas son apernadas entre sí. Interiormente lleva un liner de PVC. Además llevan techo y boquillas.

- Precio Ex-Fábrica: AUD\$154.000 ex fábrica. (1US\$= 1.22 AUD\$)
- Flete : Australia- Chile: 5200 \$AUD
- Estanque Pioneer, modelo XL110/05, diametro 17.38m por 6.35m de alto
- Armado en Chile por cuenta de Dinatex a un costo aprox. de \$5.000.000 pesos +iva

#### b) Estanques de Precipitación

Empresa: "Hefiberglass"

Fono: 623 0173

##### 1.- Descripción del trabajo

Fabricación, suministro y entrega en nuestra planta, sobre camión de 3 estanques de FRP de las siguientes dimensiones:

Se considera la fabricación en dos secciones para ser ensamblados en terreno.

Manto - Tapa

Manto – Fondo



## 2.- Especificaciones técnicas

Los estanques serán fabricados en lo que se refiere a su geometría, dimensiones y partes interiores de acuerdo a los planos de fabricación que se elaboren. Para el cálculo del espesor estructural del manto del estanque se ha considerado lo siguiente:

- Zona Sísmica 2 según Norma Chilena 2369 Of 2003
- Factor de Importancia 1
- Peso específico del contenido 1.1

El método de fabricación para el manto será Ortho Winding, la tapa y el fondo será por Moldeo Manual. La barrera química será de 2.5 mm de espesor para todas las partes componentes del equipo.

### 2.1 Materias Primas

Las materias primas utilizadas en la fabricación de los Estanques y sus fittings, serán las siguientes:

#### **FRP**

- Velo de superficie de vidrio tipo C de 35 gr./m<sup>2</sup>
- Fibras multidireccionales de 450 gr/m<sup>2</sup>
- Fibras unidireccionales de 520 gr/m<sup>2</sup>
- Tejidos bidireccionales de 800 gr/m<sup>2</sup>
- Fibras continuas Roving de 2.200 Tex
- Resina vinilester estándar
- Catalizadores
- Acelerantes

## 3.-Control de calidad

La calidad de fabricación de los equipos ofertados será certificada por nuestro departamento de calidad que realizará los controles que a continuación se detallan:

- Certificación de materias primas (resinas, vidrios)

- Medición de espesores
- Medición de dureza Barcol
- Test de acetona
- Inspección visual
- Control dimensional
- Contenido de vidrio

Para la ejecución de estos controles nuestra Empresa posee un laboratorio de control calidad con los equipos necesarios para su verificación.

#### 4.- Precios

Precio por cada Estanque: \$ 13.830.000 + IVA

Precio por cada ensamblaje: \$ 1.870.000 + IVA

#### 5.- Programa de entrega

Las estimaciones de plazos son las siguientes:

- Planos de fabricación y memorias de cálculo: 2 semanas de recibida la Orden de Compra
- Fabricación de equipos : 6 semanas de aprobados los planos

### **Microfiltro**

Empresa: "Reptek LTDA".

Teléfono: 235 9951

Los filtros Ultraflomem son filtros de membrana de PTFE, plegado que ofrece la máxima garantía de prestaciones de filtración y gama de resistencia contra productos químicos en condiciones severas de proceso. El elemento filtrante se fabrica exclusivamente de teflón y propileno. El grado de retención se extiende desde 0.1 [µm] hasta 1 [µm] (para gases, por debajo 0.01 [µm]). Este medio filtrante de

teflón es inherentemente hidrofóbico con una membrana de estructura altamente porosa. Esto asegura altos caudales, y una alta absorción de partículas.

El cuerpo del filtro es de acero inoxidable, y tiene un diseño tubular, que impide la corrosión del fluido utilizado.

El valor de cada uno es: US\$ 60.000

### **Hidrociclón**

Empresa: "Javi"

Fono: 546 32 27

El material del Hidrociclón es de acero al carbono con un recubrimiento de pintura poliéster de aplicación electroestática, previo proceso de granallado.

Valor de cada uno: \$ 700.000 (US \$1320)

### **Filtro banda**

Empresa: "Delkor"

Fono: 650 4700

Precio: US \$ 400.000

El valor de este es del orden de los US\$ 285.000 + US\$ 115.000 en auxiliares (filtrate receivers, manifold de vacío, 2 bombas de vacío). Valores Ex Works.

### **Intercambiador de calor**

Empresa: "Soltex"

Fono: 730 4700

Precio: US \$ 50.000

Intercambiador de calor de tubo y carcasa, para enfriamiento de una recirculación con un pH bajo. El material apropiado para este requerimiento es acero inoxidable.

### **Agitadores**

Empresa: "Alfa Delta"

Fono: 204 9555

País de adquisición USA

Puerto de embarque: Dayton, Ohio

Descripción de cada agitador:

- Agitador de alta eficiencia para Estanques de Precipitación de yeso, marca Chemineer, Modelo 1-GTD-3 con impulsor SC3, construido en acero inoxidable 316. El motor tiene una potencia de 2.24 kW, velocidad 1000 RPM, voltaje 220/380 V, frecuencia 50 HZ, eficiencia estándar, Temperatura ambiente máxima 40 °C.. El eje cuenta con una diámetro de 51 mm, y una extensión de 4509 mm, el impulsor cuenta con un diámetro de 1626 mm Montaje característico para el agitador

Precio del agitador por unidad: US\$ 9.478

- Agitador de alta eficiencia para Estanque de Homogenización del Efluente Ácido, marca Chemineer, Modelo 7HTD-20 con impulsor HE3, construido en acero inoxidable 316. El motor tiene una potencia de 14.91 kW, velocidad 1500 RPM, voltaje 220/380 V, frecuencia 50 HZ, eficiencia estándar, Temperatura ambiente máxima 40 °C.El eje cuenta con un diámetro de 102 mm, y una extensión de 3962 mm, el impulsor cuenta con un diámetro de 3861 mm Montaje característico para el agitador

Precio del agitador por unidad: US\$ 59.978

### **Bombas**

Empresa: "Flow serve"

Fono: 236 1455

Las bombas centrifugas tienen los siguientes precios:

Bomba 1: US\$ 4534

Bomba 2: US\$ 4546

Bomba 3:US\$ 4321

## Anexo 5: Resumen Balances de Masa y Energía

### A.5.1 Balance de Masa Etapa de Neutralización PTE 2

Número de corriente		F <sub>600</sub>	F <sub>602</sub>	F <sub>603</sub>	F <sub>606</sub>
Descripción		Alimentación de Lechada de Cal	Lechada a Estanque Precipitación	Lechada a Estanque Precipitación	Lechada a Estanque de Lodos
Flujo	m <sup>3</sup> /h	6.3	5.8	0.4	3.0
	kg/h	6788.0	6256.0	434.0	3258.0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1085.0	1085.0	1085.0	1085.0
PH		12.0	11.5	11.5	12.0
Temperatura	°C	40.0	40.0	40.0	40
Sólidos %		20.0	19.8	23.3	18.4
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	200.0	200.0	200.0	200.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	17.0	15.0	53.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Solución %		80.0	80.2	76.7	81.6
As	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	114.1	114.1	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Agua	kg/h	5432.0	5019.0	333.0	2657.0

Número de corriente		F <sub>618</sub>	F <sub>619</sub>	F <sub>620</sub>	F <sub>622</sub>
Descripción		Líquido filtrado	Acido débil desde Stripper	Efluente Ácido a Neutralización	Ef. Neutralizado a Precipitación
Flujo	m3/h	4.7	10.3	10.3	107.8
	kg/h	4662.0	10805.0	10805.0	114790.6
Densidad	Kg/m3	1000.0	1048.0	1049.0	1064.9
PH		12.0	-0.2	-0.2	10.5
Temperatura	°C	30.0	47.0	47.0	50.0
<b>Sólidos %</b>		<b>0.0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>13.3</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	-0.1
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0	106.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	15.5
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.6
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.8
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	1.3
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.2
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	1.5
Polvos o Inertes	g/l	0.0	16.0	16.0	15.4
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	11.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	2.9
<b>Solución %</b>		<b>100.0</b>	<b>98.5</b>	<b>98.5</b>	<b>86.7</b>
As	ppm	5.8	12668.0	12680.1	1217.1
HAsO <sub>2</sub>	ppm	5.4	17756.6	17773.5	1703.4
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	3.9	641.7	642.4	65.1
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	2457.9	2460.2	235.5
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.7	3841.3	3844.9	368.1
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	4226.3	4230.3	404.7
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	80.0	80.0	0.0
Agua	kg/h	4662.0	9512.0	9514.0	99266.0

Número de corriente		F <sub>623</sub>	F <sub>624</sub>	F <sub>625</sub>	F <sub>626</sub>
Descripción		Reciclo a Neutralización	Descarga Estanque de Precipitación	Alimentación a Espesador Primario	Descarga de Espesador Primario
Flujo	m3/h	97.3	16.2	16.8	5.9
	kg/h	103985.8	17331.0	17880.4	7239.1
Densidad	kg/m3	1068.7	1068.7	1067.2	1231.0
PH		11.5	11.5	11.5	11.5
Temperatura	°C	50.0	65.0	65.0	60°
<b>Sólidos %</b>		<b>13.7</b>	<b>15.0</b>	<b>14.2</b>	<b>35.0</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	6.3	16.3	15.8	44.9
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	102.5	102.5	99.2	282.5
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	17.1	17.1	16.6	47.3
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.7	0.7	0.7	1.9
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.9	0.9	0.9	2.5
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	1.5	1.5	1.4	4.1
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.2	0.2	0.2	0.6
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	1.7	1.7	1.6	4.6
Polvos o Inertes	g/l	15.4	15.4	14.9	42.4
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	12.2	12.2	11.8	33.7
Floculante	ppm	3.2	3.2	3.3	9.5
<b>Solución %</b>		<b>86.3</b>	<b>85.0</b>	<b>85.8</b>	<b>65.0</b>
As	ppm	6.1	6.1	5.9	6.1
HAsO <sub>2</sub>	ppm	5.7	5.7	5.5	5.7
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	4.1	4.1	3.9	4.1
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.5	0.5	0.5
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.7	0.7	0.7	0.7
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.5	0.5	0.5
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	114.1	114.1	110.4	114.8
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
AGUA	kg/h	89740.3	14737.1	15344.7	4704.6

Número de corriente		F <sub>627</sub>	F <sub>628</sub>	F <sub>629</sub>	F <sub>630</sub>
Descripción		Overflow Espesador Primario	Descarga Estanque Precipitación As	Alimentación Espesador Secundario	Descarga Espesador Secundario
Flujo	m3/h	10.6	15.8	15.9	0.3
	kg/h	10641.3	15755.3	15919.4	270.1
Densidad	kg/m3	1000.0	1000.0	1000.0	1033.0
PH		11.5	9.0	9.0	8.3
Temperatura	°C	60.0	55.5	55.0	40.0
<b>Sólidos %</b>			<b>1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>60.7</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	10.4	10.3	626.6
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.0	1.3	1.3	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	12.6	12.4	757.4
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.1	3.3
<b>Solución %</b>		<b>100.0</b>	<b>99.0</b>	<b>99.0</b>	<b>39.3</b>
As	ppm	5.9	0.9	0.8	0.5
HAsO <sub>2</sub>	ppm	5.5	0.8	0.8	0.7
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	3.9	0.6	0.6	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.4	0.4	0.3
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.7	0.7	0.7	0.3
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.5	0.5	0.5
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	110.4	0.4	0.4	0.1
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	189.7	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
AGUA	kg/h	10640.0	15173.4	15755.3	106.1



Número de corriente		F <sub>631</sub>	F <sub>632</sub>	F <sub>633</sub>	F <sub>634</sub>
Descripción		Overflow Espesador Secundario	Efluente Final	Alimentación a Filtro	Queque Húmedo a Calcinación
Flujo	m3/h	15.6	15.6	6.4	2.2
	kg/h	15649.2	15649.2	7769.5	3107.8
Densidad	kg/m3	1000.0	1000.0	1212.1	1400.0
PH			7.0		
Temperatura	°C	50.0	50.0	50.0	30.0
<b>Sólidos %</b>		<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>35.8</b>	<b>89.4</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	52.4	151.4
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	259.2	748.4
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0		45.5	131.3
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	1.7	4.9
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	2.9	8.4
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	4.7	13.6
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.7	2.1
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	4.2	12.1
Polvos o Inertes	g/l	1.3	1.3	62.2	179.6
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	30.9	89.2
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	
<b>Solución %</b>		<b>99.9</b>	<b>99.9</b>	<b>64.2</b>	<b>10.6</b>
As	ppm	0.9	0.9	5.6	4.1
HAsO <sub>2</sub>	ppm	0.8	0.8	5.2	3.8
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	0.6	0.6	3.8	2.7
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.4	0.4	0.4	0.3
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.7	0.7	0.7	0.5
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.5	0.5	0.4
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.4	0.0	0.0	0.0
		0.0			
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm		0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
AGUA	kg/h	15628.1	15628.1	4990.0	328.4

Número de corriente		F <sub>635</sub>	F <sub>636</sub>	F <sub>637</sub>
Descripción		Líquido Filtrado a Estanque	Ácido Sulf a Precipitación de As	Ácido a Estanque Efluente Neutralizado
Flujo	m3/h	4.7	0.1	0.0
	kg/h	4661.7	94.7	0.0
Densidad	kg/m3	1000.0	1049.2	1049.0
PH		11.7		
Temperatura	°C	30.0	40.0	40.0
<b>Sólidos %</b>		<b>0.0</b>		
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.0	0.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0
<b>Solución %</b>		<b>100.0</b>		<b>100.0</b>
As	ppm	5.8	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	ppm	5.4	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	3.9	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.7	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.5	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	1033.5	1033.3
AGUA	kg/h	4661.6	1.4	0.0

Número de corriente		F <sub>643</sub>	F <sub>647</sub>	F <sub>653</sub>
Descripción		Floculante a Esp. Primario	Floculante a Esp. Secundario	Alimentación de Sulfato Férrico
Flujo	m <sup>3</sup> /h	0.5	0.2	0.0
	kg/h	549.4	164.0	24.6
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000.0	1000.0	1032.6
PH				
Temperatura	°C	25.0	25.0	25.0
Sólidos %		0.0	0.0	
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.0	0.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	250.0	250.0	0.0
Solución %		100.0	100.0	100.0
As	ppm	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	94110.2
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0
AGUA	kg/h	549	164	22

## A.5.2 Balance de Masa Etapa de Calcinación PTE 2

Numero de corriente		F <sub>634</sub>	F <sub>662</sub>	F <sub>663</sub>	F <sub>665</sub>
Descripción		Queque Húmedo a Calcinación	Alimentación Calcinador	Producto Calcinado	Gases Calcinación a Ciclón
Flujo	m <sup>3</sup> /h	2.2	2.2	2.7	8785.6
	kg/h	3107.8	3107.8	1843.7	5622.8
	TPD	74.6	74.6	44.2	134.9
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1400.0	1400.0	679.5	0.6
Temperatura	C	30	30	800	180
Sólidos %		79.9	79.9	100.0	8.2
Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	336.2	336.2	0.0	0.0
CaO	kg/h	0.0	0.0	179.0	44.7
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	kg/h	1661.4	1661.4	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	291.5	291.5	50.3	12.6
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	10.9	10.9	0.8	0.2
Fe(OH) <sub>2</sub>	kg/h	18.7	18.7	15.0	3.7
Cu(OH) <sub>2</sub>	kg/h	30.3	30.3	24.2	6.1
PbSO <sub>4</sub>	kg/h	4.8	4.8	3.8	1.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	kg/h	26.8	26.8	21.5	5.4
Polvos	kg/h	398.7	398.7	318.9	79.7
FeAsO <sub>4</sub>	kg/h	0.3	0.3	0.2	0.1
Floculante	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub>	kg/h	249.2	0.0	1051.2	262.8
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	kg/h	29.9	0.0	232.9	58.2
Agua	kg/h	624.6	624.6	0.0	1176.8

Número de corriente		F <sub>666</sub>	A	B	F <sub>667</sub>
Descripción		Ciclón a Filtro Manga	Descarga de Ciclón Est Lodos	Descarga Manga Est Lodos	Aire Descargado Filtro Manga
Flujo	m <sup>3</sup> /h	7134.2	568.3	63.1	7071.1
	kg/h	5208.0	414.8	46.1	5161.9
Densidad	TPD	125.0	10.0	1.1	123.9
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	0.7	0.7	0.7	0.7
Temperatura	C	120	120	120	120
Sólidos %		0.3	30.4	30.4	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	kg/h	4.5	40.3	4.5	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	1.3	11.3	1.3	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	0.2	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.4	3.4	0.4	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.6	5.4	0.6	0.0
PbSO <sub>4</sub>	kg/h	0.1	0.9	0.1	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.5	4.8	0.5	0.0
Polvos	kg/h	8.0	71.8	8.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	kg/h	0.0			
CaSO <sub>4</sub>	kg/h	26.3	236.5	26.3	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	kg/h	5.8	52.4	5.8	0.0
Agua	kg/h	1176.8	0.0	0.0	1176.8

Número de corriente		F <sub>668</sub>	F <sub>669</sub>	F <sub>670</sub>	F <sub>671</sub>
Descripción		Aire a Chimenea	Polvos de Calcinación	Alimentación Combustible	Aire a Calcinador
Flujo	m <sup>3</sup> /h	7071.1	0.8	0.2	4331.8
	kg/h	5161.9	530.4	147.3	4115.2
	TPD	123.9	12.7	3.5	98.8
Densidad	kg/m <sup>3</sup>		679.5	840.0	1.0
Temperatura	C	120	120	30.5	30.5
<b>Sólidos %</b>			<b>44.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	kg/h	0.0	71.9	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	13.4	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	3.7	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	6.1	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	kg/h	0.0	1.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	6.7	0.0	0.0
Polvos	kg/h	0.0	149.5	0.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub>	kg/h	0.0	249.2	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	kg/h	0.0	29.9	0.0	0.0
Agua	kg/h	0.0	0.0	0.0	0.0

## A.5.3 Balance de Energía Neutralización PTE 2

Número de corriente		F <sub>600</sub>	F <sub>602</sub>	F <sub>603</sub>	F <sub>606</sub>
Descripción		Alimentación de Lechada de Cal	Lechada a Estanque Precipitación	Lechada a Estanque Precipitación As	Lechada a Estanque Lodos
Flujo	m <sup>3</sup> /h	6.3	5.8	0.4	3.0
	kg/h	6788.1	6256.0	434.0	3257.6
Temperatura	C	40.0	40.0	40.0	40.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-4049.0	-3729.4	-258.6	-1943.1
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	Mcal/h	-381.6	-305.3	-76.3	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	-1.6	-0.1	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
AGUA	Mcal/h	-20532.8	-4609.8	-1258.8	-10044.6
<b>Entalpía Corriente</b>	<b>Mcal/h</b>	<b>-24963.4</b>	<b>-8646.1</b>	<b>-1593.8</b>	<b>-11987.7</b>

Número de corriente		F <sub>618</sub>	F <sub>619</sub>	F <sub>620</sub>	F <sub>622</sub>
Descripción		Líquido filtrado a Estanque As	Ácido débil desde Stripper	Efluente Ácido a Neutralización	Ef. Neutralizado a Est. Precipitación
Flujo	m3/h	4.7	10.3	10.3	107.8
	kg/h	4661.7	10804.9	10804.9	114790.6
Temperatura	C	30.0	47.0	47.0	50.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	35.9
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-32086.7
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-3037.7
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-141.7
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-136.8
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-158.3
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-0.1	-16.7
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-247.8
Polvos o Inertes	Mcal/h	0.0	-597.9	-597.9	-6015.3
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	-1.3
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	-298.0	-298.0	-298.9
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-9.7	-9.7	-10.3
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-39.9	-39.9	-39.9
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-49.9	-49936.6	-50.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-68.4	-68.4	-68.5
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-1829.4	-1829.4	0.0
AGUA	Mcal/h	-17668.9	-35890.3	-35899.8	-374261.7
Entalpía Corriente	Mcal/h	-17669.0	-38783.6	-88679.8	-416535.9



Número de corriente		F <sub>623</sub>	F <sub>624</sub>	F <sub>625</sub>	F <sub>626</sub>
Descripción		Descarga Estanque Precipitación	Descarga Estanque Precipitación	Alimentación a Esp. Primario	Descarga Esp. Primario
Flujo	m3/h	97.3	16.2	16.8	5.9
	kg/h	103985.8	11.5	11.5	11.5
Temperatura	C	50.0	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-1986.3	-858.1	-858.1	-858.1
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	-28003.8	-4688.8	-4688.8	-4688.8
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-3037.7	-507.3	-507.3	-507.3
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-141.7	-23.6	-23.6	-23.6
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-136.8	-23.0	-23.0	-23.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-158.3	-26.6	-26.6	-26.6
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	-16.7	-2.8	-2.8	-2.8
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-247.8	-41.5	-41.5	-41.5
Polvos o Inertes	Mcal/h	-5417.5	-905.1	-905.1	-905.1
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	-1.3	-0.2	-0.2	-0.2
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	-0.9	-0.1	-0.1	-0.1
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	-0.6	-0.1	-0.1	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	-0.1	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	-0.1	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	-0.1	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-27.3	-4.6	-4.6	-1.7
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	-2.0	-0.3	0.0	-0.1
AGUA	Mcal/h	-338347.1	-56299.8	-58620.7	-17972.8
Entalpía Corriente	Mcal/h	-377526.0	-63382.1	-65702.7	-25051.9

Número de corriente		F <sub>627</sub>	F <sub>628</sub>	F <sub>629</sub>	F <sub>630</sub>
Descripción		Overflow Espesador Primario	Descarga Est. Precipitación As	Alimentación Esp. Secundario	Descarga Esp. Secundario
Flujo	m <sup>3</sup> /h	10.6	15.8	15.9	0.3
	kg/h	10641.3	15755.3	15919.4	270.1
Temperatura	C	60.0	55.0	55.0	40.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	-460.1	-460.1	-460.7
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	Mcal/h	0.0	-76.3	-76.3	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-0.2	-0.2	-0.2
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	-0.1	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	-0.1	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	-2.9	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	-3.1	-4.6	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-0.3	0.0	0.0
AGUA	Mcal/h	-40009.6	-57132.5	-59323.2	-401.0
Entalpía Corriente	Mcal/h	-40015.8	-57674.0	-59859.8	-861.9

Número de corriente		F <sub>631</sub>	F <sub>632</sub>	F <sub>633</sub>	F <sub>634</sub>
Descripción		Overflow Esp. Secundario	Efluente Final	Alimentación a Filtro	Queque Húmedo a Calcinación
Flujo	m <sup>3</sup> /h	15.6	15.6	6.4	2.2
	kg/h	15649.2	15649.2	7769.5	3107.8
Temperatura	C	50.0	50.0	50.0	30.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-1086.9	-1088.8
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	0.0	-4667.3	-4675.9
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-530.6	-531.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-23.6	-23.6
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-28.5	-28.6
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-33.0	-33.1
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-3.5	-3.5
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-41.3	-41.4
Polvos o Inertes	Mcal/h	-76.3	-76.3	-1444.7	-1446.1
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-0.2	-0.2
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-0.1	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0	0.0
AGUA	Mcal/h	-58922.6	-58922.7	-18813.8	-1244.6
Entalpía Corriente	Mcal/h	-58999.0	-58999.1	-26673.5	-9116.9

Número de corriente		F <sub>635</sub>	F <sub>636</sub>	F <sub>637</sub>
Descripción		Líquido Filtrado a Estanque	Ácido Sulfúrico a Precipitación As	Ácido a Estanque Neutralizado
Flujo	m <sup>3</sup> /h	4.7	0.1	0.0
	kg/h	4661.7	94.7	0.0
Temperatura	C	30.0	40.0	40.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	-206.4	0.0
AGUA	Mcal/h	-17668.9	-5.4	0.0
<b>Entalpía Corriente</b>	<b>Mcal/h</b>	<b>-17669.0</b>	<b>-211.8</b>	<b>0.0</b>

Número de corriente		F <sub>643</sub>	F <sub>647</sub>	F <sub>653</sub>
Descripción		Floculante a Esp. Primario	Floculante a Esp. Secundario	Alimentación de Sulfato férrico
Flujo	m <sup>3</sup> /h	0.5	0.2	0.0
	kg/h	549.4	164.0	24.6
Temperatura	C	25.0	25.0	25.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
FeAsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Floculante	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
HAsO <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
CuSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	-3796.1
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Mcal/h	0.0	0.0	0.0
AGUA	Mcal/h	-2084.7	-622.4	-85.0
<b>Entalpía Corriente</b>	<b>Mcal/h</b>	<b>-2084.7</b>	<b>-622.4</b>	<b>-3881.1</b>

## A.5.4 Balances de Masa Etapa de Precipitación de Yeso

Número de corriente		F <sub>101</sub>	F <sub>102</sub>	F <sub>103</sub>	F <sub>105</sub>
Descripción		Efluente PLG 1	Efluente PLG 2	Entrada a Microfiltración	Salida Microfiltro a Plantas
Flujo	m <sup>3</sup> /h	10.6	8.6	19.2	0.1
	kg/h	11108.8	9012.8	20121.6	53.0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1048.0	1048.0	1048.0	1000.0
PH		0.0	-0.3	-0.1	
Sólidos %		0.1	0.4	0.2	
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.1	0.4	0.2	4.1
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	1.2	3.7	2.3	40.1
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Solución %		99.9	99.6	99.8	
As	ppm	10100.0	11500.0	10727.1	0.0
HAsO <sub>2</sub>	ppm	14531.0	16552.5	15436.5	0.0
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	19.8	12.9	16.7	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	535.6	2457.9	1396.6	0.0
CuSO <sub>4</sub>	ppm	2744.1	3841.3	3235.5	0.0
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	1051.5	4226.3	2473.5	0.0
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	45.8	96.7	68.6	0.0
AGUA	kg/h	10408.9	7911.3	18320.2	0.0

Número de corriente		F <sub>104</sub>	F <sub>106</sub>	F <sub>107</sub>	F <sub>108</sub>
Descripción		Salida Microf. a ppcion yeso	Cal a Ppción yeso	Descarga desde Ppción yeso	Recirculación intercambiador
Flujo	m3/h	19.2	5.3	28.1	3.8
	kg/h	20077.4	5784.3	29877.2	4015.5
Densidad	kg/m3	1048.0	1085.0	1064.0	1064.0
PH		-0.1	11.5	1.1	1.5
<b>Sólidos %</b>		<b>0.0</b>	<b>13.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.7</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	143.1	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	71.2	60.2
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.2	0.0	0.2	0.2
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Solución %</b>		<b>100.0</b>	<b>86.8</b>	<b>93.3</b>	<b>94.3</b>
As	ppm	10750.7	0.0	12872.5	10914.8
HAsO <sub>2</sub>	ppm	15470.4	0.0	18523.8	15706.6
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	16.8	0.0	20.1	17.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	1399.7	0.0	1676.0	1421.1
CuSO <sub>4</sub>	ppm	3242.7	0.0	3882.6	3292.2
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	2479.0	0.0	2968.3	2516.8
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	114.1	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	58.4	0.0	4.0	1.5
AGUA	kg/h	18518.4	5020.7	26998.7	3694.7

Número de corriente		F <sub>109</sub>	F <sub>110</sub>	F <sub>118</sub>	F <sub>111</sub>
Descripción		Recirculación Hidrociclón	Descarga Hidrociclón	Agua de Lavado	Masa yeso (kg/h)
Flujo	m <sup>3</sup> /h	3.8	24.3	1.3	
	kg/h	4015.5	25861.7	1293.1	2239.0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1064.0	1064.0	1000.0	
PH			1.1		
Sólidos %		5.7	6.9		kg/h
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	60.2	72.9	0.0	1771.5
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.2	0.2	0.0	0.2
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Solución %		94.3	93.1		kg/h
As	ppm	10914.8	13176.5	0.0	0.4
HAsO <sub>2</sub>	ppm	15706.6	18961.2	0.0	0.6
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	17.0	20.5	0.0	0.0
FeSO <sub>4</sub>	ppm	1421.1	1715.5	0.0	0.1
CuSO <sub>4</sub>	ppm	3292.2	3974.3	0.0	0.1
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	2516.8	3038.3	0.0	0.1
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	1.5	4.3	0.0	0.0
AGUA	kg/h	3694.7	23304.1	1293.1	466.1



Número de corriente		F <sub>112</sub>	F <sub>113</sub>	F <sub>114</sub>	F <sub>115</sub>
Descripción		Líquido Filtrado	Efluentes a Plantas	Entrada Efluentes PTE 1	Entrada Efluentes PTE 2
Flujo	m3/h	24.7	24.7	12.1	12.1
	kg/h	24915.8	24915.8	12457.9	12457.9
Densidad	kg/m3	1010.0	1010.0	1030.0	1030.0
PH			0.6	0.6	0.6
<b>Sólidos %</b>		<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca(AsO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *Ca(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
PbSO <sub>4</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn(OH) <sub>2</sub>	g/l	0.0	0.0	0.0	0.0
Polvos o Inertes	g/l	0.2	0.3	0.3	0.3
FeAsO <sub>4</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Floculante	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Solución %</b>		<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
As	ppm	12967.0	12939.2	12939.2	12939.2
HAsO <sub>2</sub>	ppm	18659.8	18619.8	18619.8	18619.8
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	ppm	20.2	20.2	20.2	20.2
FeSO <sub>4</sub>	ppm	1688.3	1684.6	1684.6	1684.6
CuSO <sub>4</sub>	ppm	3911.2	3902.8	3902.8	3902.8
ZnSO <sub>4</sub>	ppm	2990.1	2983.6	2983.6	2983.6
Ca(OH) <sub>2</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	ppm	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	4.3	12.2	12.2	12.2
AGUA	kg/h	24131.1	23931.4	11976.3	11976.3