



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Instituto de Metalurgia

**Dosificación Automática de Reactivos en el
Proceso de Flotación**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE
MINERALES**

PRESENTA:

ING. LÁZARO ABNER HERNÁNDEZ REYES

ASESORADO POR

DR. CESAR ALBERTO SOSA BLANCO



Proyecto financiado por el Centro de Investigación y Desarrollo
Tecnológico de Servicios Industriales Peñoles y el Consejo Nacional de
Ciencia y Tecnología n° de beca 158135.

Julio de 2002



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Instituto de Metalurgia

**Dosificación Automática de Reactivos en el
Proceso de Flotación**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE
MINERALES**

PRESENTA:

ING. LÁZARO ABNER HERNÁNDEZ REYES

SINODALES

DR. CESAR ALBERTO SOSA BLANCO _____

DR. ALEJANDRO LÓPEZ VALDIVIESO _____

M.C. JESUS NAVARRO CONTRERAS _____



Agradecimientos

Ala unidad minera Tizapa por la disposición y las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Servicios Industriales Peñoles, por el financiamiento y la asesoría proporcionadas.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico.

Al Dr. Cesar Alberto Sosa Blanco, por el apoyo que me brindó a cada paso durante la realización de este proyecto y principalmente por su amistad.

A mis amigos que me apoyaron a cada momento durante la realización de este trabajo.

Muy especialmente a Marcos Hernández y Angelina Garfias por todo lo que han hecho por mi sin esperar nada a cambio.

A Reyna, por su apoyo incondicional y por darme el empujón que me hacía falta.

A mis padres.

Resumen

En este trabajo de investigación se utilizaron modelos empíricos obtenidos basándose en la experiencia de los operadores. Para lograr esto, se tomaron datos de dosificación del período de agosto 2000 a enero 2001. Estos datos se analizaron para obtener la tendencia en la dosificación de los operadores y en función de esto se obtuvieron los modelos de dosificación.

Cada uno de los modelos obtenidos es alimentado con el contenido metálico de la alimentación general y se obtiene la dosificación en g/ton para cada reactivo. Este dato se convierte a ml/min y posteriormente a mA mediante la ecuación de calibración de la bomba dosificadora.

Cada punto de adición tiene una bomba independiente. Por lo tanto, cada punto de adición tiene una ecuación de calibración diferente.

El modelo de dosificación de Xantato 350 para el banco agotativo 1 del circuito de Zn se calculó en función únicamente de la ley de Zn en la cola final debido a que para calcular el contenido de Zn en dicha corriente se necesita el flujo másico que no es medido.

Los modelos de dosificación se introducen al sistema mediante un programa de control de dosificación llamado CoReact. Este programa es la parte central del sistema de adición de reactivos. Este se encarga de manipular la información obtenida del pesómetro y del equipo de análisis en línea AMDEL. Además de calcular las dosificaciones mediante los modelos mencionados anteriormente, también se encarga de controlar las bombas dosificadoras y enviar información del proceso a un tablero luminoso.

El programa CoReact posee una interfaz gráfica para el usuario, la cual permite que los operadores manipulen la dosificación en cada uno de los puntos en el circuito. Existen tres posibles estados en el sistema para cada uno de los puntos de dosificación. El modo

manual, es aquel en el que el operador introduce manualmente la cantidad de reactivo a dosificar. El modo automático es cuando los modelos de dosificación calculan la cantidad de reactivo a dosificar. Por último, el modo deshabilitado, en el cual se detiene la dosificación del reactivo seleccionado.

El programa de control de dosificación aun sigue en evaluación, de modo que se siguen haciendo mejoras continuamente.

Glosario

Término	Definición
<i>ADAM</i>	PLC utilizado para el control de las bombas de dosificación de reactivos de flotación.
<i>Analizador AMDEL</i>	Equipo de análisis químico en línea mediante fluorescencia de rayos X.
<i>BDD AMDEL</i>	Programa que obtiene los ensayos devueltos por el equipo de análisis en línea AMDEL.
<i>Cabeza</i>	Mineral que se alimenta a la primera celda de un circuito de flotación.
<i>Canal</i>	Indica el número del puerto de salida de una señal analógica.
<i>CIDT</i>	Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico
<i>Cola</i>	Desechos del proceso de flotación
<i>Concentrado</i>	Producto del proceso de flotación
<i>CoReact</i>	(<i>Control de Reactivos</i>), programa que controla la dosificación de reactivos de modo manual o automático.
<i>EDX</i>	Dispersión de Rayos X.
<i>EM1000</i>	Módulo de conversión de una señal RS232 a TCP/IP
<i>Flotabilidad</i>	Rapidez de flotación. La flotabilidad se relaciona directamente con la recuperación
<i>Flotación</i>	Proceso de separación de minerales mediante reactivos químicos que hacen hidrofóbica la superficie de los minerales
<i>g/t</i>	Gramos por tonelada
<i>Grado del mineral</i>	Porcentaje que representa el contenido metálico en la muestra mineral
<i>Hardware</i>	Parte física de un dispositivo electrónico
<i>Internet</i>	Red mundial de servicios TCP/IP
<i>Intranet</i>	Cualquier red de área local que utilice los servicios TCP/IP

LAN	(<i>Local Area Network</i>), Red de Área Local para computadoras.
mA	Miliampers
Mb	Unidad de almacenamiento que representa 1,048,576 bytes, donde 1 byte representa un caracter.
MHz	Un millón de Hertz
ml/min	Mililitros por minuto
Módulo	Programa que pertenece a un conjunto de programas llamado suite. Cada módulo tiene una función específica.
PC	(<i>Personal Computer</i>), Computadora Personal.
Perturbación	Fenómeno que rompe el equilibrio de un proceso.
PID	(<i>Proportional Integral Diferencial</i>), Controlador Proporcional Integral Diferencial.
PLC	(<i>Programing Logic Controler</i>), Controlador Lógico Programable
Proy Adam	Módulo del programa CoReact que manda la señal de control hacia las bombas dosificadoras.
PSM	(<i>Particle Size Monitor</i>), Monitor de Tamaño de Partículas.
Pulpa	Compósito Agua más Mineral.
RAM	(<i>Read Only Memory</i>), Memoria de sólo lectura, Se conoce también como memoria principal.
Recuperación	Por ciento del metal de valor recuperado en el concentrado final.
RS-232	Puerto de comunicación serial de corto alcance con nueve hilos.
RS-482	Puerto de comunicación serial de largo alcance con dos hilos.
Set point	Punto de ajuste.
Slot	Ranura de conexión para una tarjeta de salida. Indica el número de la ranura donde se encuentra una tarjeta.
Software	Conjunto de programas que habilitan el uso de algunas funciones de la computadora.

<i>Suite</i>	Conjunto de programas que forman un mismo paquete de programación. por ejemplo: Microsoft Office.
<i>t/h</i>	Toneladas por hora.
<i>Tiempo de residencia</i>	Tiempo que tarda una partícula dentro de una celda de flotación o acondicionador.
<i>Tiempo de retardo</i>	Es el tiempo transcurrido desde que ocurre una perturbación hasta que el sistema de control reacciona.
<i>Top Down</i>	Ejecución secuencial de instrucciones.
<i>XRF</i>	Fluorescencia de Rayos X.

Tabla de contenido

Agradecimientos.	i
Resumen	ii
Glosario.	v
Tabla de contenido	viii
Lista de figuras.	xi
Lista de tablas.	xvii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Problemática.....	1
1.2. Objetivo.	3
1.3. Metodología.....	4
Capítulo 2. Descripción del proceso	5
2.1. Molienda	5
2.2. Flotación.....	7
2.2.1. Circuito de flotación Pb-Cu.....	8
2.2.2. Circuito de separación Pb-Cu.....	10
2.2.3. Circuito de flotación de Zn.....	11
2.3. Control de la adición de reactivos.	12
Capítulo 3. Antecedentes bibliográficos	14
3.1. Sistemas modernos de control.....	15
3.1.1. Desarrollos en la instrumentación.....	16
3.1.1.1. Analizadores en línea.....	18
3.1.1.2. Medidores de pH.....	19
3.1.1.3. Medidores de nivel.....	19
3.1.2. Desarrollos en el hardware de control.....	20

3.1.3. Desarrollos en las estrategias de control.....	22
3.2. El problema del control del proceso de flotación.....	24
3.3. Análisis de partículas en línea.....	27
3.4. Efecto de los reactivos sobre el grado y la recuperación.....	30
3.4.1. Efecto de los colectores en la flotación.....	31
3.4.2. Efecto del pH en la flotación.....	32
3.5. Control de la adición de reactivos de flotación.....	33
3.5.1. Control del grado y la recuperación en el proceso de flotación.....	37
3.5.2. Control de la recuperación económica.....	40
Capítulo 4. Desarrollo del sistema de control de dosificación de reactivos	42
4.1. Analizador de partículas en línea.....	42
4.2. Programa de control de reactivos.....	44
4.2.1. Módulo “BDD AMDEL”.....	46
4.2.2. Programa principal CoReact.....	46
4.2.3. Módulo “Servidor ADAM”.....	50
4.2.4. Módulo “Tablero”.....	51
4.2.5. Módulo “Captura”.....	51
4.2.6. Módulo “Consulta”.....	52
4.3. Hardware de control.....	52
4.4. Organización de las pantallas de control en el sistema de control de reactivos....	53
Capítulo 5. Recopilación y análisis de la información del proceso.....	55
5.1. Recopilación de los ensayos de laboratorio, las lecturas del analizador AMDEL y Las dosificaciones de reactivos del periodo de agosto de 2000 a enero 2001	55
5.2. Análisis de datos para determinar la exactitud de los ensayos del equipo AMDEL.	56
5.3. Muestreo del analizador AMDEL para determinar la confiabilidad de sus ensayos.	58
5.4. Calibración del analizador en línea AMDEL.....	59
Capítulo 6. Modelos de dosificación y calibración.....	61
6.1. Modelos de dosificación de reactivos.	61

6.1.1. Modelo de dosificación de CuSO_4 al 3r acondicionador del circuito de Zn.....	62
6.1.2. Modelos de dosificación de Xantato 350 en el circuito de Zn.....	64
6.1.3. Modelos de dosificación para la Aerofina 3418 en el circuito de Pb.....	69
6.2. Curvas de calibración de bombas dosificadoras.....	71
6.2.1. Curvas para bombas dosificadoras con solenoides.....	72
6.2.2. Curvas para bombas dosificadoras con motores.....	74
Capítulo 7. Conclusiones.....	76
Capítulo 8. Bibliografía.	78
Anexo I. Análisis estadístico de datos del proceso.....	80
Anexo II. Análisis estadístico de muestreo al equipo AMDEL.....	82
Anexo III. Gráficas de dosificación de Xantato 350 a los bancos primario 2 y agotativo del circuito de flotación de Zn.....	87
Anexo IV. Gráficas de dosificación de Aerofina 3418, promotor 404 y dextrina en el circuito de flotación Pb-Cu.....	89
Anexo V. Comparación del consumo de reactivos.....	97

Lista de figuras

<u>Titulo</u>	<u>Página</u>
Figura 1.1. Variaciones en el tonelaje de alimentación a molienda.	3
Figura 2.1. Circuito de molienda, minera Tizapa.....	6
Figura 2.2. Esquema de control para el circuito de molienda de minera Tizapa.	7
Figura 2.3. Esquema de control de nivel.	8
Figura 2.4. Diagrama del circuito de flotación Pb-Cu, minera Tizapa.....	9
Figura 2.5. Diagrama del circuito de separación Pb-Cu, minera Tizapa.....	10
Figura 2.6. Circuito de flotación de Zn, minera Tizapa.	11
Figura 3.1. Triángulo de control, que muestra las partes esenciales de un sistema de control moderno (Herbst y Pate, 1999).	16
Figura 3.2. Mejoras en el desempeño de varios niveles del control de flotación (Herbst y Pate, 1999).	21
Figura 3.3. Esquema de control de una celda de flotación donde dP significa celda de presión diferencial y PT transmisor de presión. (Kelly y Spottinwood, 1990).	25
Figura 3.4. Respuestas controladas y no controladas de las perturbaciones en la flotabilidad de minerales (Herbst y Pate,1999).	27

Figura 3.5. Esquema de análisis por fluorescencia de rayos X (Cooper, 1989).	30
Figura 3.6. Resultados de una prueba de flotación de Pb a nivel laboratorio. a) Gráfica de recuperación acumulativa. b) Curvas grado- recuperación para cada una de las dosificaciones de Xantato 350. Estas pruebas se llevaron a cabo con 50g/ton de Teutón 100 y 50g/ton de NaCN a pH 8.	31
Figura 3.7. esquema de adición de reactivos para el control de la recuperación del mineral de valor en un proceso de flotación. (Zaragoza, 1988).	38
Figura 3.8. Esquema de adición de reactivos para el control del grado en los concentrados del proceso de flotación. (Zaragoza, 1988).	39
Figura 3.9. Diagrama de control de la recuperación económica mediante el aumento del grado o la recuperación del producto (King 1973).	41
Figura 4.1. Cajones agitados y sonda del analizador de partículas en línea AMDEL.	43
Figura 4.2. Diagrama de relaciones lógicas en el sistema de control de adición de reactivos.	45
Figura 4.3. Diagrama lógico de funcionamiento del módulo CoReact . A la derecha se muestra la información que se intercambia entre los diferentes nódulos de este programa.	47
Figura 4.4. Pantalla de control de adición de reactivos para el circuito de flotación de Zn.	48
Figura 4.5. Pantalla de control de adición de reactivos para el circuito de flotación Pb-Cu.	53

Figura 6.10. Ecuaciones de calibración para las bombas de Xantato 350 a los bancos primario 2 y agotativo 1 del circuito de Zn.	73
Figura 6.11. Curva de calibración de la bombas de dosificación de CuSO_4 en circuito de Zn.	75
Figura III.1. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2 en función del contenido de Zn en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.	87
Figura III.2. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.	87
Figura III.3. Dosificación de Xantato 350 al banco Agotativo 1 en función del contenido de Zn en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.	88
Figura III.4. Dosificación de Xantato 350 al banco Agotativo 1 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.	88
Figura IV.1. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	89
Figura IV.2. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	89
Figura IV.3. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del	

contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	90
Figura IV.4. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	90
Figura IV.5. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	91
Figura IV.6. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	91
Figura IV.7. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	92
Figura IV.8. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	92
Figura IV.9. Dosificación de Promotor 404 al molino en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	93
Figura IV.10. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	93
Figura IV.11. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	94

Figura IV.12. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	94
Figura IV.13. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	95
Figura IV.14. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	95
Figura IV.15. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	96
Figura IV.16. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.	96

Lista de tablas

<u>Titulo</u>	<u>Página</u>
Tabla 2.1. Balance metalúrgico típico de la unidad minera Tizapa.	5
Tabla 2.2. Lazos de control en el circuito de molienda.	7
Tabla 2.3. Reactivos de flotación utilizados en el circuito de flotación Pb-Cu.	9
Tabla 2.4. Reactivos utilizados en el circuito de separación Pb-Cu.	10
Tabla 2.5. Lazos de control para el circuito de flotación de Zn.	12
Tabla 2.6. Reactivos de flotación utilizados en los circuitos de flotación y sus elementos de control.	12
Tabla 3.1. Sensores disponibles hasta 1999, (Herbst et al, 1999).	17
Tabla 3.2. Variables de importancia en el proceso de flotación de minerales (Herbst, Holsinger y Pate, 1992).....	18
Tabla 3.3. Analizadores de pulpa en línea por fluorescencia de rayos X (Cooper, 1989).....	28
Tabla 3.4. Exactitud típica de mediciones y límites de sensibilidad con analizadores en línea de fluorescencia de rayos X.....	29

Tabla 3.6. Matriz de proceso para celdas agitadas, donde una R (rápido) o una L (Lento) se refiere a la velocidad de respuesta y un + o un – indican la dirección del cambio en la variable controlada como resultado de un incremento en la variable manipulada. (Herbst, Holsinger, 1992).....	32
Tabla 6.1. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 1.....	66
Tabla 6.2. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2.....	66
Tabla 6.3. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco agotativo 1.....	67
Tabla 6.4. Coeficientes de correlación de los modelos de dosificación de reactivos ...	71
Tabla I.1. Comparación de medias para los ensayos de la cabeza general.....	80
Tabla I.2. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Zn.....	80
Tabla I.3. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Pb.....	80
Tabla I.4. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Cu.....	81
Tabla I.5. Comparación de medias para los ensayos de las colas finales.....	81
Tabla II.1. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el Laboratorio Tizapa. Cabeza general.....	82
Tabla II.2. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Cabeza general.....	82

Tabla II.3. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Zn.....	83
Tabla II.4. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado de Zn.....	83
Tabla II.5. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Pb.....	84
Tabla II.6. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado Pb.....	84
Tabla II.7. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Cu.....	85
Tabla II.8. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado de Cu.....	85
Tabla II.9. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Cola final.....	86
Tabla II.10. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Cola final.	86
Tabla V.1. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación.	97
Tabla V.2. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 2 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación.	97

Tabla V.3. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación..... 97

Tabla V.4. Comparación de consumos de Xantato 350 al banco primario 2 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación. 98

Tabla V.5. Comparación de consumos de Xantato 350 al banco Agotativo 1 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación. 98

Tabla V.6. Comparación de consumos de CuSO_4 al acondicionador 3 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación..... 98

Capítulo 1. Introducción

1.1. Problemática

El control automático en las plantas de flotación busca los requerimientos para optimizar el desempeño de la planta durante la ocurrencia continua o aleatoria de perturbaciones de la alimentación de la pulpa. Algunas de las perturbaciones típicas de la alimentación de sólidos son el porcentaje de sólidos en la pulpa, la mineralogía, flotabilidad de la ganga y los minerales de valor (Kelly y Spottiswood, 1990). En plantas donde se utilizan molinos autógenos y semiautégenos, los cambios en los flujos de alimentación son muy grandes, y los cambios en la alimentación de sólidos del 10% son muy comunes (Herbst et al, 1999). Los cambios en la mineralogía son muy comunes también, como son los cambios en la composición de las rocas de la mina. Como estos cambios ocurren en circuitos de flotación agitados convencionales o en columnas de flotación, el operador puede intentar compensar estas perturbaciones ajustando el nivel de las celdas, la dosificación de colectores y espumantes, el pH, y en algunos casos, la aireación y la alimentación de agua de las celdas. Este problema es muy complicado en algunas situaciones por el hecho de que en diferentes secciones de la planta de flotación se procesan diferentes tipos de mineral al mismo tiempo.

Además de los problemas propios del proceso de flotación como son las perturbaciones y los problemas mecánicos y de instrumentación, existen otros factores que pueden afectar el rendimiento del circuito de flotación en una planta. Por ejemplo, es muy frecuente que un operador se distraiga de sus labores en el control del proceso que se le asigna y debido a esto no se hacen las correcciones necesarias en el momento en que una perturbación afecta el proceso. Esto se puede solucionar quitándole al operador la responsabilidad de controlar el proceso cada vez que ocurre una perturbación y simplemente asignarle la tarea de supervisión, para evitar fallas en los instrumentos y equipo necesario para el proceso.

Lo que pretende un sistema de control anticipado, como lo es el control de la adición de reactivos de flotación, es eliminar en medida de lo posible el efecto de las perturbaciones de entrada sobre el ensaye y la recuperación en los concentrados finales. Para tener este tipo de control, es necesario tener un modelo del proceso. Es necesario entonces tener la instrumentación necesaria para conocer los contenidos metálicos en las corrientes de interés, la densidad de la pulpa, tonelaje de alimentación y pH entre otras. Las variables que tienen un mayor impacto en el grado y la recuperación de los concentrados son la variabilidad de las leyes y el tonelaje de alimentación.

En la unidad minera Tizapa se requiere mantener un grado promedio en el concentrado de Zn mayor o igual a 51.5% y una recuperación promedio de 80% como un requerimiento mínimo aceptable.

La utilización de instrumentos de campo para conocer el estado del proceso (niveles de las celdas, flujo de alimentación, densidad de la pulpa, etc.), permite tener la información necesaria para controlar ciertas variables clave en el sistema. La unidad Tizapa cuenta con un analizador de partículas en línea AMDEL. Este aparato es capaz de analizar seis corrientes y actualmente analiza cinco elementos (Fe, Cu, Zn, Pb y Ag), además del porcentaje de sólidos. Sin embargo algunos otros factores ajenos al proceso, como la supervisión y control manual, afectan la eficiencia de la separación y no permiten operar en un nivel óptimo.

Uno de los problemas más fuertes a vencer durante el desarrollo de este proyecto es la comunicación existente entre el sistema de control de reactivos y el analizador químico en línea. Otro de los problemas es la calibración de las bombas dosificadoras, debido a las variaciones en el rendimiento de estas.

El tiempo de retardo provocado por el tiempo de residencia de los circuitos de flotación, afecta principalmente a la dosificación de reactivos en el circuito de Zn, este tiempo es muy grande y con la instrumentación y el software disponible no es posible calcular el contenido de Zn en la alimentación a este circuito. Otro de los factores que afectan es la

gran variación en los contenidos metálicos en la alimentación a flotación. Esto afecta directamente en la dosificación de reactivos de flotación debido a que los operadores no reaccionan inmediatamente después de que ocurre una perturbación de este tipo, la figura 1.1 muestra la variación del contenido de Zn en la alimentación a flotación durante ciento cincuenta turnos. Estas variaciones en el contenido de Zn en la alimentación son provocadas en su mayor parte por variaciones en el tonelaje de alimentación a molinos y en menor medida a variaciones en las leyes de alimentación.

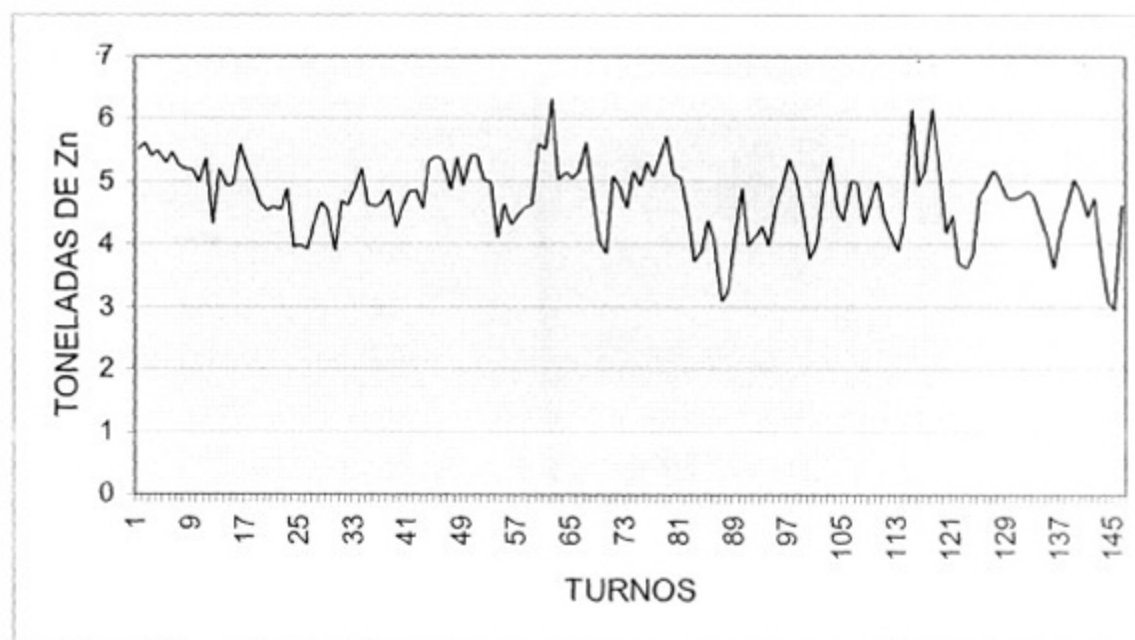


Figura 1.1. Variaciones en contenido de Zn de alimentación a flotación.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es obtener los modelos empíricos para la dosificación automática de reactivos de flotación utilizados en el circuito de Zn de la unidad minera Tizapa y aplicarlos para ser automatizados en el sistema de control.

1.3. Metodología

Los pasos seguidos en el desarrollo del proyecto fueron los siguientes:

- A. Se localizaron los puntos de adición de reactivos y los puntos de análisis químico en los circuitos de flotación de Pb-Cu y Zn, además de la localización de la instrumentación colocada a lo largo de los circuitos de flotación de interés.
- B. Se realizó una recopilación de datos de operación como análisis químicos reportados por el laboratorio, dosificaciones de reactivos (CuSO₄, Xantato 350 y Aerofina 3418), además se crearon archivos con los historiales de los análisis químicos reportados por el analizador AMDEL.
- C. Se analizaron los datos recopilados para determinar la tendencia de dosificación de los operadores en función de los contenidos metálicos del mineral procesado. Con el resultado de este análisis se determinaron ecuaciones para la dosificación de CuSO₄, Xantato 350 y Aerofina 3418.
- D. Se realizó la calibración de las bombas dosificadoras para funcionar con el programa de control de reactivos CoReact.
- E. Se configuró el programa de control CoReact para realizar las dosificaciones calculadas con los modelos obtenidos.
- F. Se detectaron las fallas que se presentaron al trabajar con el sistema de adición automática de reactivos.
- G. Se realizó una evaluación de los modelos de adición de reactivos, comparándolos contra el modo de operación manual existente.

Capítulo 2. Descripción del proceso

La unidad minera Tizapa se localiza a 115 Km de la ciudad de Toluca, en el municipio de Zacazonapan en el estado de México. En esta unidad se procesan sulfuros metálicos provenientes de un yacimiento tipo vulcanogénico y se obtienen concentrados de Zn, Pb y Cu. En la tabla 2.1 se muestra un balance metalúrgico típico del proceso de esta unidad.

Tabla 2.1. Balance metalúrgico típico de la unidad minera Tizapa.

Producto	Peso %	Ton.	Ensayes						Distribución por ciento					
			g/t		por ciento				por ciento					
			Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Cabeza	100	1700.0	2.40	258	1.47	6.48	0.58	32.50	100	100	100	100	100	100
Conc. Pb	4.0	67.7	19.89	3791	24.00	9.20	4.66	19.59	33.0	58.5	65.00	5.65	32.0	2.40
Conc. Cu	0.8	14.1	14.43	4188	6.70	1.25	26.50	18.76	5.0	13.5	3.79	0.16	38.0	0.48
Conc. Zn	9.7	164.9	1.98	293	1.27	51.50	0.66	10.05	8.0	11.0	8.35	77.1	11.0	3.00
Colas	85.5	1453.3	1.52	51	0.39	1.30	0.13	35.78	54.0	17.0	22.90	20.7	19.0	94.10

2.1. Molienda

La planta de procesamiento cuenta con un circuito de molienda que trabaja en paralelo, compuesto por dos molinos de 10x13 ft los cuales operan en circuito cerrado con dos baterías de ciclones D15B.

El tamaño de la alimentación fresca a los molinos es de 80% $-3/8''$ y el tamaño de corte de los ciclones es de $78\mu\text{m}$. Cada batería tiene tres ciclones D15B, de 60'' de largo y un diámetro de alimentación de $5\ 5/8''$, un vortex de $6x12''$ y un ápex de $2\ 1/2''$ cada uno.

En la figura 2.1. se muestra el diagrama del circuito de molienda de la unidad minera Tizapa. Este circuito de molienda tiene una capacidad de 1700 toneladas por día.

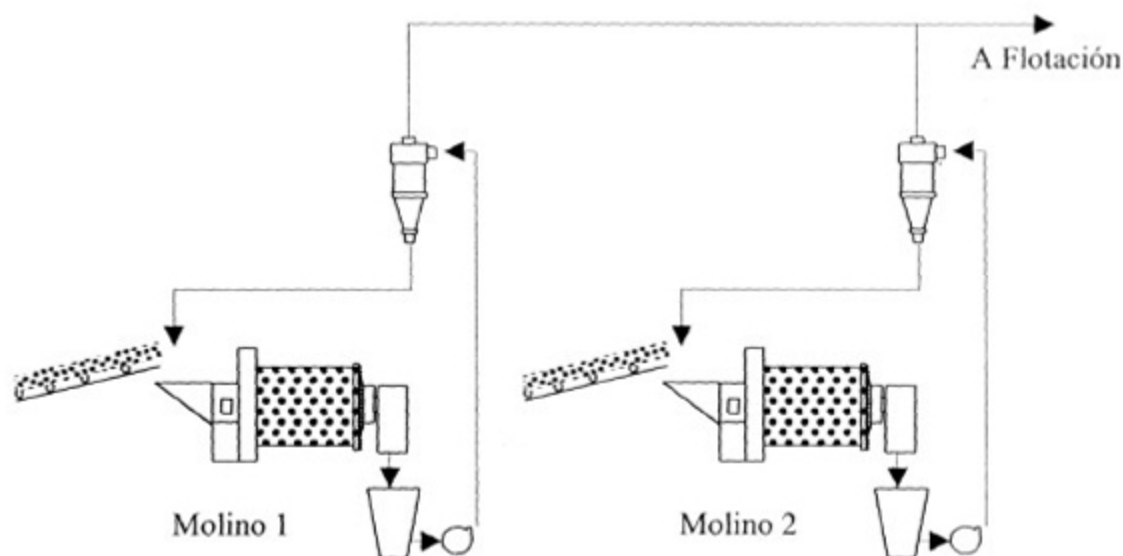


Figura 2.1. Circuito de molienda, minera Tizapa.

El circuito de molienda tiene la capacidad de trabajar automáticamente mediante un sistema de control regulatorio en base a PLC centralizado. La instrumentación de campo con la que cuenta este circuito de molienda es la siguiente: dos densímetros, dos variadores de velocidad para las bombas de la descarga de los molinos, dos Pesómetros colocados en la alimentación a los molinos, dos válvulas automáticas para la adición de agua en la descarga de los molinos, variadores de velocidad para las bandas de alimentación a los molinos, variadores de velocidad para las bombas de alimentación a ciclones. Las válvulas de alimentación de agua a las descargas de los molinos trabajan en lazo de control con los densímetros para controlar la densidad de la pulpa en la alimentación a ciclones. Los variadores de velocidad de las bandas alimentadoras trabajan en lazo de control con los pesómetros para ajustar el tonelaje de alimentación al setpoint. Los variadores de velocidad de las bombas de alimentación a los ciclones trabajan en lazo de control con los sensores de nivel para mantener el nivel del cajón de descarga de los molinos. En la figura 2.2 se puede ver el esquema de control para el circuito de molienda.

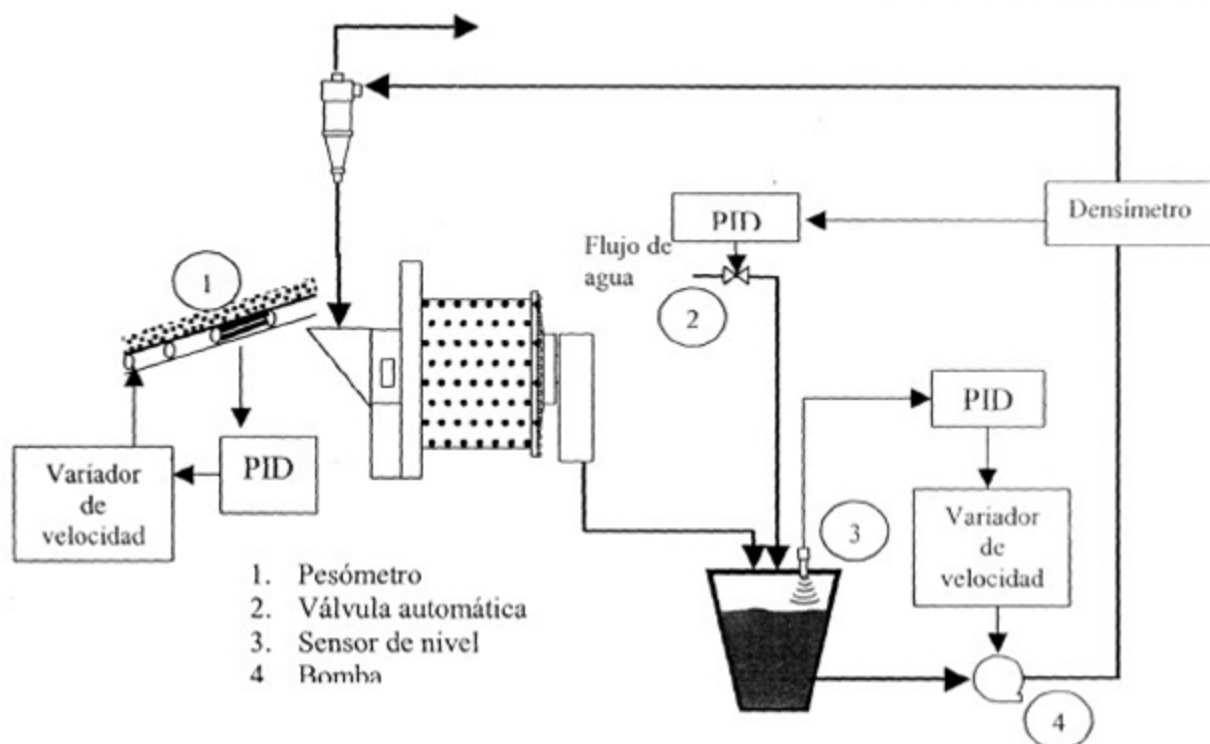


Figura 2.2. Esquema de control para el circuito de molienda de minera Tizapa.

En la tabla 2.2 se muestran los lazos de control para el circuito de molienda.

Tabla 2.2. Lazos de control en el circuito de molienda.

Variable Controlada	Variable manipulada
Tonelaje	Velocidad de alimentación (Kg/m)
Densidad	Abertura de válvula (%)
Nivel de cajón	Velocidad de la bomba (rpm)

2.2. Flotación

El proceso de concentración se realiza mediante flotación selectiva. Para esto, la unidad Tizapa cuenta con los tres circuitos de flotación siguientes: Flotación Pb-Cu, Flotación Zn y separación Pb-Cu. Estos circuitos de flotación cuentan con un control automático de nivel de las celdas. Con este sistema de control de nivel es posible mantener el nivel de la cama de espuma en un punto fijo. Para esto, el nivel de la pulpa se mide con un sensor

ultrasónico. La señal de este sensor rebota de una placa adaptada a un flotador. Por diferencia se obtiene la altura de la cama de espuma. Esta altura se regula mediante un control PID que abre o cierra la válvula de dardo en el flujo de las colas del banco de celdas. En la figura 2.3. se muestra el esquema del control de nivel de espuma para las celdas de flotación en cada circuito de la planta.

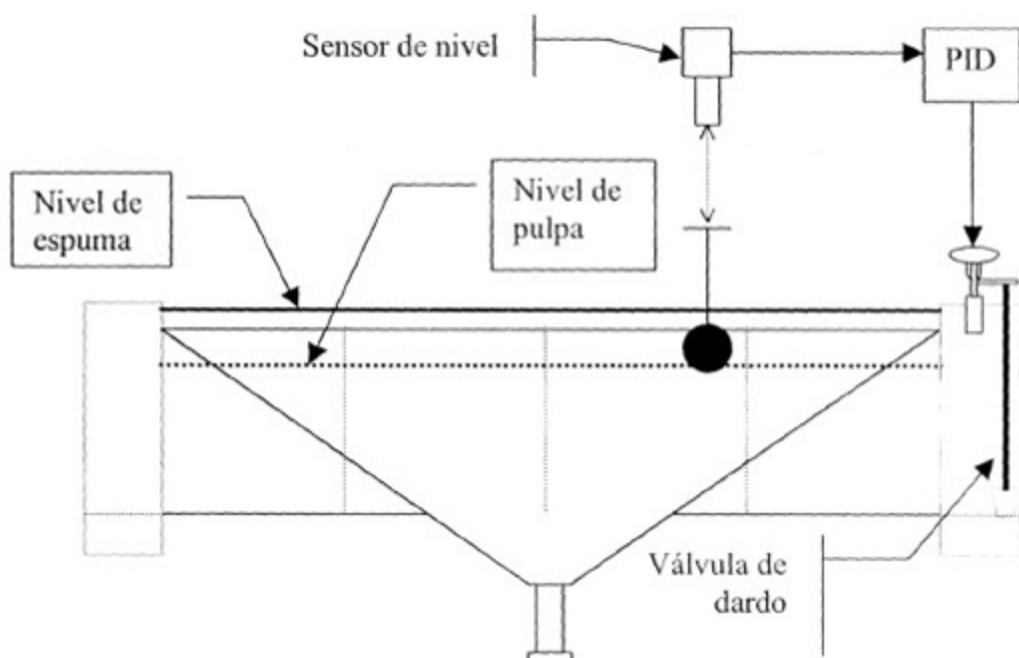


Figura 2.3. Esquema de control de nivel

A continuación se detallan los circuitos de flotación.

2.2.1. Circuito de flotación Pb-Cu

El producto fino del circuito de molienda pasa al circuito de flotación Pb-Cu, este último se compone de dos bancos primarios, dos agotativos y tres limpias configuradas de la forma como se muestra en la figura 2.4.

Este circuito de flotación es controlado en el PLC y con algunos controles de campo. La instrumentación de campo es la siguiente: seis controladores de nivel para cada uno de los

bancos de flotación y un sensor de presión para la limpia de columna. Cada banco cuenta con un actuador neumático para accionar los dardos de las colas.

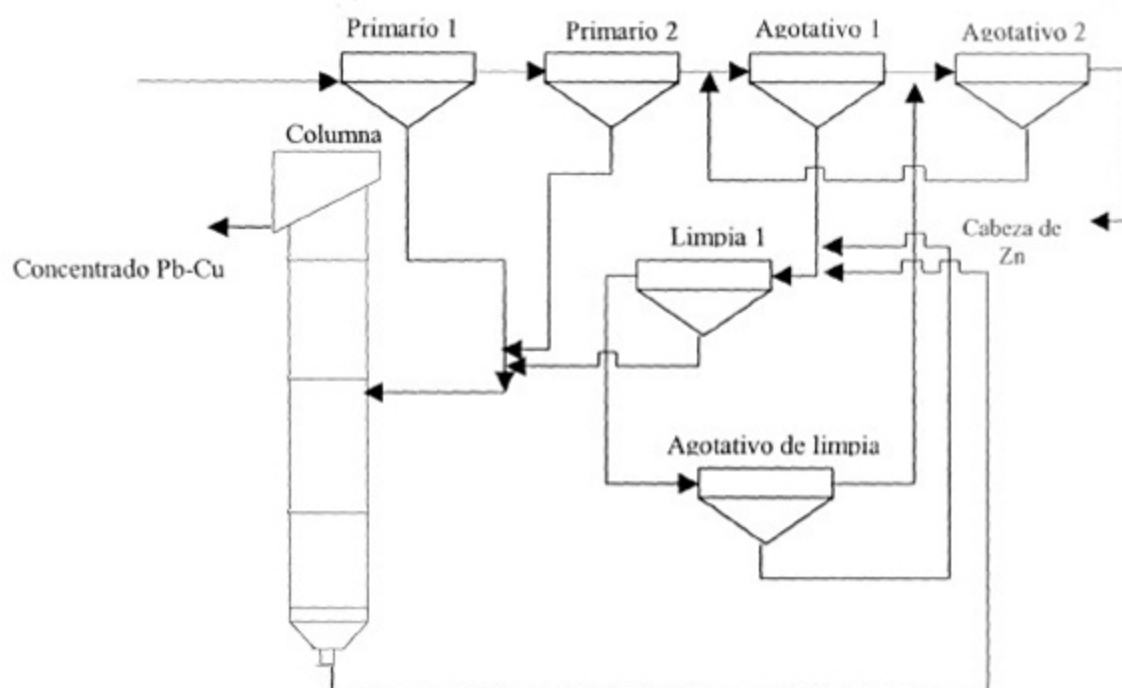


Figura 2.4. Diagrama del circuito de flotación Pb-Cu, minera Tizapa.

En la tabla 2.3 se muestran los reactivos utilizados en este circuito de flotación, así como su punto de adición y elemento de control. La cantidad de reactivo a dosificar se calcula en función del elemento de control de cada reactivo.

Tabla 2.3. Reactivos de flotación utilizados en el circuito de flotación Pb-Cu.

Reactivo	Punto de adición
Aerofina 3418	Banco primario 1
Aerofina 3418	Banco primario 2
Aerofina 3418	Banco Agotativo 1
Espumante	Banco agotativo 1
Espumante	Columna

2.2.2. Circuito de separación Pb-Cu

En este circuito de flotación se obtiene un concentrado de Pb con una ley promedio de 24% de Pb y 3791/t de Ag. Se obtiene también un concentrado de Cu con una ley de 26.5% de Cu y 4188 g/t de Ag. Este circuito produce un promedio diario de 67 toneladas de concentrado de Pb y 14 toneladas de concentrado de Cu. En la figura 2.5 se muestra el diagrama de este circuito.

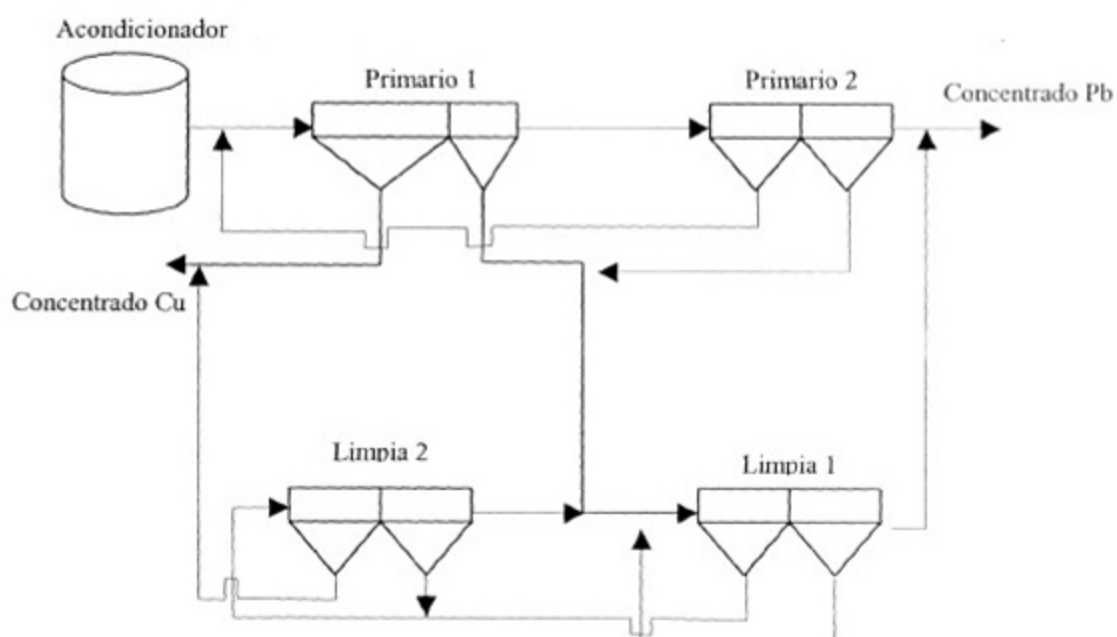


Figura 2.5. Diagrama del circuito de separación Pb-Cu, minera Tizapa.

En este circuito se adicionan los reactivos de flotación que se muestran en la tabla 2.4. En esta tabla se muestran los puntos de adición para cada reactivo y el elemento de control.

Tabla 2.4. Reactivos de flotación utilizados en el circuito de separación Pb-Cu.

Reactivo	Punto de dosificación
Bióxido de azufre	Acondicionador
Dextrina	Acondicionador

2.2.3. Circuito de flotación de Zn

Las colas del circuito de flotación Pb-Cu pasan a los acondicionadores del circuito de flotación de Zn. Este circuito cuenta con cinco acondicionadores dos bancos primarios, dos bancos agotativos y tres limpias operando como se muestra en la figura 2.6.

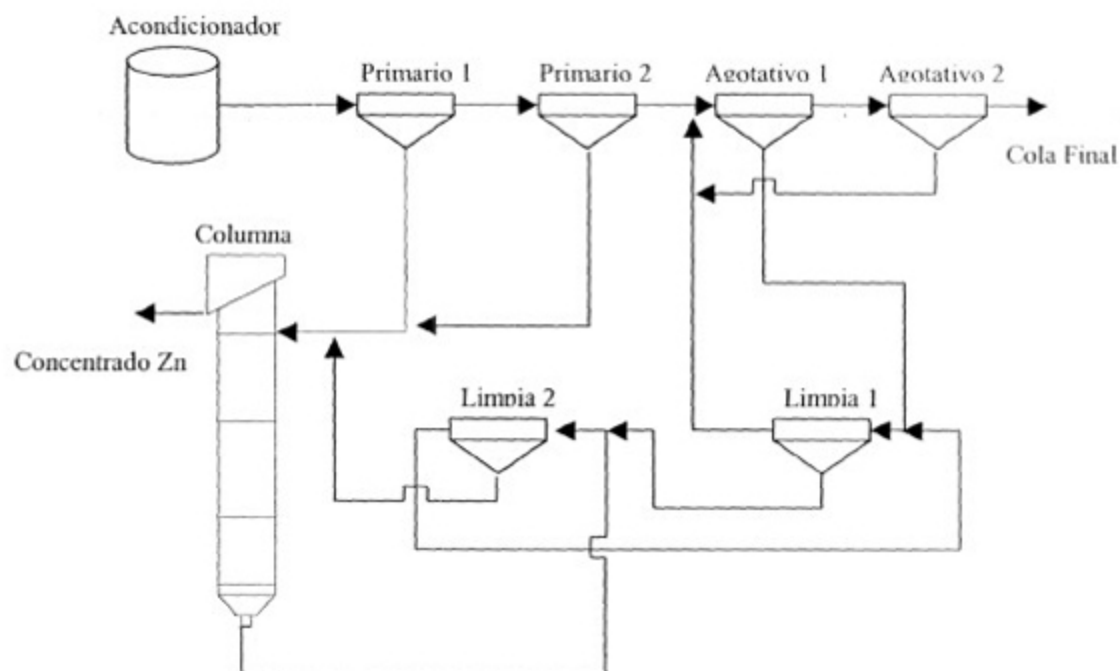


Figura 2.6. Circuito de flotación de Zn, minera Tizapa.

El concentrado de Zn es el producto principal de esta unidad, por lo tanto el circuito de Zn debe ser controlado con especial cuidado para obtener un grado y una recuperación con las características que se mencionaron anteriormente.

Para lograr tener un estado estable en el circuito de flotación de Zn se cuentan con los siguientes lazos de control que se muestran en la tabla 2.5. Estos lazos de control se ejecutan desde un sistema de control en base a PLC que corre en una computadora dedicada.

Tabla 2.5. Lazos de control para el circuito de flotación de Zn.

<i>Instrumento de medición</i>	<i>Variable manipulada</i>	<i>Variable controlada</i>
Electrodo de pH	Apertura de válvulas de adición de cal	pH
Sensor de nivel ultrasónico	Accionador de dardos	Nivel de cama de espuma
Analizador químico	Dosificación de reactivos	

2.3. Control de reactivos

Para el proceso de separación por flotación, se utilizan siete reactivos como se muestra en la tabla 2.6. en esta tabla se muestra el punto de adición así como el elemento que controla la dosificación de cada reactivo.

Tabla 2.6. Reactivos de flotación utilizados en los circuitos de flotación y sus elementos de control.

Reactivo	Punto de adición
Promotor 404	Molinos
Aerofina 3418	Primario 1, primario 2 y agotativo 1 de Pb
Bióxido de azufre	Acondicionador de separación Pb-Cu
Dextrina	Acondicionador de separación Pb-Cu
Xantato 350	Primario 1, primario 2 y agotativo 1 de Zn
Sulfato de cobre	Acondicionador 3 de Zn
Espumante	Primario 1 de Pb, Primario 1 de Zn y columna de Pb

Antes del inicio de este proyecto de tesis, la dosificación de los reactivos de flotación se realizaba manualmente mediante tablas de dosificación que contenía las leyes de Pb, Cu y Zn con su respectiva dosificación de Aerofina, CuSO_4 y Xantato 350.

Los operadores se basaban en las lecturas que realizaba el analizador en línea AMDEL. Con las tablas de dosificación y el tonelaje de alimentación a los molinos, se dosificaba la cantidad de reactivo adecuada para la ley obtenida. Una vez que se calculaba la cantidad de reactivo a dosificar, el operador ajustaba la bomba dosificadora para dosificar la cantidad adecuada de reactivo.

Capítulo 3. Antecedentes bibliográficos

Desde el momento de la introducción de la flotación como proceso de separación en la industria de minerales, el problema de la adición de los reactivos se consideró como una de las principales dificultades (Barbery y Cécile, 1986). Esto debido a que el proceso de flotación de minerales es complejo. La gran mayoría de las perturbaciones que sufre el proceso de flotación con el tiempo son ajenas al proceso y son causadas por fallas mecánicas o por errores humanos (Herbst et al, 1992). La instrumentación es de vital importancia ya que con un proceso tan cambiante es necesario conocer en todo momento el estado del sistema para poder tomar acciones correctivas en el momento oportuno.

Entre los problemas más graves que se presentan en un proceso de flotación se encuentran la variabilidad de las leyes de alimentación y la fluctuación en el tonelaje de alimentación. Otro factor importante en el problema de la estabilización es el esquema químico utilizado en cada circuito de flotación. Una adecuada dosificación de reactivos, calculada en función del contenido metálico en la alimentación de los diferentes circuitos contribuiría a la estabilización del proceso.

El cálculo adecuado de la cantidad de reactivos a dosificar en los circuitos de flotación, puede determinar el grado de eficiencia de cada uno de los circuitos en la planta de beneficio. Por ejemplo, el incremento en la cantidad de colector puede ocasionar una mayor recuperación de minerales de ganga, así como una disminución en la cantidad de reactivos de flotación puede provocar un mejor grado del producto final (Chander, 1988).

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de las dosificaciones de reactivos, depende del análisis químico en línea de las partículas que entran al proceso. Pero aun con el desarrollo de analizadores en línea de partículas y otros dispositivos de medición del proceso de flotación, el control de la flotación no se ha desarrollado como se esperaba. Una de las razones de este hecho es que los operadores siguen siendo los principales responsables de monitorear las condiciones de flotación y efectividad del proceso, y toman

decisiones con la intención de mejorar los resultados del proceso. Las razones por las cuales los humanos no podemos obtener resultados óptimos o cercanos a los óptimos es porque siempre existirán fallas al manipular toda la información disponible, y no pueden manipular simultáneamente todas las variables para obtener un estado óptimo del proceso (Hales, 1989).

Parte de la solución a este problema es automatizar las acciones que toman los operadores para diferentes análisis químicos mediante un sistema de control por computadora. En el sentido tradicional, este tipo de control involucra un programa de computadora para vigilar el proceso y después, basándose en reglas de control, realizar cambios de punto de ajuste para lograr los objetivos del proceso. Estas reglas de control pueden ser heurísticas (basadas en la experiencia de los operadores) (Hales, 1989).

Es importante mencionar que el control básico también es indispensable para mantener el proceso de flotación en un estado estable. Los controles de nivel, de flujo y de aireación (cuando éste es posible), juegan un papel muy importante en la estabilización de la recuperación y el grado del producto final.

3.1. Sistemas modernos de control

En los últimos años, se han diseñado modelos para describir el proceso de flotación lo más apegadamente posible al funcionamiento real, estos modelos describen la cinética del proceso, el comportamiento de la mena en un período de tiempo y los tiempos de residencia de la pulpa en las celdas de flotación, y por medio de ellos se puede predecir el comportamiento futuro del mineral.

Un esquema muy ilustrativo de los sistemas modernos de control para procesos de flotación es el triángulo de control que se muestra en la figura 3.1. Los vértices del triángulo (hardware de control, sensores, y estrategias) constituyen los tres componentes esenciales de cualquier sistema de control moderno.



Figura 3.1. Triángulo de control, que muestra las partes esenciales de un sistema de control moderno (Herbst y Pate, 1999).

En años recientes se han hecho avances en estas tres áreas, pero sólo en dos de ellas: estrategias y hardware, se han obtenido resultados excepcionales que han tenido grandes resultados en las plantas de flotación. Estas mejoras de las plantas se han presentado en dos áreas; la primera en la mejora metalúrgica y la segunda en ahorro de reactivos.

Dentro de las mejoras metalúrgicas se han reportado incrementos en el promedio de la recuperación entre 1.0 y 5.0 por ciento y el ahorro de reactivos es del 10 al 15% (Herbst et al, 1999).

3.1.1. Desarrollos en la instrumentación

Los sistemas de control de flotación requieren del conocimiento de las variables clave que proveen una relación consistente entre el sistema de control y el desempeño del proceso de separación. Este conocimiento se puede obtener por medio de sensores o de una

combinación de software y sensores. La tabla 3.1 muestra una lista específica de los sensores que se encuentran disponibles hasta 1999 y la tabla 3.2 muestran las variables clave del sistema. En esta tabla se puede ver el tipo de perturbación que afecta a la variable manipulada, así como la medición que se realiza para su estabilización. En la primera línea se puede observar que la composición mineralógica afecta a la recuperación. Para medir esta perturbación se utilizan analizadores en línea que obtienen el ensaye de la corriente deseada. Las variables que se manipulan para mantener la recuperación en un valor fijo son el flujo de aire y la adición de espumante.

Tabla 3.1. Sensores disponibles hasta 1999 (Herbst et al, 1999).

Medición	Dispositivos
Aireación	Rotámetro magnético, medidor de orificios, turbina
Fuerza de agitación	Medidor de watt/torque
Eh	Electrodos
Alimentación de sólidos en seco	Medidor de peso
Nivel de espuma	Probador de capacitancia, probador de conductividad
Calidad de la espuma	Imágenes de video
Composición de partículas	Fluorescencia de rayos X, activación de neutrones, difracción de rayos X.
pH	Electrodos, conductividad
Densidad de la pulpa	Medidor nuclear gama
Nivel de la pulpa	Medidor de capacitancia, celda de PD, sensor sónico
Flujo de reactivos	Medidor de bomba, medidor de turbina
Flujo de pulpa	Flujometro ultrasónico y magnético
Flujo de agua	Placa de orificio, medidor de turbina
Tamaño de partícula	Dispersión de luz, PSM sónico

Tabla 3.2. Variables de importancia en el proceso de flotación de minerales (Herbst et al, 1992).

Perturbaciones	Variables			
	Medidas	Manipuladas		Controladas
Composición mineralógica	Ensayes	Aireación	Adición de espumante	Recuperación
Grado de oxidación	Volumen de alimentación	Nivel de pulpa	Adición de colectores	Grado
Variación del tamaño de alimentación	Distribución de tamaños	Velocidad del impulsor	Adición de modificadores (pH, activadores y depresores)	Tonelaje de alimentación
Variación de tonelaje de alimentación	Nivel de pulpa	Agua de lavado	Punto de adición de reactivos	Por ciento de sólidos en la alimentación
Variación del grado de alimentación	Nivel de espuma	Separación de finos	Potencial electroquímico	Nivel de espuma

La información acerca de la composición química de las partículas que se ha utilizado más comúnmente viene de los analizadores de pulpa en línea por medio de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y activación de neutrones. Combinando estas técnicas de ensayo en línea con técnicas de muestreo adecuado, una estrategia de control adecuada y el equipo de control necesario, se tienen las bases para un sistema de control de flotación económicamente exitoso.

3.1.1.1. Analizadores en línea

Los modernos analizadores de fluorescencia de rayos X y de difracción han impulsado los sistemas de control en las plantas. Los analizadores están protegidos para el trabajo industrial y se colocan cerca de la corriente del proceso a la que se va a hacer un muestreo. Algunas unidades de rayos X tienen extensos soportes estadísticos y de ingeniería, que son

ejecutados por computadoras dedicadas. Estas computadoras se localizan en las salas de control o están conectadas a la unidad de campo por medio de comunicación por cable.

Existe una unidad de rayos X que proporciona difracción de rayos X para determinar no sólo el contenido de los metales, sino también para cuantificar minerales seleccionados. Esta capacidad para detectar y cuantificar un cierto tipo de mineral es muy útil para controlar la cantidad de tipos de minerales indeseables que contienen elementos como fósforo o sílice del concentrado final.

En la sección 3.3 se profundizará más en el tema del funcionamiento y tipos de analizadores en línea para la industria de procesamiento de minerales.

3.1.1.2. Medidores de pH

Las condiciones químicas dentro de la celda de flotación se pueden modificar controlando el pH y la adición de reactivos. Estos lazos de control son comunes, y su éxito depende en gran medida de una buena calibración del equipo y un mantenimiento periódico.

3.1.1.3. Medidores de nivel

Existen algunos tipos básicos de dispositivos que miden el nivel de las celdas. Los más comunes para las celdas de flotación convencionales es el sensor de presión, el sistema de tubo de burbujeo, y el dispositivo de flotación que se coloca en la interfase pulpa / espuma. La necesidad de medir y mantener controlado el nivel de la pulpa, ha impulsado el desarrollo de un gran número de aparatos de medición para este propósito.

3.1.2. Desarrollos en el hardware de control

El hardware para los sistemas de control ha experimentado cambios debido al desarrollo de nuevos y más rápidos microprocesadores. Gracias a esto se hace posible tener:

- Sistemas de Control Distribuido (SCD)
- Redes de computadoras
- PLC's
- Controladores

Desde fines de 1999, están disponibles en el mercado los servidores y estaciones de trabajo con microprocesadores de 1024 MHz. Las velocidades de los microprocesadores prácticamente se duplican cada 18 meses. La alta velocidad de los procesadores permite la utilización de interfaces hombre / máquina más sofisticadas y hace posible tareas más intensivas de computo como es la optimización por medio de redes neuronales.

La tendencia en los equipos de comunicación hacia dispositivos más pequeños y poderosos hace más fácil monitorear el equipo en sitios remotos y obtener reportes muy rápidamente de la operación. Ahora se pueden transmitir sobre fibra óptica, video, datos y voz, hacia cualquier parte de la planta.

Paralelo a esto, se ha mostrado un crecimiento explosivo en las redes de computadoras, especialmente en Internet y en las Intranets. Las intranets basadas en un transporte sencillo como TCP/IP que permite una estructura de comunicación Top Down no tiene muchas dificultades para pasar los datos entre capas. Uno puede reconocer rápidamente el crecimiento dramático en la capacidad del hardware mostrado en la figura 3.2.

FMI 4906

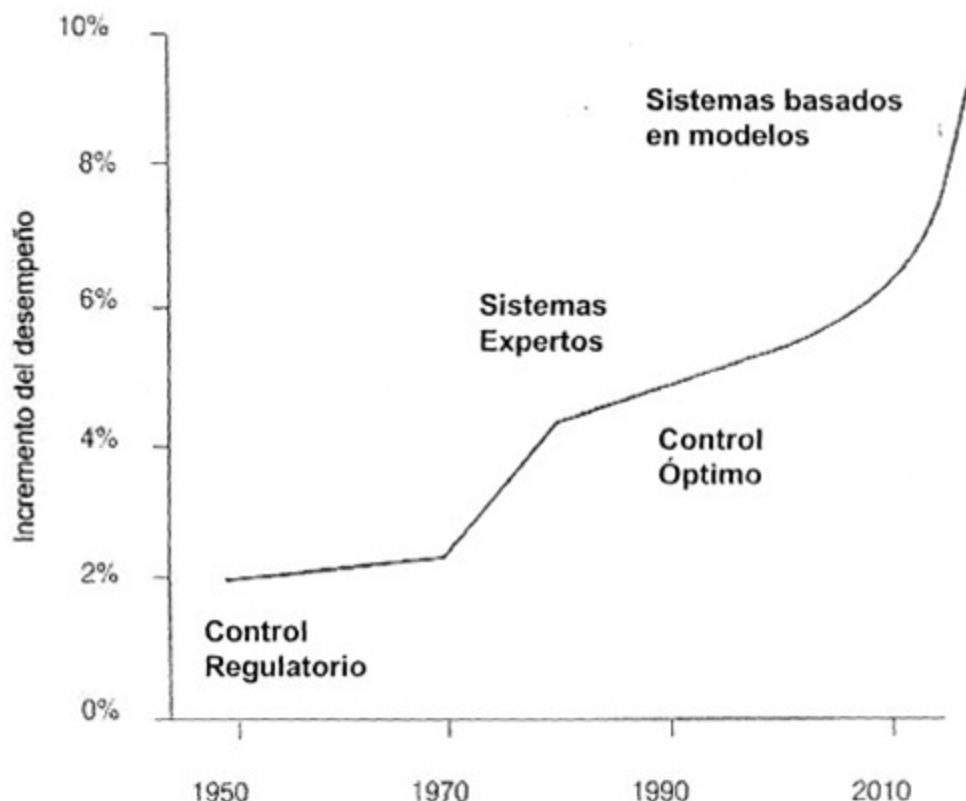


Figura 3.2. Mejoras en el desempeño de varios niveles del control de flotación (Herbst et al, 1999).

Un desarrollo interesante es el uso de navegadores para ver los datos de la planta en tiempo real mediante software especializado que es proporcionado por el vendedor del sistema de control. Los vendedores crean ahora PLC's que tienen la capacidad de ser controlados por un servidor de Internet.

El incremento de la velocidad de los microprocesadores ha hecho posible que los sistemas de control puedan utilizar modelos matemáticos más complejos sin ver afectado el tiempo de respuesta en el control de las variables del sistema. Además del uso de líneas de comunicación de alta velocidad para la comunicación entre los dispositivos nos permite acercarnos mucho al manejo en tiempo real.

Es importante notar que el hardware de control es la parte principal de toda estructura de control automático, ya que este nos permite tener las respuestas rápidamente para controlar cada proceso.

3.1.3. Desarrollos en las estrategias de control

Formalmente, todas las estrategias de control utilizadas en la flotación se pueden colocar en dos categorías:

- Estrategias de estabilización (o regulación).
- Estrategias de optimización (o supervisión).

Los sistemas de estabilización controlan los niveles de las celdas de flotación, pH, dosificación de reactivos, y aireación (si es posible). Los procesos de medición más comunes utilizados en estas estrategias son:

- Tonelaje de alimentación de mineral.
- Ensayes de la alimentación de la flotación.
- Propiedades de la alimentación de la flotación incluyendo el pH, potencial electroquímico y por ciento de sólidos.

La adición de reactivos se controla muy comúnmente por esquemas de control anticipado basados en los ensayos, tonelaje, o mediciones de otras propiedades de la alimentación. El control retroalimentado se utiliza para variables que tiene que ser ajustadas a un punto fijo (punto de ajuste). Por ejemplo, nivel de la pulpa, nivel de la espuma, aireación, o pH. En general, la configuración de cualquier sistema de control de flotación contiene algunos ciclos de estabilización para mantener automáticamente las variables controladas en su punto de ajuste; en consecuencia, esto constituye el paso inicial hacia la automatización de una planta de flotación.

Los sistemas de control utilizan técnicas de optimización dinámica para controlar las condiciones de flotación sobre las regiones económicamente aceptables en la curva de operación. La determinación de las condiciones óptimas a las cuales cada proceso puede operar durante períodos de estabilidad e inestabilidad de la planta puede involucrar modelos dinámicos o, si el modelo no está disponible, una técnica estadística para procesos en línea.

En general, la optimización de procesos determina un punto de ajuste (basado en consideraciones económicas) de las variables controladas. Como se vio anteriormente en la figura 3.2, es muy notable que la introducción de sistemas expertos para la supervisión de procesos en 1980 y el desarrollo de estrategias de control basadas en modelos a partir de 1990 ha incrementado el desempeño de las plantas económicamente hablando en un 3 al 10% (Herbst et al, 1999).

Las estrategias de control basadas en modelos son cada vez menos empíricas y más fenomenológicas (basados en la física y en la química del proceso). Los objetivos del control de flotación se manejan más por el aspecto económico que en el pasado, y este tipo de objetivos se consiguen más fácilmente utilizando modelos que permitan la interpretación y el control de las variables del proceso descritas de una manera física.

En los últimos años han aparecido nuevos desarrollos en el área de sistemas expertos basados en visión artificial, control electroquímico (Palsson, 1989), redes neuronales y modelos mejorados y herramientas de simulación para el desarrollo de estrategias, quizá la más significativa, la combinación de sensores y modelos basados en la toma de decisiones que provee una mejora dinámica sobre toda la planta de flotación.

Un ejemplo de un sistema de control basado en modelos de estimación, es el sistema de control utilizado en el circuito de flotación de cobre en East-Malartic, (Bouajila et al, 2000). En este sistema de control de supervisión se utiliza un analizador de partículas en línea para determinar los contenidos metálicos en las corrientes de interés. Esta

información se utiliza para realizar un balance de materia en línea con el fin de supervisar la recuperación por bancos a través de todo el circuito.

3.2. El problema del control del proceso de flotación

Debido a su naturaleza compleja, como son todos los métodos de preparación y procesamiento de la pulpa, el número de fases (sólido, líquido y gas), las características físicas y químicas (presión, temperatura, flujos y concentraciones), las características hidrodinámicas (agitación, turbulencia y arrastre mecánico), se hace muy evidente la complejidad de modelar este proceso (Cecile et al, 1988). De esta manera es necesario generalizar de alguna manera los efectos de cada una de las variables para poder simplificar su descripción matemática.

Hay que tomar en cuenta que la mayoría de los modelos para el control del proceso de flotación son muy complejos, debido a que involucran muchos parámetros como la rapidez de adsorción, rapidez de desadsorción, tamaño medio del agregado partícula-burbuja, velocidad del agregado, velocidad turbulenta y por lo tanto se basan en algunas suposiciones que en ocasiones no se ajustan totalmente a la realidad del proceso (Zaragoza, 1988). Por esta razón, existe un cierto grado de error en la información que arrojan estos modelos, y mientras menor sea este error el modelo será más complicado.

La información que se obtiene de modelos matemáticos se puede utilizar también para tomar decisiones que sirvan para lograr los objetivos de control de la planta. En términos generales, el control automático de un concentrador tiene por objetivo uno o más de los siguientes:

- Incrementar la capacidad del proceso.
- Mejorar la recuperación de los minerales de valor.
- Mejorar la ley de los concentrados (lo cual resulta en el ahorro en el costo del procesamiento subsiguiente)

- Reducir los costos de operación (por ejemplo, mediante ahorros en reactivos, uso más productivo del personal de la planta, etc.)

Es posible lograr los objetivos que se mencionan anteriormente, pero en la práctica, normalmente se establecen objetivos de control más específicos, y estos pueden variar de una planta a otra, y dentro de la misma planta de un tiempo a otro. Por ejemplo, en un concentrador de cobre, cuando la demanda de éste es alta, los objetivos pueden ser maximizar la producción, mientras que si la demanda se reduce, la mejor recuperación o bajos costos de operación se pueden convertir en los objetivos de control. En consecuencia, puede ser necesario incorporar suficiente flexibilidad en un esquema de control para dejar margen para cambios periódicos de objetivos.

En un banco individual de celdas de flotación, pueden controlarse el flujo de aire y el nivel de la pulpa (o espesor de la pulpa) (figura 3.3). También pueden controlarse la adición de reactivos y el pH del circuito de flotación.

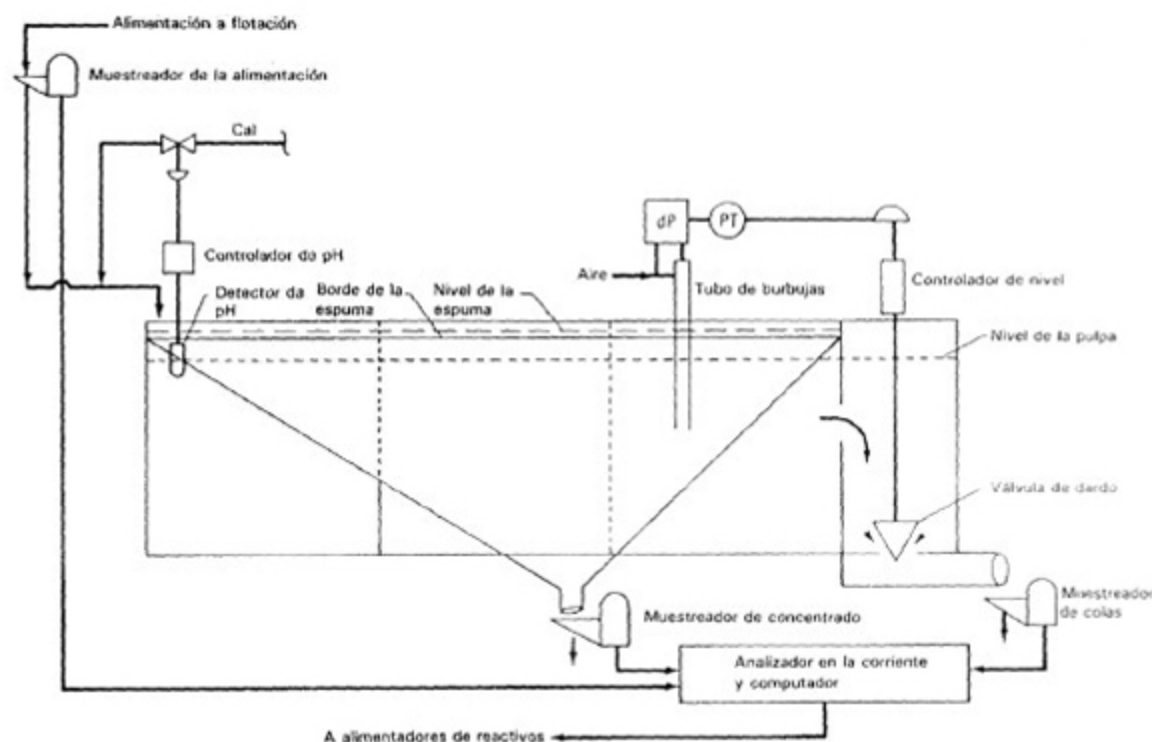


Figura 3.3. Esquema de control de una celda de flotación. (Kelly y Spottinwood, 1990)

La respuesta de un circuito de flotación se mide normalmente por el análisis químico de los productos; tanto la ley como la recuperación son de interés. El cambio de las condiciones químicas afecta claramente el rendimiento de un circuito de flotación. Por lo cual se utiliza de forma extensa el control de la adición de reactivos. Los cambios físicos, cómo el flujo de aire o el nivel de la pulpa, dan una respuesta más rápida y por ello se utilizan también para efectuar el control.

Un control efectivo de flotación ofrece beneficios en términos de estabilidad del circuito, recuperación y grado, y ayudando a maximizar el funcionamiento del concentrador.

El proceso de flotación está sujeto a perturbaciones que en algunas ocasiones son muy difíciles de medir en línea, estas perturbaciones unidas a los cambios de las leyes y del tonelaje de alimentación complican el trabajo de control. Como se mencionó anteriormente, un sistema de control regulatorio, eliminará en la medida de lo posible el impacto de estas perturbaciones del proceso.

La figura 3.4 muestra el problema de control de la operación de una planta de flotación. Las perturbaciones aleatorias en la flotabilidad (a la izquierda) causan cambios en la curva de grado recuperación (a la derecha). La flotabilidad al punto 2 es más baja que en el punto 1. Cuando el sistema de control está optimizado, el grado del producto se mantiene a su nivel mínimo aceptable. Sin el sistema de control, de cualquier forma, el grado se puede mover al mínimo, al punto 1, o por debajo del mínimo, punto 2. La curva grado recuperación para un sistema optimizado irá hacia la derecha cuando la recuperación se maximiza. Todas las demás estrategias producirán curvas que muevan hacia la izquierda teniendo recuperaciones más bajas.

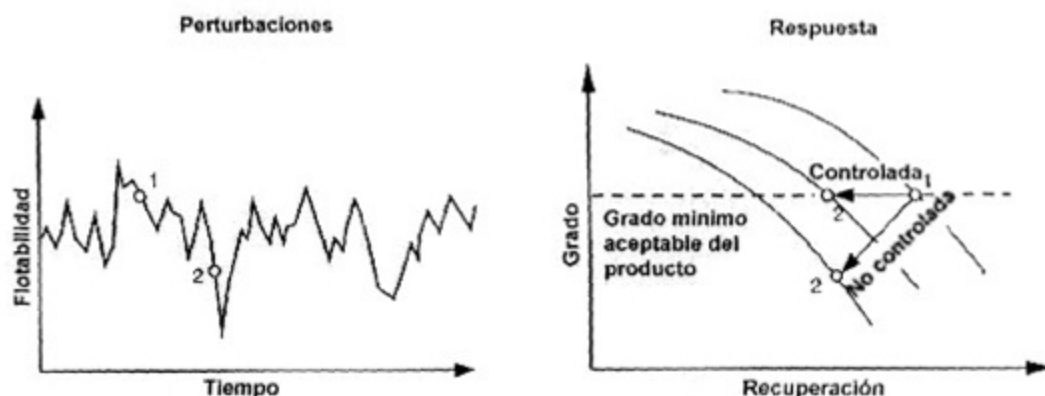


Figura 3.4. Respuestas controladas y no controladas de las perturbaciones en la flotabilidad de minerales (Herbst et al,1999).

3.3. Análisis de partículas en línea

El propósito de la separación de partículas en el beneficio de minerales a través de flotación y otras operaciones unitarias, es obtener productos basados en minerales valiosos. El resultado final puede ser el concentrado de un mineral valioso o un producto del cual puedan obtenerse minerales valiosos.

Un sistema de control eficiente para las diferentes etapas del proceso para obtener los resultados planteados, depende del conocimiento de la composición de las partículas de mineral procesado. Con esta información pueden tomarse decisiones para controlar el proceso manual o automáticamente. Para obtener buenos resultado en el control del proceso de flotación, es necesario que el análisis de las partículas en el proceso tenga exactitud y el menor retraso posible entre los análisis de las diferentes corrientes.

El análisis automático de pulpas minerales de sulfuros metálicos fue reconocido técnicamente realizable con el advenimiento de los analizadores de fluorescencia de rayos X (XRFA), para el análisis de muestras de laboratorio a mediados de la década de los 50's. El primer analizador en línea para flotación de sulfuros minerales, apareció mas

tarde en la misma década de los 50's (Cooper, 1989). Los primeros analizadores fueron productos de General Electric, Philips, y Applied Research Laboratories.

En el transcurso de los pasados treinta años desde la introducción de la tecnología de los XRFA en la industria de los minerales, han surgido al menos veinticinco compañías fabricantes de sistemas XRFA que han ofrecido equipo a la industria. En la tabla 3.3 se muestra una lista de los analizadores en línea que se están utilizando actualmente en la industria. El uso de analizadores en línea ha sido aceptado como una de las herramientas más importantes en el proceso de concentración de minerales.

Tabla 3.3. Analizadores de pulpa en línea por fluorescencia de rayos X (Cooper, 1989).

Fabricante	Modelo	Fuente	Detector	Comentarios	Año de introducción
Amdel	Gamma-X Gamma-EDX	Radioisótopos Radioisótopos	Fotomultiplicador Diodo de E. S.	En la corriente	1972 1978
Asoma Instruents	8660	Radioisótopos	Contador proporcional	Cerca de la corriente	1986
Autometrics	PSA-2000	Tubo de A. V.	Diodo de E. S.	Cerca de la corriente	1982
Mintec	OSA-1	Radioisótopos	Diodo de E. S.	Cerca de la corriente	1978
H. R. Cooper	Monitor 500 Monitor 800	Tubo de A. V.	Cristal	Cerca de la corriente	1981 1988
Outokumpu	Courier 300	Tubo de A.V.	Cristal	Cerca de la corriente	1970
	Courier 20	Radioisótopos	Diodo de E. S.		1978
	Courier 30	Tubo de A.V.	Cristal		1982
	Courier 40	Tubo de A.V.	Cristal, XRF y XDR		1986
Process Technology	PTI ash monitor	Radioisótopos	Contador proporcional	Cerca de la corriente	1988
Radiometrics	RM-1100	Tubo de A.V.	Contador proporcional	Cerca de la corriente	1989
Ramsey Engineering	Bondar-Clegg	Radioisótopos	Diodo de E.S.	Cerca de la corriente	1980
Texas Nuclear	INSCAN	Radioisótopos	Diodo de E.S.	En la corriente	1977

A.V.= Alto voltaje, E.S.= Estado Sólido.

La tabla 3.4 muestra el rango de exactitud de las mediciones y el límite de sensibilidad para dos diferentes tipos de detectores y los datos de planta de Brenda Mines. Cada uno de estos detectores tiene un proceso de calibración diferente y un límite de sensibilidad diferente.

Tabla 3.4. Exactitud típica de mediciones y límites de sensibilidad con analizadores en línea de fluorescencia de rayos X.

		Difracción de cristal		Detector de estado sólido		PCX Brenda Mines	
Elemento	Ensaye %	Error Estándar	Límite de sensibilidad %	Error Estándar	Límite de sensibilidad %	Ensaye %	Error estándar
Fe(pulpa)	25.0	1.1	0.0025	1.4	0.020	28.25	0.99
Fe(sóluc.)	2.6	0.2	0.0003	0.3	0.0024		
Cu(pulpa)	0.86	0.034	0.001	0.06	0.01	27.48	0.59
Cu(soluc.)	0.18	0.005	0.0001	0.10	0.001		
Pb(pulpa)	5.4	0.42	0.002	0.48	0.005	0.33	0.038
Pb(soluc.)	0.34	0.045	0.0002	0.08	0.0005		
Mo						0.118	0.020
Si						6.32	1.50

Límites de sensibilidad del trabajo de Barker et al (1989).

Datos de precisión de XRFA para PCXQ de Perkins (1989).

En años recientes se han introducido al mercado analizadores en línea más compactos y de más bajo costo. El progreso en los diseños electrónicos y la capacidad de procesar grandes volúmenes de información en menor tiempo ha permitido simplificar y mejorar el manejo, configuración, calibración y procesamiento de datos de estos analizadores. Existen actualmente algunos analizadores que incluyen herramientas estadísticas y de ingeniería que permiten obtener más y mejor información del proceso (Cooper, 1989).

El proceso del XRFA (figura 3.5) emplea una fuente de radiación la cual puede ser un tubo de rayos X especializado o un isótopo radioactivo seleccionado adecuadamente. En interacción con el agua, ocurren desplazamientos de electrones en los átomos de los elementos sensibles. El proceso de análisis resulta en la emisión de fotones fluorescentes muy característicos. Estos fotones XRF se detectan para calcular los análisis. Los fotones pueden ser medidos por varios métodos, el más complejo es el uso de la difracción de

crystal con un fotomultiplicador o un contador proporcional. El método más simple es un dispositivo detector de fotones de estado sólido.

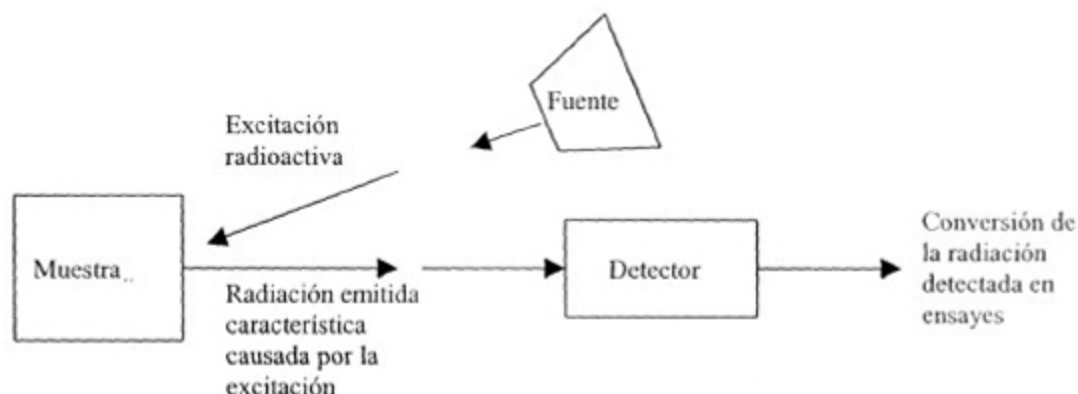


Figura 3.5. esquema de análisis por fluorescencia de rayos X (Cooper, 1989).

La precisión obtenida por la difracción del cristal (llamada también “ancho de banda dispersa” o WDX) con un fotomultiplicador es considerablemente mejor de la que es posible obtener con un detector de estado sólido o un detector fotomultiplicador sólo (también llamado “energía dispersa” o EDX), como se puede ver en la tabla 3.4.

3.4. Efecto de los reactivos sobre el grado y la recuperación

La recuperación de minerales de valor por flotación y el grado de los concentrados están fuertemente influenciados por el uso de reactivos químicos como colectores, espumantes, activadores y depresores, así como modificadores. El manejo adecuado de estos reactivos determina el éxito del proceso.

Para poder controlar la cantidad de reactivos que se dosifican en el proceso es necesario conocer el efecto que estos causan en el proceso. A continuación se detalla el efecto de los colectores y modificadores en el proceso de flotación

3.4.1. Efecto de los colectores en la flotación

El propósito de los colectores en el proceso de flotación es hidrofobizar selectivamente la superficie de los minerales para poder ser flotados. De esta forma los colectores intervienen directamente en la calidad del concentrado. En la figura 3.6, se muestra el efecto del colector en el grado y la recuperación. Se puede observar muy claramente que al incrementar la cantidad de colector, aumenta la recuperación y la curva grado-recuperación se desplaza hacia la derecha, lo que significa que el grado disminuye.

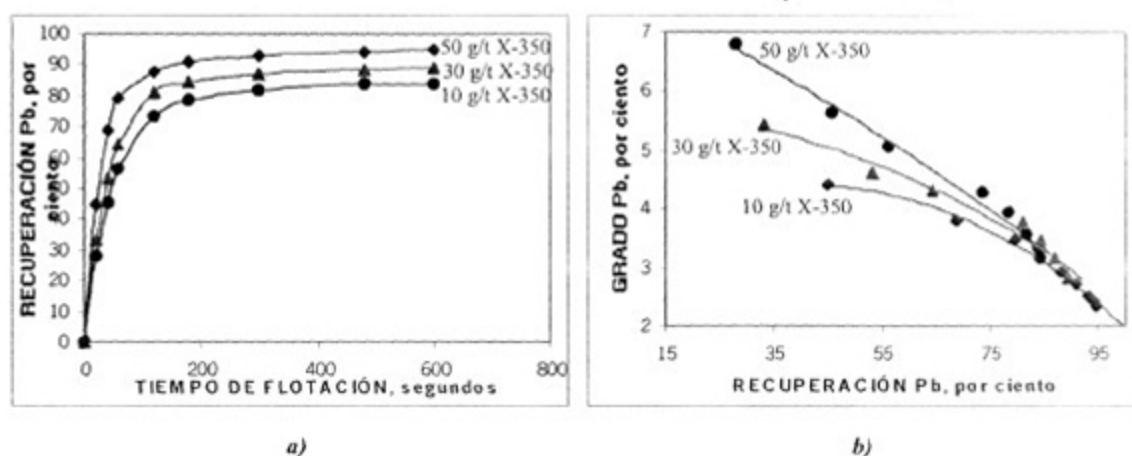


Figura 3.6. Resultados de una prueba de flotación de Pb a nivel laboratorio. a) Gráfica de recuperación acumulativa. b) Curvas grado - recuperación para cada una de las dosificaciones de Xantato 350. Estas pruebas se llevaron a cabo con 50g/t de Teutón 100 y 50g/t de NaCN a pH 8.

Dentro del sistema de control de flotación, el control de la adición de reactivos juega un papel muy importante en la optimización del proceso. Tomando en cuenta la información mostrada en la figura 3.6, se puede suponer que con un buen sistema de adición de reactivos es posible mantener el grado y la recuperación en un punto óptimo desde el punto de vista económico. Por esto en los últimos tiempos se han venido desarrollando diferentes métodos para optimizar el manejo de los reactivos dentro del proceso.

Existen también otros factores que aunados al efecto de los reactivos que contribuyen en el proceso de flotación. En la tabla 3.5, se muestra la matriz de proceso para celdas

agitadas, donde se puede ver el efecto en el grado y la recuperación de algunas variables manipuladas. Es importante hacer notar el efecto de los reactivos. Como se puede ver, el aumento en la dosificación de espumante aumenta lentamente la recuperación y disminuye lentamente el grado. Con la adición de colector, el grado disminuye lentamente, y la recuperación aumenta lentamente.

Tabla 3.5. Matriz de proceso para celdas agitadas, donde una R (rápido) o una L (Lento) se refiere a la velocidad de respuesta y un + o un - indican la dirección del cambio en la variable controlada como resultado de un incremento en la variable manipulada. (Herbst y Holsinger, 1992).

Variable manipulada	Grado	Recuperación	Altura de la cama de espuma
Aireación	L-	R+	R+
Nivel de pulpa	L-	L+	L+
Velocidad del impulsor	L (0 a -)	R (+ a -)	L-
Adición de espumante	L-	L+	R+
Adición de colector	L-	L+	L-

3.4.2. Efecto del pH en la flotación

Los efectos del pH en la flotación pueden ser muy marcados en algunos casos, mientras que en otros sistemas no se aprecian tendencias. Sin embargo hay muy pocos minerales que pueden ser beneficiados con el agua que se encuentra alrededor de la planta de beneficio. Por lo tanto, es muy común encontrar procesos de beneficio en los cuales se agregan modificadores de pH al proceso, estos modificadores pueden ser: cal, carbonato de sodio, ácido amónico o sulfúrico. Algunos minerales de Cu, Pb y Zn, pueden requerir carbonato de sodio así como cal en puntos específicos del circuito de flotación para un control de la ley y la recuperación. El control de las condiciones de pH de la pulpa en el procesamiento de sulfuros es necesario para obtener el grado y la recuperación deseadas.

Uno de los modificadores de pH más comunes es la cal, que generalmente se añade al circuito en forma de hidrato de calcio (Ca(OH)_2), y se usa principalmente para deprimir los minerales compuestos por sulfuro de fierro, en especial para eliminar la pirita y la pirrotita de los concentrados de Cu y Zn por encima del pH crítico que es usualmente 10.0, pero que puede ser menos si está presente en el sistema el Cianuro de Sodio (NaCN) (Díaz y Galindo, 2000).

Una de las formas de optimizar la adición de reactivos es la evaluación de los puntos de adición de cada reactivos utilizado en el sistema, para aumentar su eficiencia en el proceso. De esta forma se asegura que la acción de los depresores y el proceso de adsorción de colectores sea lo más eficiente posible. Otra de las formas de optimizar la adición de los reactivos de flotación es mediante el análisis de los contenidos metálicos y el tonelaje en las corrientes de alimentación a los circuitos de flotación y determinar la dosificación óptima para cada punto de adición de reactivos. Es en este último donde se pretende tener ahorros de consumo (por lo tanto económicos) y al mismo tiempo controlar el grado y la recuperación del proceso.

3.5. Control de la adición de reactivos de flotación

Es muy reconocido que la flotación de sulfuros metálicos se basa principalmente en reacciones electroquímicas, determinadas por la fisicoquímica de la solución, y el control de reactivos (colectores, modificadores de pH, depresores, activadores, oxi-reductores), es una parte crítica del control de procesos (Cécile y Villeneuve, 1988).

Los requerimientos en el grado y la recuperación de los minerales de valor y la disminución en el precio de los metales en las plantas de procesamiento de minerales, han forzado a las compañías mineras a buscar la disminución de sus costos de producción. Una de las formas en las que el costo de producción puede reducirse es mediante el control de la adición de los reactivos utilizados en el proceso de flotación. En algunas

plantas de procesamiento ya se ha implementado el sistema de control de reactivos exitosamente y es muy probable que este tipo de control se extienda rápidamente en la mayoría de las unidades mineras.

El control de reactivos en una celda de flotación no solamente trae como consecuencias el ahorro en el consumo de reactivos, sino también incrementa la eficiencia del proceso garantizando una mejor química de flotación (Chander, 1988). La cantidad de reactivos en una celda de flotación determina la eficiencia mediante su efecto en el grado y la recuperación.

La forma más simple de un sistema de control de reactivos está basado en la calidad o cantidad del producto obtenido. Por ejemplo, la cantidad de colector puede incrementarse si las pérdidas en las colas son grandes y decrementarse si el grado del concentrado es bajo (Buschell y Malnarich, 1956). Este método de control se ha utilizado ampliamente desde hace ya algunas décadas obteniendo resultados razonablemente satisfactorios (Chander, 1988). Como es fácil imaginar, este tipo de control solamente funcionará adecuadamente en procesos en los cuales las características de alimentación no varíen mucho con el tiempo. De otra manera los resultados de este tipo de control serían indeseables.

Se espera que el control de reactivos basado en mediciones de las concentraciones de la solución sea más confiable debido a que tiene más probabilidad de representar las condiciones físico-químicas en una celda de flotación. Si las concentraciones de los reactivos pueden ser medidas rápidamente y aplicar medidas correctivas ajustando las concentraciones de los reactivos o las condiciones de operación, el control puede ser preventivo. El desarrollo de este tipo de control ha sido muy lento debido a una gran variedad de razones, estas incluyen: el efecto no lineal de la concentración de varios reactivos en el grado y la recuperación, la dependencia de la relación concentración-respuesta en el tipo de mineral y la no disponibilidad de sensores adecuados para custodiar el ambiente químico en la planta de flotación. Para poder obtener la mayor ventaja del control de los reactivos de flotación, es necesario tener un entendimiento completo de la

acción de los reactivos utilizados. Muchos laboratorios han llevado a cabo experimentos para relacionar la concentración de los reactivos con la respuesta del proceso, pero han encontrado muchas dificultades en transportar sus resultados a la planta (Chander, 1988). Se han utilizado muchas hipótesis para explicar que las causas de las discrepancias son las interacciones entre las variables químicas, y los parámetros de operación. La naturaleza irreversible de las interacciones entre los sulfuros minerales y los reactivos también contribuyen a las discrepancias entre las pruebas de laboratorio y el desempeño de la planta.

En el control de plantas de procesamiento de minerales, se han hecho importantes desarrollos en los modelos, las estrategias de control y algoritmos de control mientras que las investigaciones en el área de sensores químicos, especialmente para monitorear especies en solución, ha sido lento.

Uno de los adelantos que se han logrado en el control de reactivos de flotación, es la optimización en el consumo de reactivos mediante modelos físico-químicos, que se basan en la composición iónica de la pulpa y el mecanismo de los reactivos de flotación. Estos modelos representan una dependencia cuantitativa de las concentraciones de reactivos bajo condiciones óptimas de operación (Abramov y Avdokhin, 1988).

Estos modelos de adición de reactivos nos permiten controlar la adición de colector, por ejemplo, determinando la cantidad de éste que se ha consumido en un determinado tiempo de flotación. De esta manera la adición del colector quedaría en función de la cantidad de mineral de valor que quede en la celda, así como la concentración de colector residual.

En la mayoría de las plantas de procesamiento se han instalado equipos de análisis químicos en línea con el objetivo de realizar la determinación de los contenidos metálicos del mineral procesado así como de los concentrados y las colas del proceso. Estos equipos se utilizan actualmente como lazo de control para adicionar reactivos en los circuitos de flotación y como monitoreo de ensayos para el cálculo de balances metalúrgicos y de materia en línea.

Con este equipo se pretende tener el conocimiento del estado del sistema para poder tomar acciones correctivas en la adición de reactivos de flotación en el momento en que se llevan a cabo las variaciones de las leyes de los minerales. De esta forma mejorar la calidad del concentrado y disminuir los costos por la optimización de la adición de los reactivos de flotación.

Se ha mencionado que otra parte importante del control de procesos es el desarrollo de modelos matemáticos que describan el comportamiento de este proceso y que se han venido desarrollando con éxito (Bouajila y Gagnon, 2000). De cualquier forma el modelamiento del proceso de flotación para el control de la adición de reactivos es complejo debido a la cantidad de variables que intervienen. Por ejemplo, la señal de salida hacia una bomba de adición de colector, depende del contenido metálico del metal en la corriente de interés, el por ciento de sólidos de la corriente y el tipo de mineral.

Para solucionar este problema se han utilizado modelos estadísticos que relacionan la ley de alimentación, el tonelaje de alimentación y la dosificación de reactivos para generar una señal de salida en ml/min hacia una bomba dosificadora. Otra de las opciones para dar solución al problema de la dosificación de reactivos de flotación es la creación de tablas de adición de reactivos a diferentes leyes de alimentación. Estas tablas se construyen en base a experimentación y experiencia de los metalurgistas y operadores del proceso.

Los objetivos de la adición automática de los reactivos de flotación pueden ser muy variados. Algunos de ellos pueden ser el control del grado y la recuperación de los minerales de interés, la mejora en la recuperación económica mediante la obtención de un mejor grado o una mejor recuperación y por último, como ya se dijo anteriormente, la disminución en los costos de producción de concentrado.

Una vez que se ha definido el objetivo del sistema de control de reactivos en la planta de procesamiento, es posible hacer una lista de los requerimientos para realizar el control: equipo de instrumentación, la información necesaria para crear un esquema lógico de

control, información del esquema químico manejado en el proceso, conocimiento del tipo de mineral que se procesa.

Los modelos de adición de reactivos se pueden clasificar en empíricos y fenomenológicos. Los modelos empíricos se crean en base a datos estadísticos de los ensayos, tonelaje procesado y dosificación de reactivos en cada punto de adición. Este tipo de modelos, como es lógico pensar, solamente son útiles en el proceso para el cual fueron creados y son válidos en la región donde fueron calibrados, por lo tanto no pueden ser transportados a otros procesos en otras plantas de beneficio.

En cambio en los modelos fenomenológicos se toman en cuenta los fenómenos químicos y fisicoquímicos que intervienen en el proceso de flotación. De esta forma se generan modelos que calculan la dosificación de los reactivos según el estado en el que se encuentra el proceso. La ventaja de utilizar modelos fenomenológicos es el rango tan amplio de aplicación, sin embargo su desarrollo requiere períodos largos de tiempo a un alto costo. Las variables que influyen en la cantidad de reactivo a dosificar para este tipo de modelos son la granulometría, la cantidad y el tipo de impurezas, la ley del metal de valor en la corriente analizada, el flujo de alimentación, pH de la pulpa, y por ciento de sólidos.

3.5.1. Control del grado y la recuperación en el proceso de flotación

En la literatura se reportan algunos esquemas de adición de reactivos orientados al control del grado y la recuperación de concentrados mediante el proceso de flotación (Hales, 1989). El objetivo de estos esquemas de adición de reactivos es mantener el grado y/o la recuperación en un punto establecido por la empresa.

Como puede observarse en las figuras 3.7 y 3.8, es posible controlar el grado y la recuperación de los productos de la flotación mediante esquemas de adición de reactivos de flotación. Este tipo de esquemas funcionan como un tipo de control retroalimentado, ya

que se espera a saber si el grado o la recuperación sube o baja para realizar cualquier acción correctiva. A este tipo de esquemas de control se les llama control de optimización. Existen también algunos tipos de esquemas de adición de reactivo en los cuales no se utiliza la retroalimentación. Estos esquemas se utilizan para mantener estable el grado y/o la recuperación de los concentrados. A estos esquemas se les denomina control de estabilización.

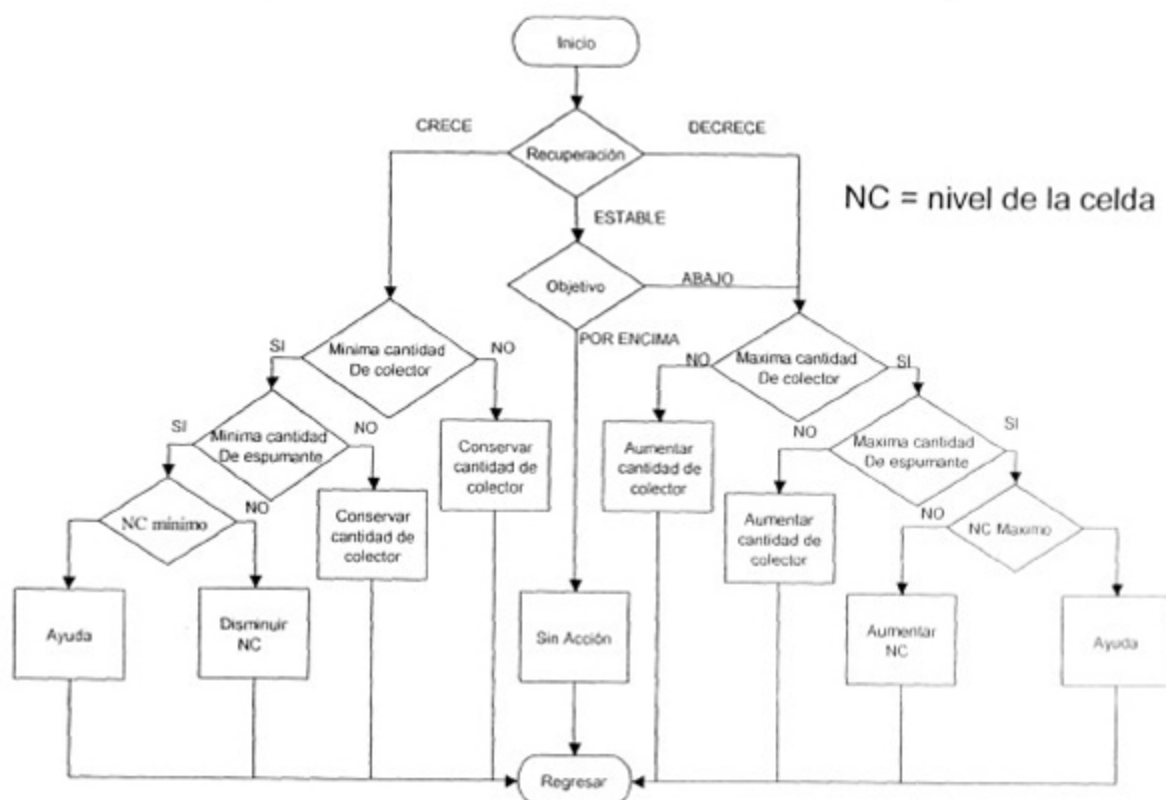


Figura 3.7. Esquema de adición de reactivos para el control de la recuperación del mineral de valor en un proceso de flotación. (Zaragoza, 1988).

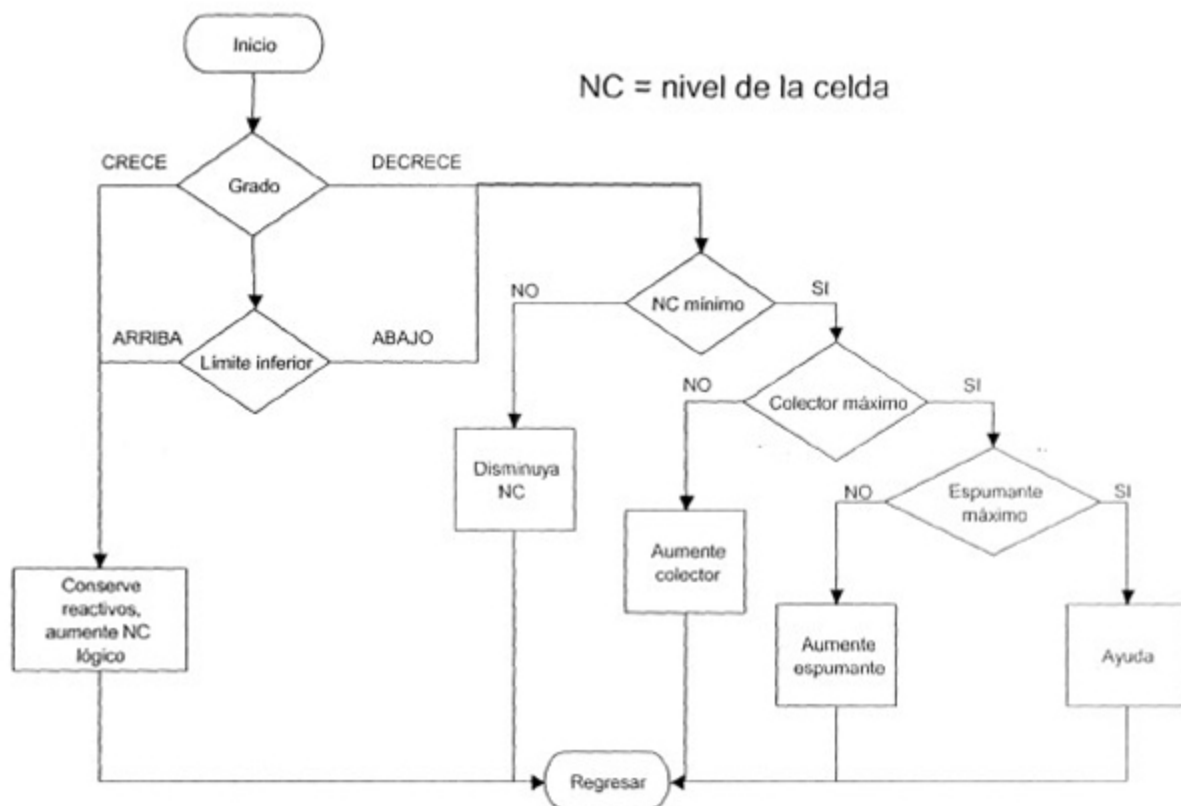


Figura 3.8. Esquema de adición de reactivos para el control del grado en los concentrados del proceso de flotación. (Zaragoza, 1988).

El objetivo de los sistemas de control de estabilización del grado y la recuperación son disminuir los costos por consumo de reactivos de flotación. Estos costos se minimizan al unificar los criterios de dosificación de los diferentes operadores.

Por otra parte, el objetivo principal de los esquemas de optimización del grado y la recuperación son maximizar las ganancias económicas del proceso. Como puede verse en los diagramas de adición de reactivos para el control del grado y de la recuperación, es muy importante saber cuales son las metas de la compañía para tomar las acciones de control correspondientes. Estos objetivos se fijan tomando en cuenta los precios actuales de los metales.

Existen ocasiones en que es benéfica la obtención de un mejor grado con una recuperación aceptable o una mayor recuperación con un grado mínimo aceptable. Estos casos se dan

según la conveniencia económica de la empresa, la cual establece los objetivos en el grado y la recuperación. La figura 3.7 muestra un esquema de control de la recuperación mediante la dosificación de reactivos como colector y espumante.

El esquema de la figura 3.8. nos muestra la forma como con el control de los colectores o espumantes se puede mantener el grado del producto en un punto predeterminado. Es obvio que para implementar este tipo de sistemas de control es necesario tener un sistema estable. Para esto, los sensores y actuadores del sistema deben operar correctamente. De otra forma el sistema podría desestabilizarse y como consecuencia el sistema de control completo quedaría fuera de operación.

3.5.2. Control de la recuperación económica

Para ejemplificar esta estrategia de control se muestra la figura 3.9. En esta figura se presenta el diagrama de flujo para modificar el grado o la recuperación del producto mediante el aumento o la disminución de reactivos en el proceso. Es importante resaltar que en muy raras ocasiones se maneja de una forma tan simple este problema, existen muchos otros factores que intervienen en el control de la recuperación económica; la mayoría de estos otros factores tienen que ver más con la conveniencia de la empresa que con el proceso de control en si.

Es muy importante notar de la figura 3.9 que se está tomando en cuenta el valor económico de los metales, la cantidad y la calidad de estos metales que se está recuperando. Para poder hacer un sistema de control automático de estas características es necesario tener disponible la información acerca del costo de los metales en el mercado mundial. Además de toda la información para hacer las evaluaciones técnicas necesarias para determinar la causa de la disminución en la eficiencia económica.

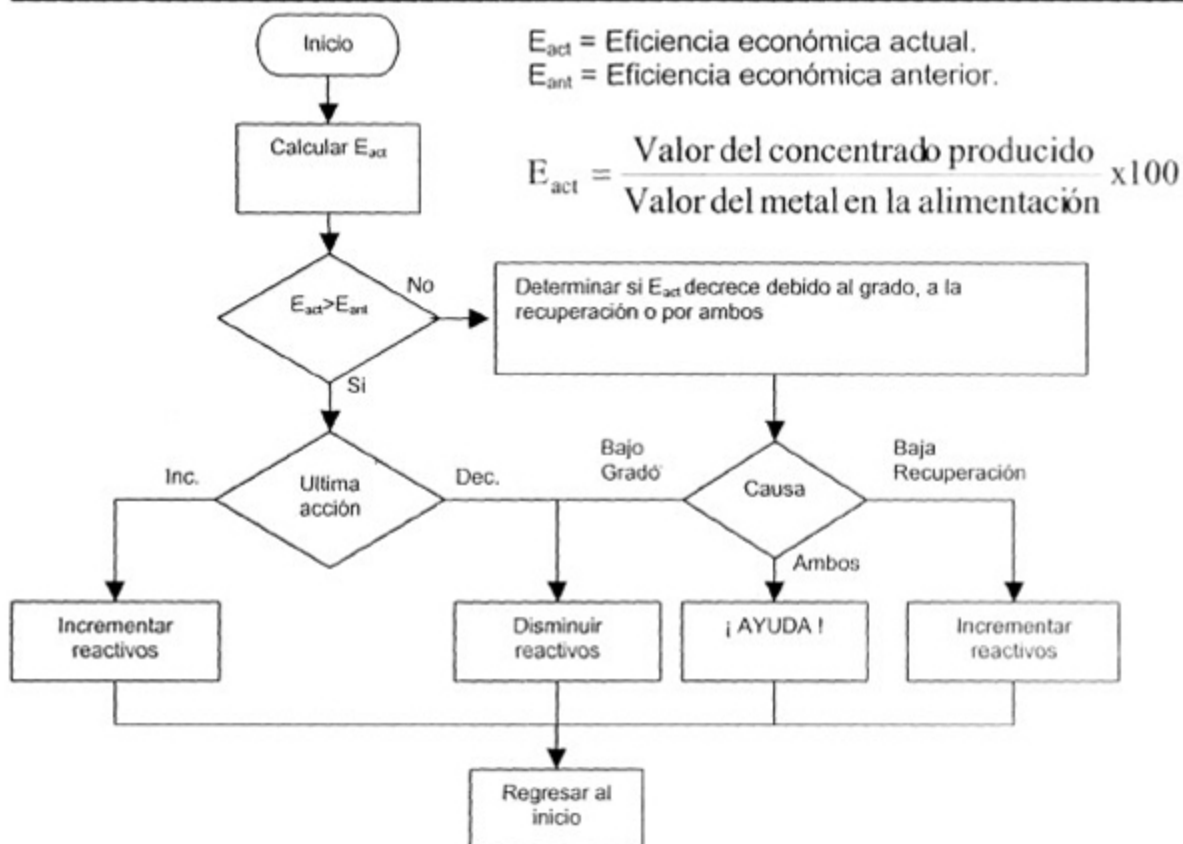


Figura 3.9. Diagrama de control de la recuperación económica mediante el aumento del grado o la recuperación del producto (King, 1973).

Por la forma en como este diagrama maneja el control en la adición de reactivos parece ser muy simple un control de este tipo. Pero en la practica este sistema de control tiene muchos problemas tanto de operación como de retardo (en la venta del concentrado). Dependiendo del precio de la libra de Zn, podría ser conveniente aumentar la recuperación para obtener mejores ganancias. Si el concentrado que se produjo cuando el precio de Zn se encuentra alto no se vende y el precio del Zn baja. La empresa habrá perdido la inversión hecha en el reactivo dosificado para aumentar la recuperación. Por lo tanto su costo de operación será mayor. Por esta razón este esquema de control económico se emplea en empresas que tienen clientes fijos a quienes vender su concentrado. De esta forma aseguran la disminución de las perdidas debido al producto en los patios de almacenamiento.

Capítulo 4.

Desarrollo del sistema de control de dosificación de reactivos

El sistema de dosificación de reactivos instalado en la unidad minera Tizapa se basa en los contenidos metálicos en la alimentación a flotación. Estos contenidos se calculan con las lecturas en línea del analizador de partículas AMDEL y el tonelaje de alimentación a molienda.

Este sistema de dosificación está compuesto por los siguientes elementos: el hardware de control (computadoras y PLC), sensores (Analizador en línea AMDEL y Pesómetros), actuadores (bombas dosificadoras) y software (sistema de análisis AMDEL, sistema operativo y programa de control CoReact). Estos elementos coinciden con el modelo del triángulo de control para los sistemas de control modernos descritos en el capítulo 3.

La estructuración del sistema de comunicación entre el analizador de partículas, el programa de control y las bombas dosificadoras se convirtió en el problema principal a resolver. Gran parte del tiempo de duración del proyecto fue se dedicó a esta tarea. En esta sección se verá la forma en la cual se llevó a cabo esta comunicación entre dispositivos, así como la configuración del sistema de análisis para su implantación.

4.1. Analizador de partículas en línea

La unidad Tizapa cuenta con un analizador de partículas en línea AMDEL Modelo Gamma-EDX (ver tabla 3.3), el cual se encuentra instalado en una cabina separada del proceso. Las muestras de mineral de cada corriente son llevadas al analizador mediante un sistema de tuberías instalado a través de toda la planta y se depositan en cajones agitados. Cada corriente es analizada por una sonda que viaja de un cajón a otro. En la figura 4.1, se muestran los cajones agitados y la sonda de analizador.

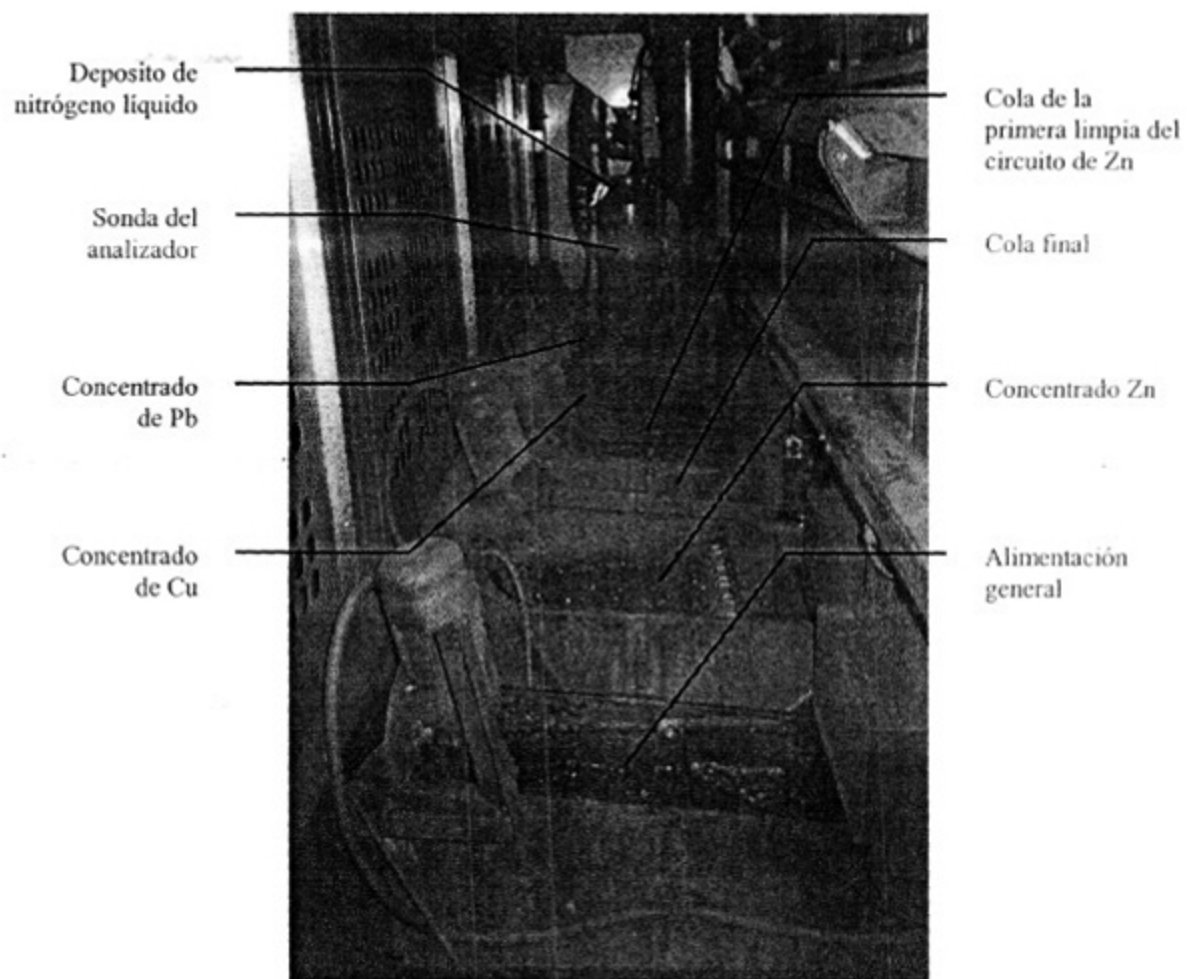


Figura 4.1. Cajones agitados y sonda del analizador de partículas en línea AMDEL.

El orden en el cual se realizan los análisis de las corrientes por el analizador AMDEL es el siguiente:

1. Concentrado de Pb.
2. Concentrado de Cu.
3. Cola de la primera limpia del circuito de Zn
4. Cola final.
5. Concentrado de Zn.
6. Cabeza general.

La sonda de análisis químico en línea cuenta con un sistema de lavado con agua. Este sistema se activa después de cada medición para asegurar que la medición siguiente no se contamine con la muestra anterior. Es muy importante hacer notar que aparte del sistema de lavado de la sonda, el orden en el cual son analizadas las corrientes de pulpa de los circuitos de flotación interviene en la exactitud de los ensayos. Por ejemplo, si el sistema de lavado falla, el analizar la cabeza general inmediatamente después de analizar el concentrado de Zn puede provocar lecturas de Zn mucho mayores que los valores reales. Una de las posibles soluciones podía ser la instalación de sondas dedicadas. Esto evitaría la contaminación de las muestras con la desventaja del incremento en el costo del equipo y el costo de mantenimiento.

La sonda del analizador cuenta también con un sistema de enfriamiento, el cual funciona con nitrógeno líquido. Cuando el nivel de nitrógeno baja en el tanque, la sonda se detiene automáticamente y se produce un error en el servidor de datos AMDEL.

Los ensayos obtenidos por el analizador se almacenan en una base de datos de dBase que corre sobre una plataforma Windows NT Server v.4.00 denominado Servidor AMDEL. El servidor AMDEL corre una aplicación de control de la sonda el cual muestra el estado de la sonda así como los ensayos obtenidos en cada corriente. Es posible también realizar otras operaciones como programar secuencias de muestreos para la calibración de la sonda, detección de fallas en el sistema de análisis, y programar los cortadores automáticos para el laboratorio entre otras.

4.2. Programa de control de reactivos

En la figura 4.2 se muestra el esquema lógico del sistema de control de reactivos. Como puede verse este sistema está formado por tres elementos los cuales se mencionaron en la sección 3.1. El programa de control de reactivos CoReact es el encargado de manipular la información obtenida del analizador en línea y del pesómetro colocado en la alimentación a los molinos y dosificar la cantidad de reactivos calculada en base al contenido metálico

de la alimentación a flotación. Este programa de control está compuesto por seis módulos independientes, los cuales se comunican entre si mediante una conexión TCP/IP.

Cada uno de estos módulos juega un papel importante en la manipulación de la información que procesa el sistema CoReact. Las funciones de estos módulos van desde la captura de información hasta la dosificación directa de reactivos mediante señales analógicas de 4-20mA

Como puede verse en la figura 4.2, los módulos que componen este programa de control son los siguientes.

1. BDD AMDEL.
2. Servidor ADAM.
3. Programa principal CoReact.
4. Tablero.
5. Captura.
6. Consulta.

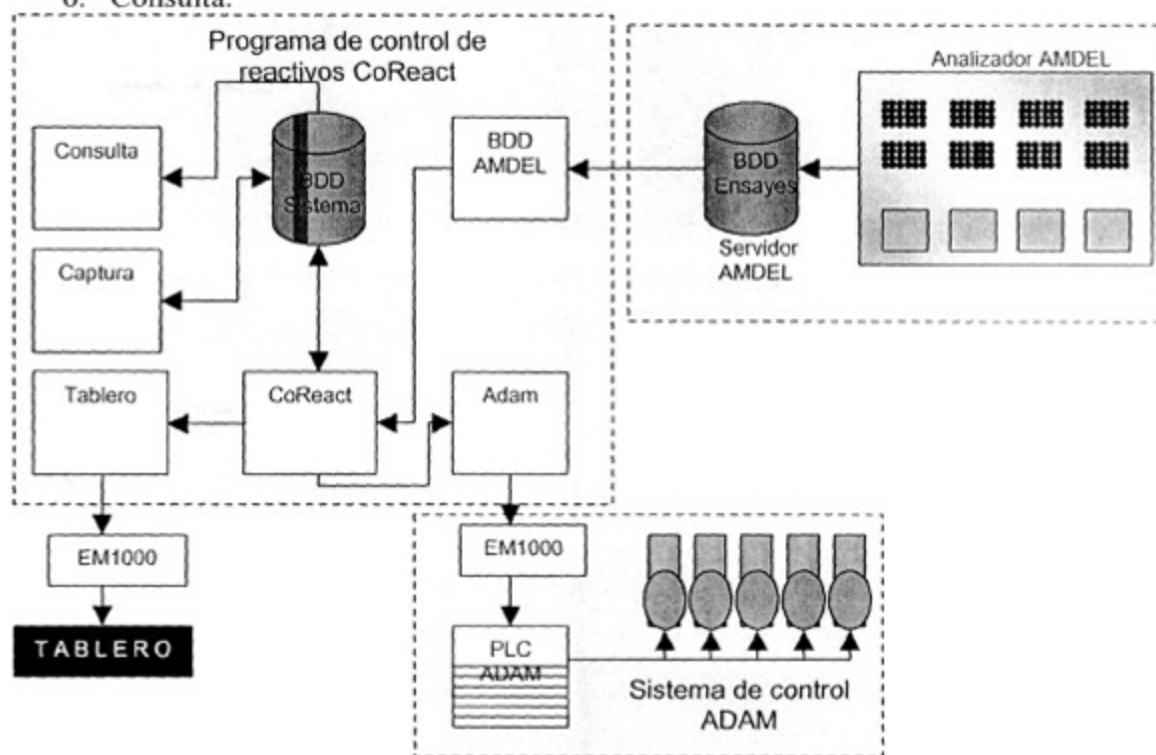


Figura 4.2. Diagrama de relaciones lógicas en el sistema de control de adición de reactivos.

4.2.1. Módulo “BDD AMDEL”

El módulo denominado BDD AMDEL, es un programa servidor de datos que obtiene los ensayos de la base de datos creada por el servidor AMDEL. Es importante hacer notar la diferencia entre el servidor de base de datos AMDEL y el módulo BDD AMDEL. El primero, es el servidor instalado para controlar la sonda del analizador y almacenar los ensayos devueltos. El segundo es un módulo creado para obtener los datos desde el módulo llamado “servidor ADAM” y alimentar con estos al programa principal CoReact. Esta relación se puede observar en la figura 4.2.

El módulo BDD AMDEL utiliza la arquitectura cliente servidor para transmitir los ensayos de la base de datos AMDEL al programa principal CoReact. Para tal función se utiliza el protocolo TCP/IP. Gracias a esta capacidad de comunicación, este módulo puede ejecutarse en una computadora ajena al sistema de control sin tener problemas mayores.

El defecto principal de este módulo es la forma en la cual obtiene los datos del servidor AMDEL. Esta comunicación se realiza mediante un mapeo directo al disco duro del servidor AMDEL y no mediante algún protocolo de comunicación. Esta forma de comunicación ha provocado errores graves en el sistema de control de reactivos. Como por ejemplo en una caída de corriente, las unidades virtuales se pierden y los operadores no están capacitados para realizar una nueva conexión con el servidor. Por lo tanto la dosificación queda temporalmente en modo manual.

4.2.2. Programa principal CoReact

El módulo CoReact es el componente principal en el programa de control de reactivos. Este módulo se encarga de procesar toda la información que genera el sistema para convertirla en señales de control hacia las bombas dosificadoras.

La forma como este módulo procesa la información se discutirá en el capítulo 7. Como se puede ver en el diagrama de la figura 4.3, el módulo BDD AMDEL, envía los ensayos obtenidos del analizador hacia el módulo CoReact, éste los almacena en una base de datos temporal y mediante los modelos de dosificación genera el valor de la dosificación para cada reactivo en el sistema, este valor está dado en ml/min. Este valor se convierte en mA mediante los modelos de calibración de las bombas dosificadoras, y por último el programa principal envía este valor en mA al servidor ADAM para que este envíe la señal de control (4-20mA) hacia las bombas dosificadoras.

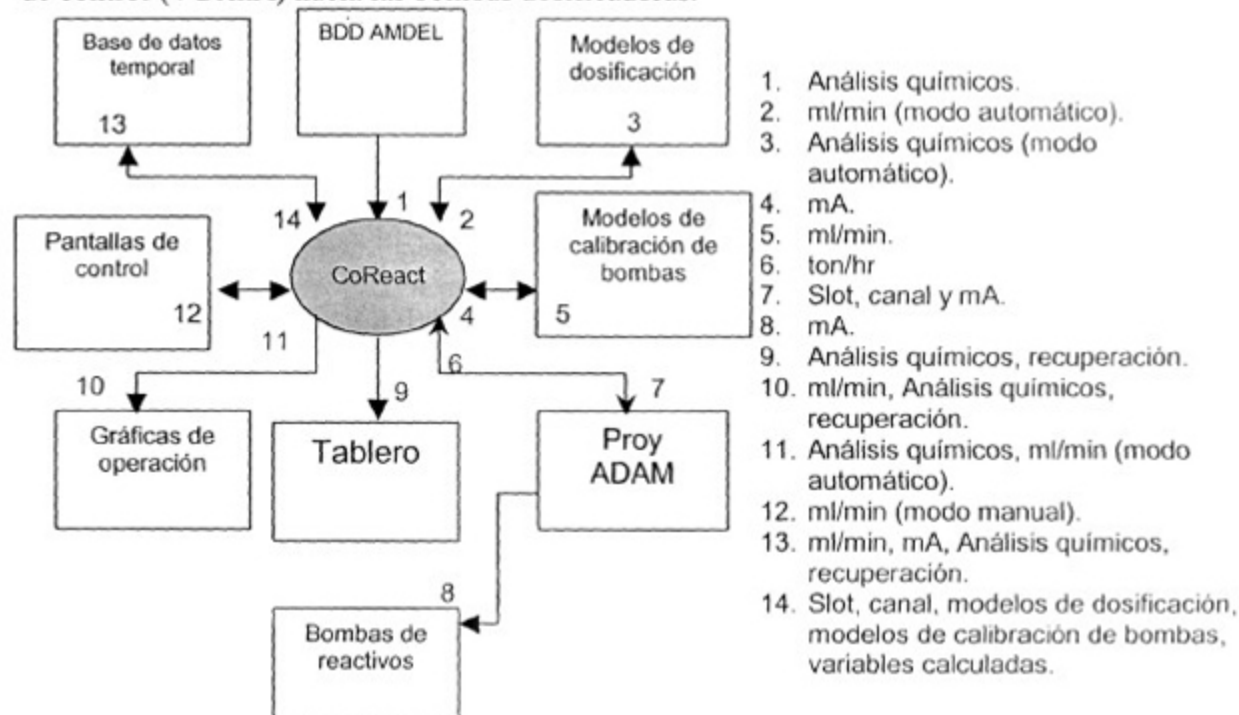


Figura 4.3. Diagrama lógico de funcionamiento del módulo CoReact . A la derecha se muestra la información que se intercambia entre los diferentes nódulos de este programa.

El módulo CoReact también está encargado de enviar la información que se muestra en el tablero así como la información para las gráficas del proceso que se generan en pantallas del mismo módulo.

Las pantallas de control que se encuentran en éste módulo, son la interfase entre el operador y el sistema de control. Estas pantallas de control muestran el diagrama de cada

circuito y los controles para cada uno de los reactivos que se manejan en el sistema. Cuando algún reactivo se encuentra en modo automático, el operador no puede modificar la adición del reactivo. En modo manual el operador tiene la libertad de modificar la cantidad de reactivo que se adiciona. Es por esta razón que los modelos de adición de reactivos solamente se utilizan en modo automático, de otra forma la dosificación se obtiene mediante las pantallas de control. En la figura 4.4 se muestra la pantalla de control para el circuito de Zn.

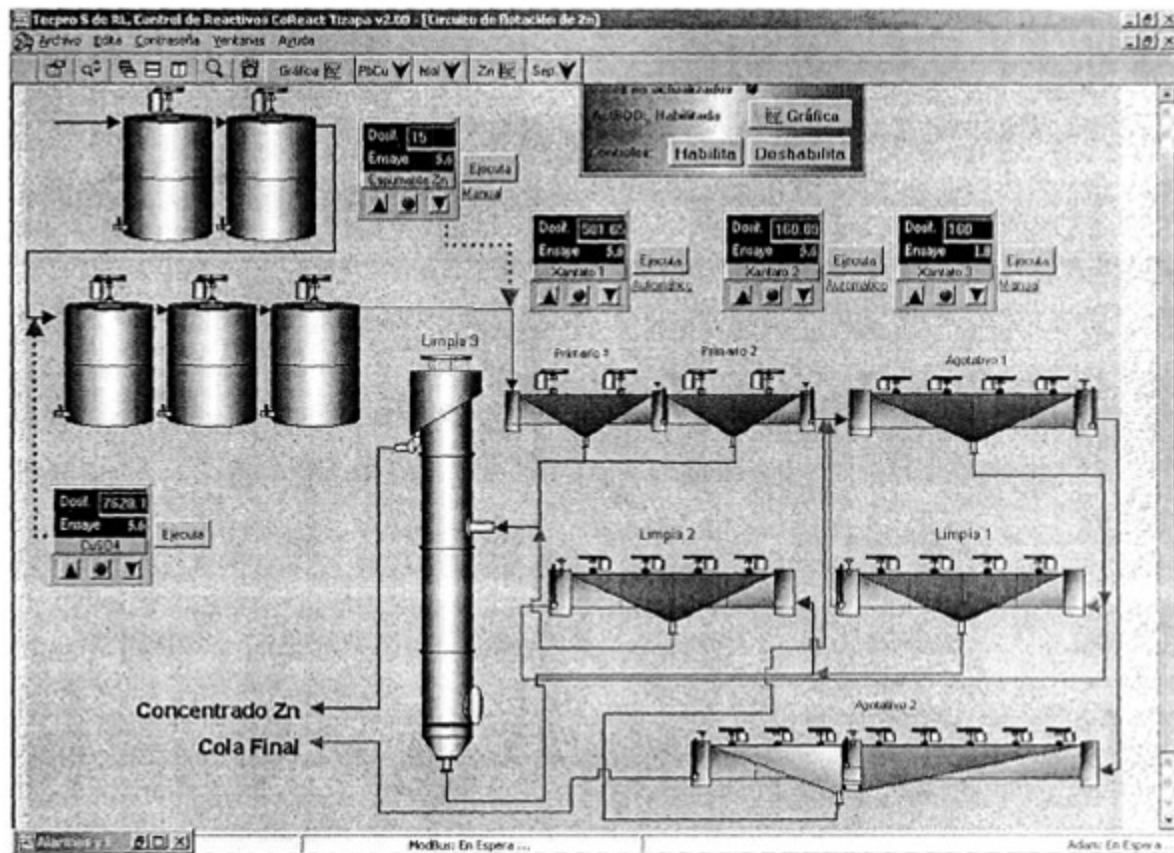


Figura 4.4. Pantalla de control de adición de reactivos para el circuito de flotación de Zn.

El programa de control recibe los ensayos del módulo BDD AMDEL y los almacena en la base de datos temporal. El módulo "proy Adam" se encarga de obtener el tonelaje de alimentación a los molinos y lo envía al programa principal. Con esta información el programa principal ejecuta los modelos de dosificación que se encuentran almacenados en

la base de datos temporal. Con la dosificación calculada se alimenta a los modelos de calibración de las bombas dosificadoras para obtener los mA. Que se deben enviar a las bombas. Esta información se envía mediante el módulo Proy Adam hacia las bombas dosificadoras.

Este programa tiene una interfaz gráfica para el usuario. En la figura 4.4, se muestra la pantalla de control que utilizan los operadores para manipular la dosificación. En esta pantalla de control, el operador puede ver la cantidad de reactivo que se está dosificando en cada circuito, además del contenido metálico de interés en la corriente de alimentación.

El contenido de esta pantalla de control puede ser modificado desde el Módulo de captura. Se pueden agregar o quitar elementos tales como:

- Etiquetas
- Variables del proceso (tonelaje, dosificación, recuperación, grado, etc)
- Cuadros de control
- Mapas de bits

Cada reactivo se maneja por separado mediante un cuadro de control. Estos cuadros de control se pueden operar en tres modos diferentes: Manual, Automático y Deshabilitado. El operador es el encargado de cambiar el modo de operación de cada reactivo en el proceso.

Es muy importante notar que éste módulo tiene comunicación con todos los demás módulos que componen el programa de control de reactivos. Por esta razón, el sistema se detiene completamente si alguno de los módulos principales no funciona correctamente. Estos módulos principales son el módulo BDD AMDEL y el servidor ADAM. El sistema puede funcionar correctamente si el módulo de tablero se encuentra fuera de operación ya que éste es un módulo de salida únicamente y no interviene en el proceso de control.

Uno de los problemas más grandes encontrados en este módulo es la imposibilidad de realizar cambios en la configuración sin reiniciar todo el sistema. Tomando en cuenta que

al reiniciar el sistema las bombas de reactivos quedan sin control por un instante, cualquier cambio en la configuración debe hacerse rápidamente.

4.2.3. Módulo “Servidor ADAM”

El modulo ADAM tiene dos funciones principales dentro del sistema de adición de reactivos. La primera es adquirir el tonelaje de alimentación a los molinos para determinar, junto con la ley obtenida por el analizador, el contenido metálico de la alimentación a flotación. Para esto se comunica con el PLC ADAM, que tiene instalada una tarjeta de entrada de 0-20mV. La información del tonelaje proviene del sistema de control regulatorio y se envía al PLC ADAM mediante una conexión paralela.

La otra función del módulo Proy Adam es enviar las señales de control a las bombas dosificadoras. Cada una de estas bombas se encuentra conectada a tarjetas de salida de 4-20mA. Existen cuatro tarjetas y cada una de estas tarjetas cuenta con cuatro salidas. Por lo tanto es posible controlar un máximo de dieciséis bombas simultáneamente.

A cada una de las bombas se le asigna una dirección dada por slot y canal. El número de slot es la ranura en la cual se encuentra insertada la tarjeta de salida, y el canal es el número de la salida en la tarjeta. La numeración del slot y del canal comienza con cero.

Para realizar la transmisión de la señal de control hacia las bombas dosificadoras, el servidor ADAM recibe la petición de envío desde el programa CoReact. Esta señal se transmite por un puerto serie y contiene la dirección de la bomba así como el amperaje a enviar.

Existe la posibilidad de enviar una señal en forma manual hacia las bombas dosificadoras. Esta característica resulta de mucha utilidad al momento de realizar la calibración de las bombas dosificadoras.

4.2.4. Módulo “Tablero”

El módulo Tablero, obtiene los ensayos del módulo CoReact y los envía mediante una conexión física al tablero electrónico. La comunicación entre el módulo Tablero y el Tablero físico se hace mediante la conexión a la red de área local (LAN), y se convierte a RS-482 mediante un módulo llamado EM1000.

Este módulo es uno de los llamados secundarios, ya que no juega un papel determinante en el control de la adición de reactivos.

4.2.5. Módulo “Captura”

En este módulo se introduce la configuración del sistema de adición de reactivos. Ésta configuración incluye la distribución de los controles en la pantalla, la información que aparece en las pantallas de control, la información que aparece en las gráficas de adición de reactivos, los modelos de dosificación, los modelos de calibración de las bombas y cada uno de los elementos que aparecen en los módulos mencionados anteriormente.

El contenido de esta base de datos está disponible únicamente para los módulos de captura, consulta y CoReact. Los demás módulos obtienen ésta información mediante el módulo principal CoReact. Es importante notar que absolutamente toda la información que se maneja en el programa de control de reactivos se encuentra almacenada en dicha base de datos, por lo tanto cualquier falla en este módulo detiene completamente el sistema.

Ningún módulo del programa de control puede actualizarse en línea. Esto quiere decir que al momento de realizar un cambio en el módulo de captura, es necesario reiniciar el programa para poder actualizar los cambios.

4.2.6. Módulo “Consulta”

Este módulo está diseñado para generar consultas a la base de datos del sistema. Es en este módulo donde puede consultarse el historial de dosificaciones así como los cambios hechos por el operador durante cada turno.

En resumen, este módulo muestra un historial de todas las variables declaradas en el módulo de captura.

Este es uno de los módulos secundarios del programa de control de reactivos. Cualquier error provocado por este módulo es ignorado por el sistema.

4.3. Hardware de control

El hardware de control está formado por una computadora personal HP modelo KAYAK XM6000 con un microprocesador Pentium III a 730MHz y 128 Mb en RAM, y un PLC ADAM con cuatro tarjetas analógicas de cuatro puertos de salida cada una. Estos dispositivos se comunican entre si mediante protocolos de comunicación serial y TCP/IP. Estos protocolos están soportados por la plataforma Windows 2000 de Microsoft.

El procesamiento de los datos obtenidos por el analizador en línea se procesan en la PC y posteriormente se envía una señal de control hacia el PLC, la comunicación se realiza a través de la red de área local y se convierte a RS-232 mediante módulos EM1000. El PLC transmite la señal de control en mA hacia las bombas dosificadoras mediante un par trenzado de cobre.

4.4. Organización de las pantallas de control en el sistema de control de reactivos

Debido a que en el momento de instalar el programa de control, las pantallas no se encontraban configuradas de manera adecuada para cada circuito, se procedió a acondicionarlas para que el manejo de los controles fuera más fácil de utilizar para los operadores.

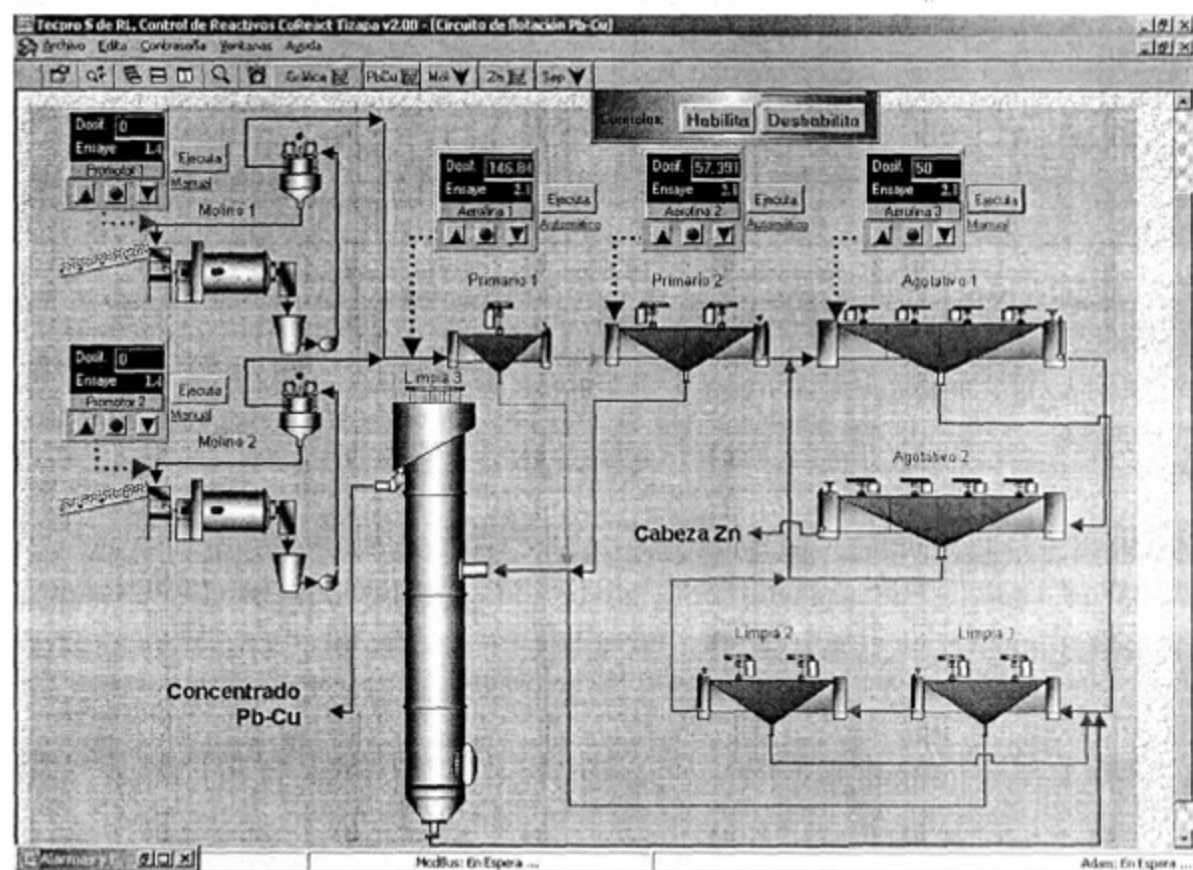


Figura 4.5. Pantalla de control de adición de reactivos para el circuito de flotación Pb-Cu.

Las pantallas de control son de mucha importancia dentro del sistema de control ya que estas son la interfase entre el sistema de adición de reactivos y los operadores del proceso. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran las pantallas de control para los circuitos de Zn y flotación Pb-Cu.

La pantalla de control para el circuito de separación Pb-Cu no se ha colocado en el sistema debido a que no se tiene control sobre los reactivos adicionados a este circuito.

Capítulo 5.

Recopilación y análisis de la información del proceso

5.1. Recopilación de los ensayos de laboratorio, las lecturas del analizador AMDEL y las dosificaciones de reactivos del período de agosto de 2000 a enero 2001

Para obtener la información necesaria, con la cual se pudieran calcular los modelos de dosificación para los diferentes reactivos en los circuitos de Pb-Cu y Zn, se crearon archivos de hoja de calculo en Excel con la información obtenida de los reportes diarios del laboratorio y de las bases de datos que genera el analizador AMDEL, así como de los reportes diarios de operación.

Las bases de datos generadas por el analizador AMDEL se encuentran indexadas por hora y fecha. Debido al funcionamiento del sistema de muestreo del analizador, existe un tiempo de retardo de 6 minutos para cada dato reportado por el analizador para la misma corriente. Los reportes del laboratorio están elaborados por turno, cada uno de 12 horas. Por esta razón se realizaron promedios por turno de las lecturas reportadas por el analizador. El primer turno de 12 horas comienza en la lectura inmediata a las 5:00 hrs. y termina en la lectura anterior a las 17:00 hrs. , el segundo turno comienza en la lectura inmediata a las 17:00 hrs. y termina en la lectura anterior a las 5:00 hrs. Los horarios para el calculo de los promedios por turno de las lecturas del analizador se tomaron del horario de muestreo del laboratorio.

Debido a errores en la operación del analizador en línea AMDEL, algunos de los valores reportados por este son negativos. Esto sucede cuando el porcentaje de sólidos está por debajo de lo normal para la corriente analizada o cuando no hay muestra para analizar en

el cajón de muestreo. Los valores negativos reportados fueron eliminados junto con todos los valores correspondientes a la misma lectura por ser considerados erróneos todos ellos.

La información correspondiente a la dosificación de los reactivos de flotación para los circuitos de Pb-Cu y Zn se recopiló de los reportes diarios de operación. Las lecturas de dosificación para cada punto de dosificación se reporta cada dos horas. Por lo tanto se calculó la media de dosificación por turno para hacer corresponder estos datos con los obtenidos de las lecturas del analizador en línea y de los reportes de laboratorio.

La información de los ensayos por turno del laboratorio y los promedios por turno calculados a partir de las lecturas del analizador se utilizaron para realizar un análisis comparativo con el cual se puede determinar la confiabilidad de las lecturas del analizador en línea AMDEL.

Se obtuvieron entonces los ensayos de Fe, Cu, Pb, Zn, para el concentrado de Cu, Pb, Zn, cola final, y cabeza general. También se obtuvieron las dosificaciones de Aerofina 3418, Xantato 350, Promotor 404 y CuSO_4 . Además del tonelaje de alimentación a los molinos.

5.2. Análisis de datos para determinar la exactitud de los ensayos del equipo AMDEL

Se realizó un análisis estadístico para determinar la exactitud del equipo AMDEL con respecto a los ensayos de laboratorio. Para este análisis se utilizaron los datos recopilados del proceso. Los resultados de este análisis se muestran en el anexo 1.

En la realización de este análisis estadístico se realizaron pruebas de hipótesis sobre las medias de las muestras ensayadas por el laboratorio y el analizador de partículas. Para este propósito se utilizaron los estadísticos Z y t .

Debido al gran número de datos obtenidos en el período de agosto 2000 a enero 2001, se utilizó el método de comparación de pares de medias de dos poblaciones mediante dos muestras aleatoriamente independientes. Puesto que en este tipo de análisis las poblaciones no son necesariamente del mismo tamaño. Para este método se suponen varianzas iguales para ambas poblaciones. Esta suposición es muy importante porque el procedimiento de prueba que se utilizó no es robusto con respecto a esta suposición, a menos que las dos poblaciones sean de tamaño muy grande. Para esto se utilizó el estadístico:

$$Z_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - \delta_0}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n} + \frac{S_p^2}{m}}} \quad [5.1]$$

donde δ_0 es la diferencia hipotética entre medias, para las pruebas realizadas $\delta_0 = 0$, n y m son los números de las muestras de las poblaciones 1 y 2 respectivamente. S_p^2 es la varianza ponderada y se define como:

$$S_p^2 = \frac{(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2}{n+m-2} \quad [5.2]$$

Para la comparación de los resultados del muestreo del analizador se utilizó el método de las medias de dos muestras usando muestras apareadas. Se obtuvieron un máximo de quince muestras en algunas corrientes, por esta razón se utilizó el estadístico t . En este método, se asume que el número de elementos de la muestra 1 es igual al de la muestra 2. Para el análisis estadístico definimos las siguientes variables aleatorias:

$$D_i = X_i - Y_i; i = 1, 2, \dots, n \quad [5.3]$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{n}(\bar{D} - \delta_0)}{S_D} \quad [5.4]$$

El juego de hipótesis utilizada fue el siguiente:

$H_0 : \mu_{Lab} = \mu_{AmdeI}$ en oposición a $H_a : \mu_{Lab} \neq \mu_{AmdeI}$ sujeto a la siguiente regla de decisión

Rechazar H_0 si $t_0 \geq t_{\alpha/2}(n-1)$ o $t_0 \leq -t_{\alpha/2}(n-1)$.

5.3. Muestreo del analizador AMDEL para determinar la confiabilidad de sus ensayos

Se llevó a cabo el muestreo puntual de las corrientes analizadas por el analizador en línea AMDEL, y se analizaron las lecturas obtenidas para cada muestra con los ensayos obtenidos por el laboratorio. Únicamente se tomaron 15 muestras de las corrientes analizadas por el AMDEL por fallas en el sistema de bombeo al analizador. Para realizar el análisis de confiabilidad del equipo AMDEL se realizó un análisis comparativo de medias con el cual se llegó a la conclusión de que el equipo necesitaba ser recalibrado. Los resultados de este análisis se muestra en el anexo 2.

Las muestras tomadas se analizaron en el CIDT (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico) y en el laboratorio de la unidad TIZAPA. Los resultados del análisis estadístico muestran que existe una diferencia marcada entre los ensayos devueltos por el laboratorio del CIDT y el laboratorio TIZAPA, esta diferencia se puede observar mayormente en el análisis de Zn y Pb, esto deja ver que posiblemente el laboratorio de la unidad TIZAPA tiene algunas deficiencias en sus procedimientos de análisis. Debido a esta situación, tenemos la necesidad de elegir los datos de uno de los dos laboratorios para realizar el análisis de comparación con el analizador. A pesar de la confiabilidad que pudiera tener el laboratorio del CIDT, debido a su carácter de centro de investigación, el laboratorio seleccionado fue el de la unidad TIZAPA. La razón de esto es simple, los ensayos utilizados para la calibración del equipo de análisis provienen del laboratorio TIZAPA, por lo tanto, es lógico pensar que los ensayos del analizador deben coincidir con los ensayos de este laboratorio.

Los resultados del análisis del laboratorio TIZAPA con las lecturas devueltas por el analizador, muestran una diferencia en los ensayos de Pb y Zn en todas las corrientes analizadas. Pueden ser varias las razones por las cuales el analizador AMDEL tiene una desviación tan grande de los ensayos obtenidos por el laboratorio. Una de ellas es la falta de toma de muestras de calibración periódicamente del equipo. Con los cambios en las propiedades mineralógicas del mineral procesado en la unidad, el equipo de análisis en línea AMDEL requiere de un proceso de monitoreo de sus ensayos para determinar la desviación que sufre con el paso del tiempo. Un proceso de calibración periódico evita que la desviación, que siempre se incrementa, llegue fuera de los niveles máximos permitidos. Es imposible por otro lado eliminar totalmente el error del análisis en línea, principalmente por causa de la toma de una muestra representativa por el cortador metalúrgico, sin embargo, este nivel de error se puede mantener en un nivel mínimo. Otra de las razones por las cuales el analizador AMDEL podría tener un error muy grande con respecto al análisis del laboratorio puede ser el mal funcionamiento del sistema de lavado de la sonda, la cual viaja de una corriente a otra. Esto provoca la contaminación de las muestras y por lo tanto el error que se presenta en las lecturas devueltas al sistema de monitoreo.

5.4. Calibración del analizador en línea AMDEL

El equipo AMDEL tiene la capacidad de realizar muestreos de calibración automáticamente. Esto permite que el proceso de calibración sea mucho más sencillo. Los cortes que se realizan a las corrientes devuelven las intensidades de energía que capta la sonda del analizador. Estos valores se almacenan en un archivo de base de datos en el servidor AMDEL. Posteriormente, se ensayan las muestras y se obtienen , mediante un análisis de regresión, las ecuaciones de calibración para cada uno de los ensayos en las corrientes analizadas.

Debido al error de las lecturas de analizador AMDEL, se realizaron muestreos de calibración para generar las ecuaciones de calibración para cada uno de los ensayos devueltos por el analizador. Los archivos que contienen las intensidades y los ensayos del laboratorio se enviaron a la compañía Termo-Gamametrics para ser analizados y se obtuvieron las siguientes ecuaciones de calibración.

Concentrado de Zn.

$$\%Cu = -0.459 + 3.2588 * obj_13 + 0.2611 * obj_19 - 0.5250 * obj_27$$

$$\%Fe = -14.546 + 56.2357 * obj_11 - 3.4389 * obj_27$$

$$\%Pb = 0.668 + 2.5961 * obj_19 + 19.2299 * obj_25 - 3.7672 * obj_27$$

$$\%Zn = -25.966 + 17.7016 * obj_15 + 13.6649 * obj_19 + 16.2470 * obj_27$$

$$\%Sol = 77.997 - 24.7787 * obj_27 - 22.4091 * obj_13$$

Cabeza General:

$$\%Cu = -1.023 + 9.8612 * obj_13 - 2.0194 * obj_27$$

$$\%Fe = 1.793 + 52.6566 * obj_11 - 35.7069 * obj_13$$

$$\%Pb = -1.686 + 9.6000 * obj_19 + 0.8133 * obj_15 - 0.3576 * obj_23$$

$$\%Zn = -2.748 + 27.6845 * obj_15 - 9.1417 * obj_17 + 1.2384 * obj_23$$

$$\%Sol = 70.247 + 34.1251 * obj_27 - 66.7306 * obj_23$$

Donde obj_x es la dirección de la tarjeta que obtiene las intensidades de energía devueltas por cada elemento en la muestra.

Estas ecuaciones se obtuvieron mediante un programa de regresión lineal multivariable llamado RARP de la compañía Termo-Gamametrics.

Debido a problemas mecánicos de los cortadores metalúrgicos del equipo, fue imposible obtener los modelos de calibración de las demás corrientes. De cualquier modo, para el sistema de dosificación de reactivos la corriente principal a ser analizada es la cabeza general, debido a que de acuerdo al contenido metálico en esta corriente se obtiene la cantidad de reactivo a dosificar.

Capítulo 6. Modelos de dosificación y calibración

6.1. Modelos de dosificación de reactivos

Una de las metas de este proyecto de investigación es la creación de modelos empíricos para la dosificación automática de reactivos de flotación. Para esto se obtuvo información de dosificaciones así como de los promedios de ensayos por turno para realizar un análisis de correlación entre las leyes reportadas así como de las dosificaciones realizadas.

Resultó imposible calcular algunos modelos utilizando este método. Por ejemplo, la dosificación de Xantato en el circuito de Zn. La causa de esto fue que no existe correlación entre la dosificación y el contenido metálico de Zn en la alimentación a flotación. Esto quiere decir que los operadores no toman en cuenta los ensayos reportados por el analizador para la dosificación de Xantato. La conclusión a la que se llegó es que los operadores se basan en la apariencia de la espuma de flotación y la recuperación que se obtiene en cada banco de celdas para la dosificación de este reactivo.

El cálculo del contenido metálico en la alimentación se realizó basándose en los ensayos reportados por el laboratorio por considerarse más confiables para este tipo de análisis.

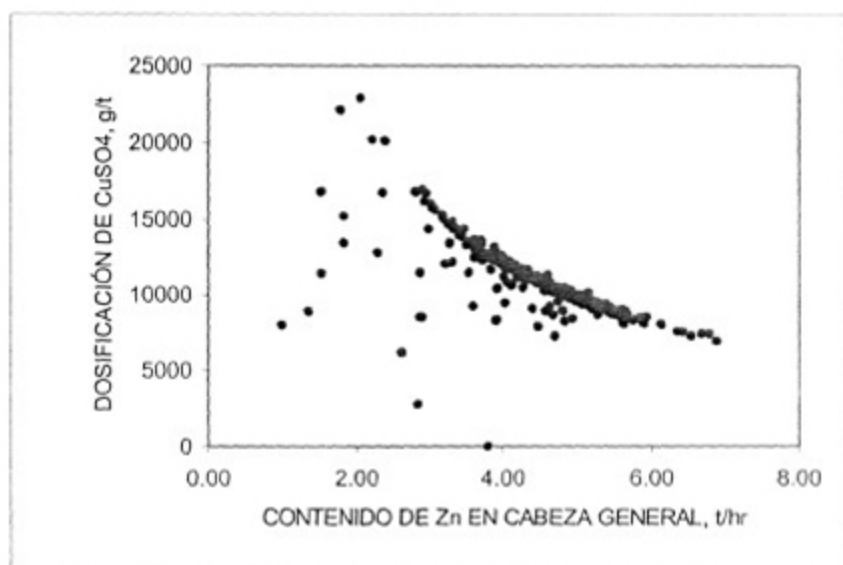
Uno de los problemas principales al momento de analizar la información para crear los modelos de dosificación fue la falta de datos acerca de la dosificación, como se mencionó anteriormente. Por ejemplo, en la dosificación del promotor 404, solamente se tiene el valor de la dosificación total, debido a que solamente se cuenta con una bomba para los dos puntos de adición. En este caso el operador regula la dosificación a cada molino mediante un conector "T" en la punta de la manguera, solamente tiene que inclinar la "T" hacia el lado donde se necesita más reactivo.

A continuación se presentan los modelos obtenidos para la dosificación automática de reactivos en los circuitos de flotación Pb-Cu y Zn.

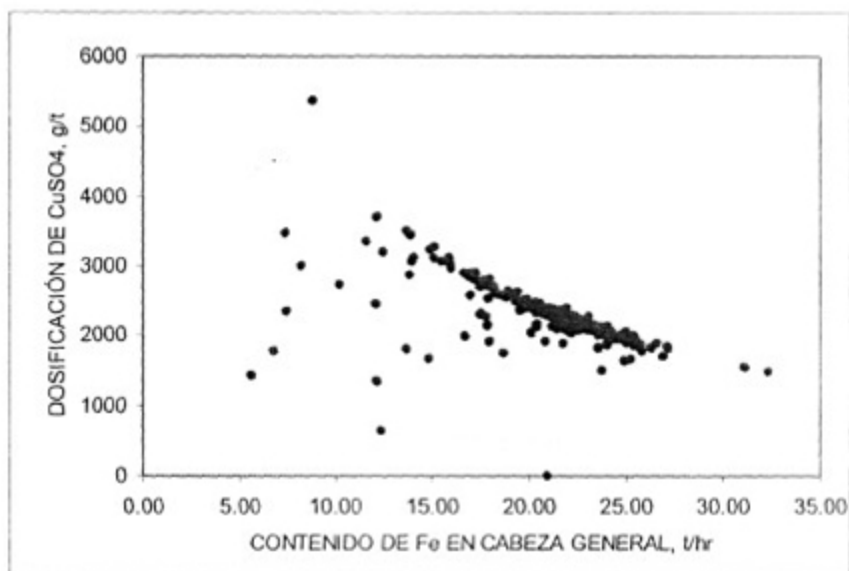
6.1.1. Modelo de dosificación de CuSO_4 al 3er acondicionador del circuito de Zn

Al momento de realizar las primeras pruebas de adición automática de CuSO_4 , se introdujo al sistema un modelo creado con datos anteriores al proyecto al cual llamaremos primer modelo, este primer modelo calculaba la cantidad de reactivo a dosificar en función únicamente del ensaye de Zn en la cabeza general. Para sustituir al primer modelo se realizó el análisis del contenido de Zn en la cabeza general, así como las dosificaciones de CuSO_4 en el acondicionador 3 de Zn. El resultado de este análisis mostró que la dosificación de CuSO_4 tiene una tendencia bien marcada y por lo tanto, la obtención del modelo de dosificación fue sencilla.

En la figura 6.1, se muestran las gráficas de dosificación de CuSO_4 en el tercer acondicionador contra contenido de Zn y Fe en la alimentación. Esta gráficas muestran que el operador está pendiente de la dosificación de este reactivo.



a)



b)

Figura 6.1. Graficas de dosificación de CuSO_4 al tanque acondicionador 3 del circuito de flotación de Zn. a) Dosificación contra contenido de Zn. b) Dosificación contra contenido de Fe.

Para la obtención del modelo de dosificación de CuSO_4 se tomó la tendencia de la dosificación contra el contenido de Zn por presentar una mejor correlación entre sus puntos. El modelo de dosificación final para este punto de dosificación se muestra en la figura 6.2. Los modelos de dosificación que se utilizaron para la dosificación automática de reactivos son de tipo polinomial y el grado del modelo se eligió según el coeficiente de correlación.

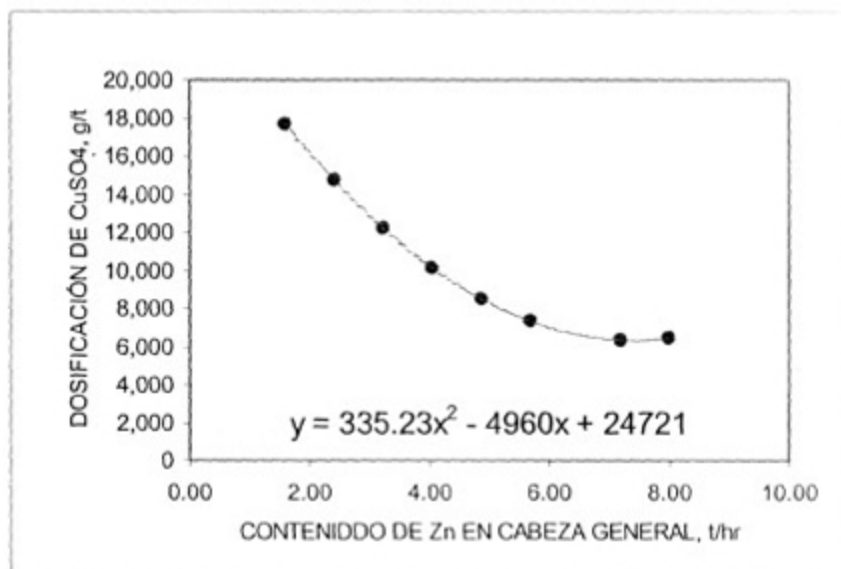
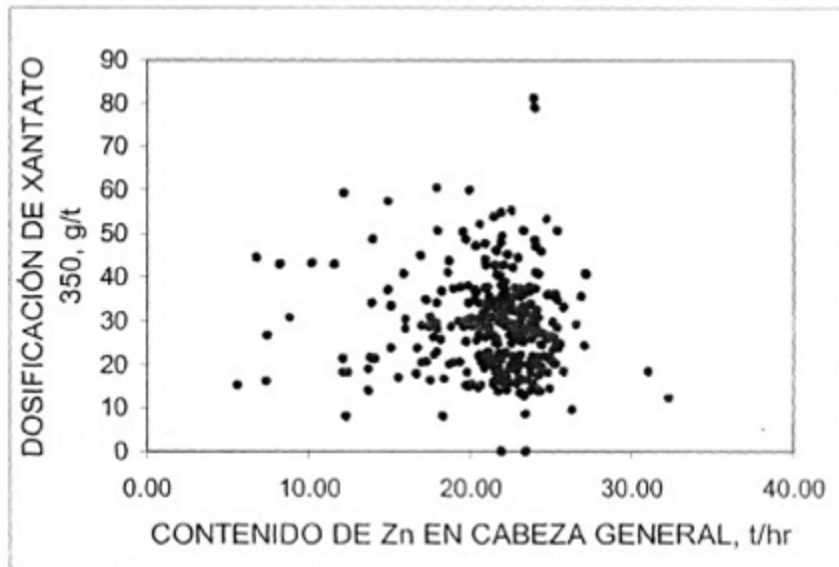


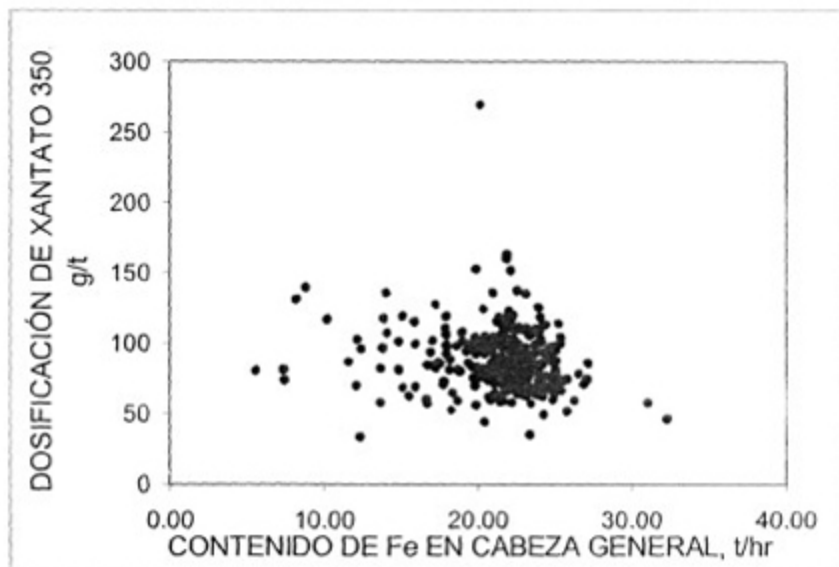
Figura 6.2. Modelo de dosificación de CuSO₄ al tanque acondicionador 3 del circuito de flotación de Zn.

6.1.2. Modelos de dosificación de Xantato 350 en el circuito de Zn

Debido a que la dosificación de Xantato en el circuito de Zn no seguía una tendencia con respecto al contenido de Zn en la alimentación, se tomó la decisión de realizar una encuesta entre los operadores y supervisores, para obtener los modelos de dosificación en cada uno de los puntos de dosificación de Xantato en el circuito. En la figura 6.3 se muestran las gráficas de dosificación de Xantato al banco primario 1 en función del contenido de Zn y Fe en la alimentación general a flotación. Las gráficas de dosificación de Xantato a los bancos primario 2 y agotativo 1 del circuito de Zn se muestran en el anexo 3. Los resultados de la encuesta a los operadores se muestran en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3



a)



b)

Figura 6.3. Gráficas de dosificación de Xantato al banco primario 1. a) Dosificación en función del contenido con de Zn en la cabeza general. b) Dosificación en función del contenido de Fe en la cabeza general.

Tabla 6.1. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 1.

%Zn Cabeza	ml/min por Operador					Promedio, ml/min	Desv STD	g/t	Contenido Zn (t/hr)
	1	2	3	4	5				
4	300	250	400	400	350	340.00	65.19	319	3.2
5	300	300	450	420	400	374.00	69.86	313	4
6	400	380	600	500	550	486.00	94.76	311	4.8
7	500	450	650	580	700	576.00	103.10	311	5.6
8	650	600	700	650	730	666.00	50.30	312	6.4
9	800	750	780	700	750	756.00	37.82	312	7.2
10	850	850	830	700	800	806.00	62.69	310	8

Tabla 6.2. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2.

%Zn Cabeza	ml/min por Operador					Promedio, ml/min	Desv STD	g/t	Contenido Zn (t/hr)
	1	2	3	4	5				
4	300	250	400	400	350	340	40.99	127.5	3.2
5	488	350	450	450	350	418	45.61	121.4	4
6	400	440	600	500	550	498	37.15	110.0	4.8
7	500	450	650	580	720.8	580	64.19	111.4	5.6
8	650	600	700	650	730	666	68.04	112.0	6.4
9	800	750	780	660	750	748	84.44	115.0	7.2
10	850	850	830	800	800	826	94.97	113.3	8

Tabla 6.3. Datos de la encuesta a los operadores del circuito de Zn. Dosificación de Xantato 350 al banco agotativo 1.

%Zn Cola final	ml/min por Operador					Promedio, mi/min	Desv STD	g/t	Contenido Zn (t/hr)
	1	2	3	4	5				
0.1	200	150	100	180	120	150.00	41.23	5625	0.08
0.5	200	200	150	190	120	172.00	35.64	1290	0.4
1	250	250	200	190	150	208.00	42.66	780	0.8
1.5	300	280	280	200	200	252.00	48.17	630	1.2
2	350	330	350	250	200	296.00	67.68	555	1.6
2.5	400	400	400	300	220	344.00	81.73	516	2
3	500	500	480	300	250	406.00	121.16	507.5	2.4

Como puede notarse a simple vista en las tablas anteriores, las dosificaciones se realizan en función de la ley tomando en cuenta un tonelaje constante (80 t/hr). Para poder utilizar esta información para crear los modelos de adición, fue necesario manejar la dosificación en función del contenido de Zn en la alimentación y no en función de la ley de Zn en la cabeza general. La conversión se realizó de la siguiente manera.

$$D = \frac{RC\rho K}{T} \quad [6.1]$$

$$R = \frac{DT}{\rho CK} \quad [6.2]$$

Donde D es la cantidad de reactivo a dosificar en gramos por tonelada, R es la cantidad de reactivo a dosificar en mililitros por minuto, C es el por ciento de concentración del reactivo, ρ es la densidad del reactivo, K = 60 minutos por hora y T son las toneladas por hora de metal (Zn, Fe, Pb y Cu). Una de las metas era obtener el modelo de dosificación de Xantato 350 al banco agotativo en función del contenido de Zn en la cola final. La idea era controlar el contenido de Zn en la cola final mediante la dosificación de este reactivo. Pero en la práctica este dato no se encuentra disponible en línea por lo cual la obtención del modelo en función del contenido de Zn en la cola final no fue posible. Por esta razón el

modelo de dosificación para el banco agotativo se trabaja en función del contenido de Zn en la alimentación general.

A continuación se muestran los modelos de dosificación de Xantato para los bancos primario 1, primario 2 y banco agotativo 1 del circuito de Zn.

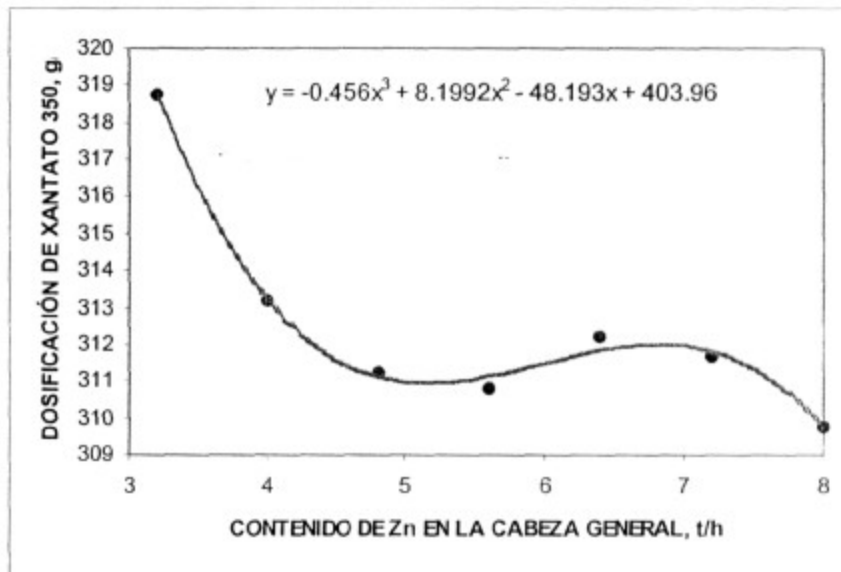


Figura 6.4. Modelo de adición de Xantato 350 al banco primario 1 del circuito de Zn.

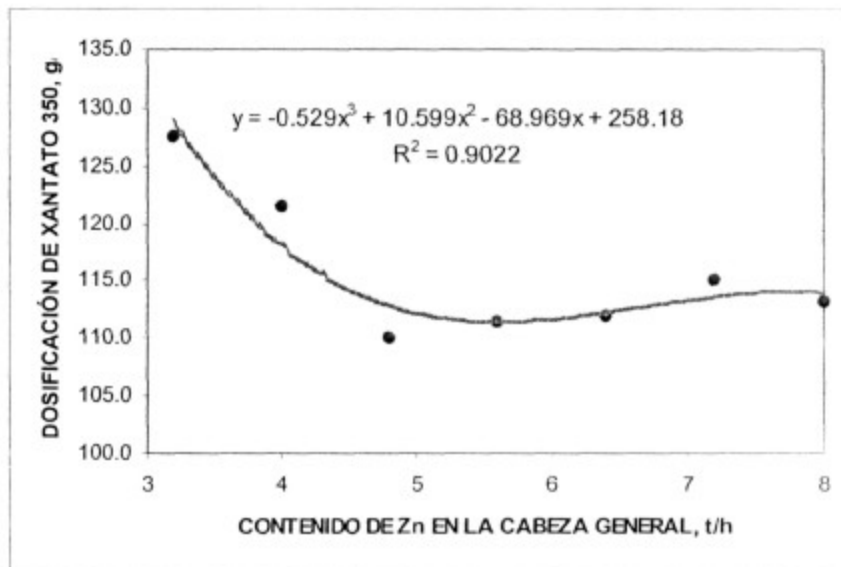


Figura 6.5. Modelo de dosificación de Xantato 350 al banco primario 2 del circuito de Zn.

Para explicar la forma de “S” de los modelos anteriores, es necesario tomar en cuenta que los datos fueron obtenidos directamente de los operadores. Las dos gráficas anteriores reflejan la tendencia natural de los operadores en la dosificación de Xantato 350 a los bancos primarios del circuito de Zn.

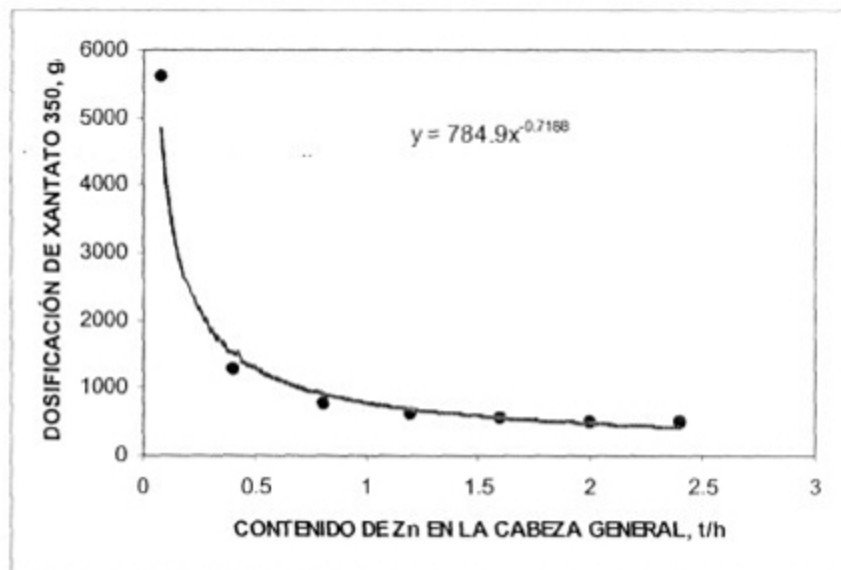


Figura 6.6. Modelo de dosificación de Xantato 350 al banco Agotativo 1 al circuito de Zn.

El modelo que se muestra en la figura anterior tiene forma potencial debido a que de forma polinómica resultaría de sexto orden para tener un coeficiente de correlación cercano a 1.

6.1.3. Dosificación de Aerofina 3418 en el circuito de Pb

Para la obtención de los modelos de dosificación de Aerofina 3418, se utilizaron los datos recopilados desde el período de agosto del 2000 a enero 2001. En la figura 6.7 se muestra las gráficas de dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu en función del contenido de Cu en la alimentación general.

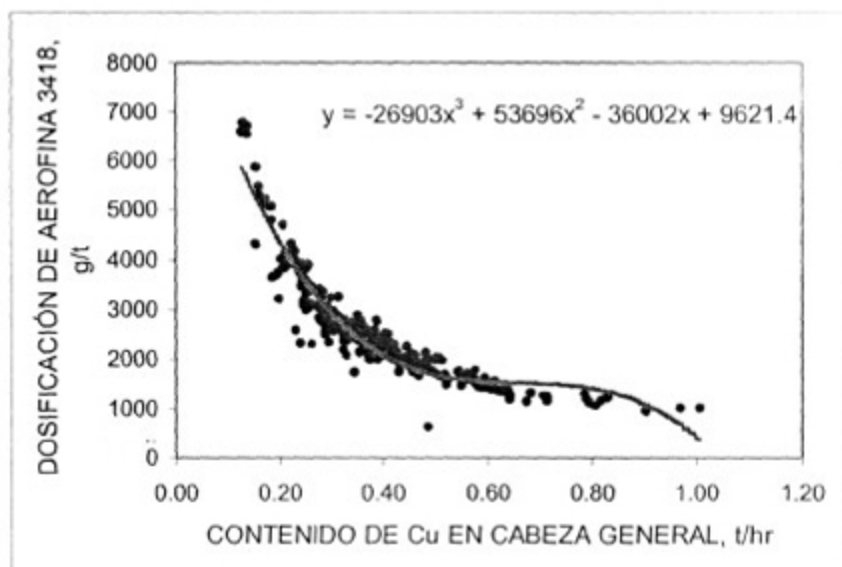


Figura 6.7. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu.

En la figura anterior se puede ver que el modelo produce un error en la dosificación cuando el contenido en la cabeza general es mayor de 0.8 t/hr. Este modelo puede ser mejorado eliminando puntos de la gráfica o aumentando el orden del modelo.

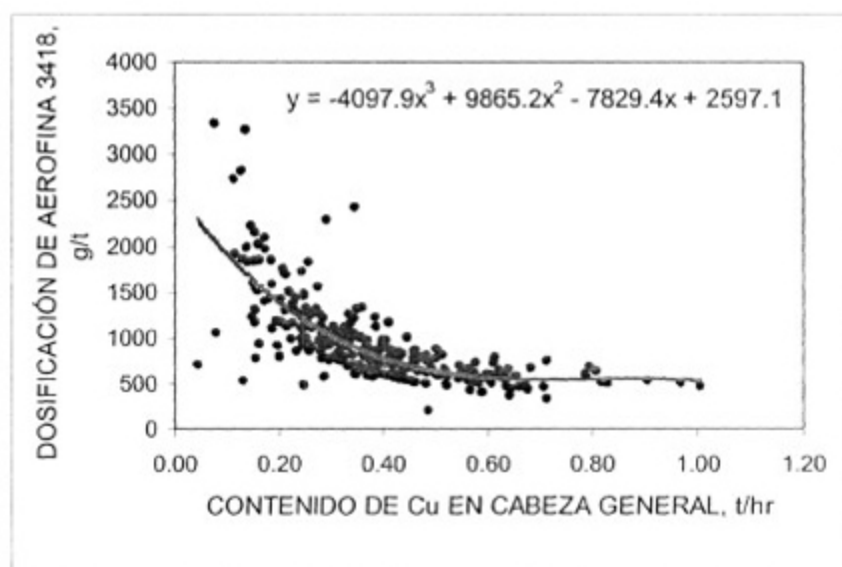


Figura 6.8. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 2 del circuito de flotación Pb-Cu.

Se realizaron análisis de correlación para las dosificaciones de Aerofina 3418 en los bancos primarios 1 y 2 contra los contenidos metálicos de Pb, Cu, Fe y Pb+Cu. Las gráficas de dosificación se muestran en el anexo 4. Se eligió el modelo de dosificación en función del contenido de Cu en la alimentación general, debido a que este presentaba una mejor coeficiente de correlación que los demás. Las gráficas que se presentan en el anexo 4 muestran que existe una tendencia de los operadores a dosificar la aerofina en función del contenido de Cu. En la tabla 6.4 se muestran los coeficientes de correlación de los modelos presentados anteriormente.

Tabla 6.4. coeficientes de correlación de los modelos de dosificación de reactivos.

Modelo	R²
Sulfato de Cobre al acondicionador 3 de Zn	0.9831
Xantato 350 al banco primario 1 de Zn	0.9947
Xantato 350 al banco primario 2 de Zn	0.9022
Xantato 350 al banco agotativo 1 de Zn	0.9713
Aerofina 3418 al banco primario 1 de Pb	0.9098
Aerofina 3418 al banco primario 2 de Pb	0.5593

6.2. Curvas de calibración de bombas dosificadoras

Una vez que se ha obtenido la dosificación adecuada para la corriente de interés, es necesario convertir este valor en una señal analógica para controlar la bomba que ha de dosificar el reactivo.

En un principio, se asumía que cada bomba tenía un comportamiento lineal en su dosificación. Esto no es cierto en todos los casos. La razón es que en la unidad se cuentan con dos tipos de bombas dosificadoras. El primer tipo opera con solenoides y tiene un rango de dosificación de 0 a 1.5 l/min. Este tipo de bombas tiene un comportamiento lineal y su calibración no tiene mayor dificultad. Otro tipo de bombas que operan en la unidad son las que funcionan con motores. Este tipo de bombas tienen un rango de

dosificación de 0 a 16 l/min, además el comportamiento de este tipo de bombas es no lineal y por lo tanto una calibración lineal generaría un error en el rango medio de dosificación.

Por esta razón se modificó el programa CoReact para aceptar modelos de calibración para cada una de las bombas dosificadoras. A continuación se detalla el procedimiento de calibración para las bombas dosificadoras.

6.2.1. Curvas para bombas dosificadoras con solenoides

El procedimiento para la calibración de bombas con solenoides es el más sencillo. A continuación se detallan los pasos necesarios para la calibración:

1. Se selecciona la pestaña de configuración y salidas, como se muestra en la figura 6.9.

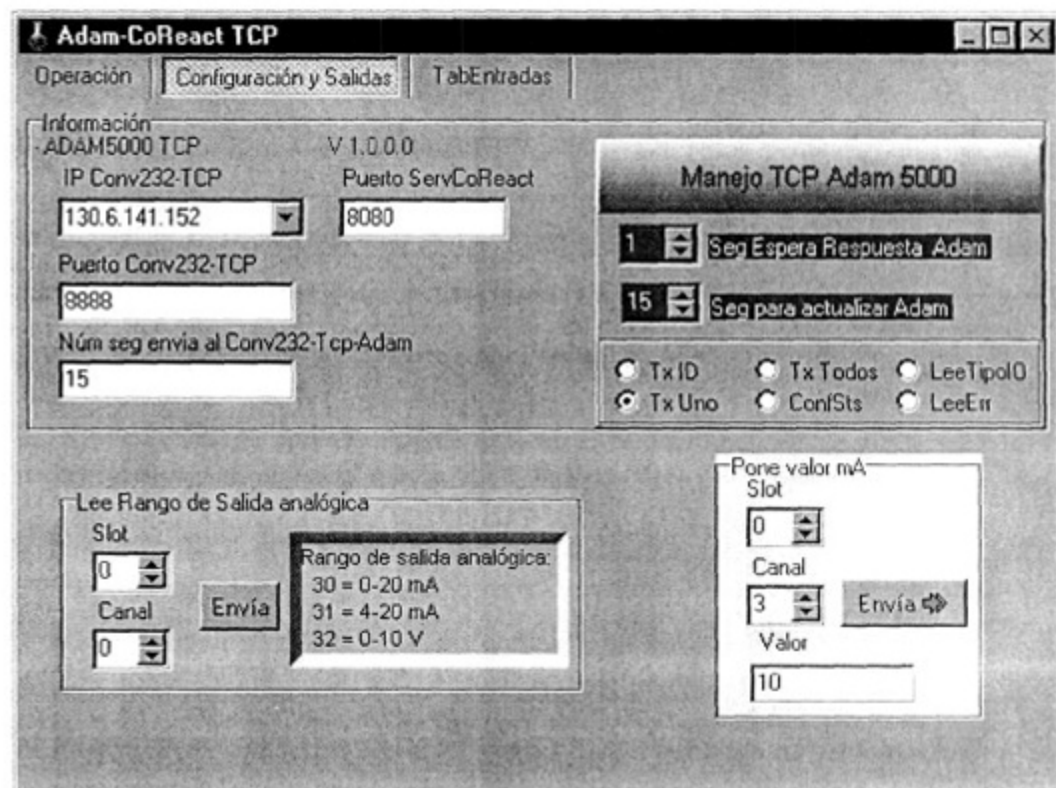


Figura 6.9. Panel de control en modo manual para el control de bombas dosificadoras.

2. Posteriormente se introduce la dirección de la bomba a calibrar y el valor en mA. Esto se hace en el cuadro "Pone valor mA". La dirección consta de dos números: slot y canal. Estos se refieren al socket en que está insertada la tarjeta de salida y el número de puerto de salida respectivamente. Una recomendación para este tipo de bombas es enviar 10mA en cada calibración.
3. Se mide la cantidad de reactivo que dosifica la bomba con los mA que se le han enviado y se obtiene la ecuación de la recta que pasa por los dos puntos. Hay que tomar en cuenta que la bomba se detiene a los 4mA. La figura 6.10 muestra la ecuación de calibración de la bomba de Aerofina 3418 al banco primario 1 del circuito de Pb. Esta gráfica muestra tres ecuaciones para la misma bomba, estas tres ecuaciones corresponden a diferentes posiciones de la abertura del diafragma de la bomba.
4. Una vez que se han obtenido las ecuaciones de calibración de las bombas se introducen al sistema mediante el programa de captura. Es importante recordar que es necesario reiniciar el sistema después de introducir las ecuaciones de calibración para que los cambios surtan efecto.

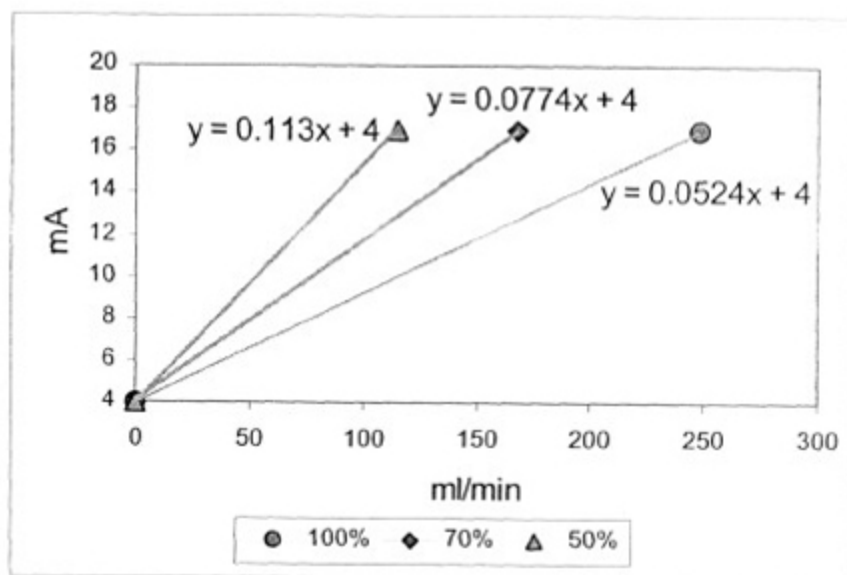


Figura 6.10. Ecuaciones de calibración para la bomba de Aerofina 3418 al banco primario 1 del circuito de Pb.

6.2.2. Curvas para bombas dosificadoras con motores

La calibración de las bombas dosificadoras con motores es igualmente sencilla pero requiere de más tiempo. Debido a que estas bombas son mucho más grandes y dosifican cantidades mayores de reactivo, y tomando en cuenta que tienen un comportamiento no lineal en su dosificación, es necesario tomar varias lecturas de su dosificación para calcular la media de cada punto en la curva.

La precisión en este tipo de bombas es mucho menor que en las bombas con solenoides debido a que estas utilizan cabezales mucho mayores. Esto provoca que la cantidad de reactivo que dosifican varíe entre 10 a 150 ml/min de la cantidad especificada.

El procedimiento para la calibración de este tipo de bombas es el siguiente:

1. Se selecciona la pestaña de configuración y salidas como se muestra en la figura 6.10, y se introduce la dirección de la bomba en el cuadro "Pone valor mA".
2. Se introduce un valor en mA para comenzar con las lecturas de dosificación. un valor recomendado para comenzar es 6mA.
3. Se mide la cantidad de reactivo que se dosifica con los mA que se enviaron. Es importante tomar por lo menos tres lecturas para cada punto en la curva, de esta manera se reduce el error que se pudiera cometer al medir la cantidad de reactivo.
4. Se repiten los pasos 2 y 3 incrementando los mA hasta llegar a 20mA que es el límite superior de dosificación de la bomba.
5. Se grafican los promedios de las lecturas tomadas para cada punto y se obtiene la ecuación de la curva que pasa por todos los puntos y se introduce la ecuación en el programa de captura. En la figura 6.11 se muestra la curva de calibración para la bomba de dosificación de CuSO_4 .

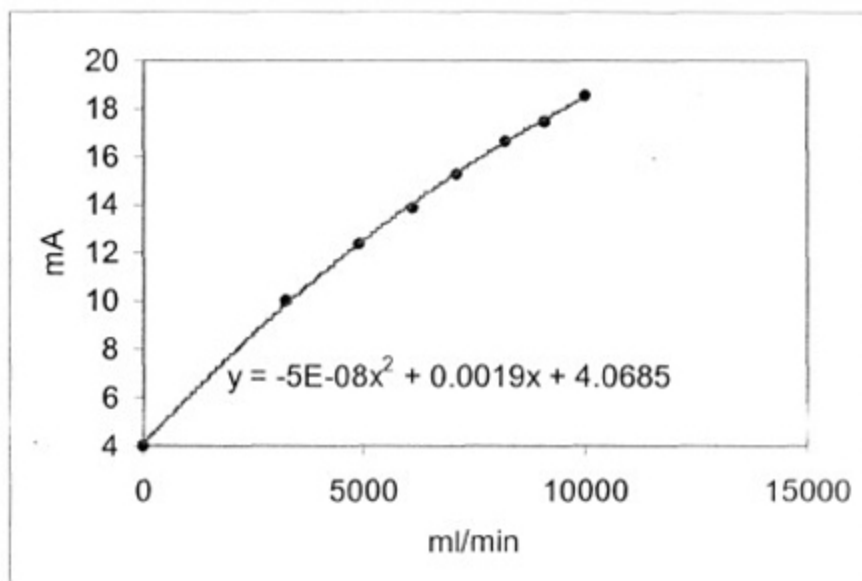


Figura 6.11. Curva de calibración de las bombas de dosificación de $CuSO_4$ en circuito de Zn.

Capítulo 7. Conclusiones

Los modelos de dosificación se crearon basándose en la tendencia de dosificación de los operadores. Con la automatización de estos modelos se tiende a dosificar una cantidad menor de reactivo en todos los puntos de dosificación. La razón de esto es que ahora se sigue el mismo criterio para la dosificación.

Los modelos de dosificación utilizan como entrada el contenido metálico en la alimentación general. Esto crea cierta imprecisión para la dosificación de reactivos del circuito de Zn. La razón de esto es muy sencilla; el tiempo de residencia del circuito de flotación Pb-Cu genera un tiempo de retardo hasta los puntos de adición de reactivos.

Una de las acciones que disminuiría el tiempo de retardo para los modelos de dosificación, es la utilización de un balance de masa en línea. Para obtener este balance se dispone del análisis químico reportado por el equipo AMDEL, pero es necesario conocer el flujo de mineral hacia cada banco de flotación. Esta información no se encuentra disponible en la planta y por lo tanto no es posible obtener por el momento de los contenidos metálicos en todas las corrientes del circuito.

Una de las ventajas de utilizar el sistema de dosificación de reactivos es la posibilidad de actuar inmediatamente después de ocurrida una perturbación, ya sea en el tonelaje de alimentación o en la ley del mineral que se procesa. Este es un factor también que ayuda en la disminución en el consumo de los reactivos.

Debido a la complejidad del proceso, es necesario conocer en todo momento el estado de las variables de interés (análisis químico y tonelaje). Por lo que el sistema de dosificación de reactivos en línea depende altamente de la funcionalidad del equipo (bombas dosificadoras, Análisis químico, modelos de dosificación y sistema de control).

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación, se realizaron varias modificaciones al programa de control CoReact. Estas modificaciones se realizaron por la necesidad de hacer más flexible la configuración del sistema. Las principales modificaciones que ha sufrido el programa CoReact son: Se le dio la capacidad de calibrar las bombas mediante ecuaciones y se integró la señal de los Pesómetros al sistema. Estas dos nuevas características facilitan la configuración y ayudan a tener una mayor precisión en la dosificación de reactivos.

El próximo paso a seguir en la automatización de la dosificación de reactivos es la realización de un balance de masa en línea para la reducción de los tiempos de retardo y la mejora de los modelos de dosificación mediante un estudio de los resultados reportados por los modelos de dosificación descritos en este trabajo.

Capítulo 8. Bibliografía

- 1.-Abramov, A. A., Avdokhin, A. V., Morozov, V. V., Nenadov, V. D., Shtolik, D. G., (1988) *Physical and Chemical Modeling and Optimization of Reagent Action During Sulphide Ore Flotation*, Developments in Mineral Processing Volume 10b, Proceedings of the XVI International Mineral Processing Congress, Stockholm, Sweden, June 5-10 1988, pp 1621-1631.
- 2.-Barbery, G., and Cécile, J.L., (1968) *Instrumentation for Reagent Control in Flotation: Present Status and Recent Developments*, Advances in Mineral Processing, AIME, pp 726-739.
- 3.-Bouajila, A., Gagnon, C., Breau, Y., and Pelletier, D., (2000) *On-Line Balance for Mass Rate Estimation and Flotation Process Diagnosis*, Proceedings 32nd annual meeting of the Canadian Mineral Processors, CIM Canadian Mineral Processing, Ottawa, Ontario, pp 329-348.
- 4.-Cécile, J. L., Villeneuve, J., and Belpaume, P., (1988) *A New System for the measurements of the Physical-Chemical Parameters In Mineral Processing Plants*, Developments in Mineral Processing Volume 10b, Proceedings of the XVI International Mineral Processing Congress, Stockholm, Sweden, June 5-10, pp 1681-1688.
- 5.-Cooper, H. R., (1989) *Developments in Advanced On-Stream Composition Analysis*, Advances in Coal and Mineral Processing Using Flotation, Proceedings of an Engineering Foundation Conference Palm Coast, Florida, Dec 3-8, pp 303-314.
- 6.-Chander, S., (1998) *On the design of a feedback reagent control system for sulfide mineral flotation*, Developments in mineral processing volume 10b, Proceedings of the XVI international mineral processing congress, Stockholm, Sweden, June 5-10, pp 1689-1699.
- 7.-Díaz, H., Galindo, M., Valenzuela, A., (2000) *Fórmulas, Tablas y Reactivos GW*, Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Great Western Chemical Co., Primera edición, Enero 2000, pp 5-29.

- 8.-Flintoff, B. C., Mular, A. L.,(1992) *A Practical Guide to Process Controls in the Minerals Industry*, Department of Mining and Mineral Process Engineering, University of British Columbia, and Brenda Mines Ltd., and The Mining Industry Technology Council of Canada.
- 9.-Hales, L. B., (1989) *Supervisory Control of Flotation Circuits*, Advances in Coal and Mineral Processing Using Flotation, Proceedings of an Engineering Foundation Conference Palm Coast, Florida, December, 3-8, pp 298-302.
- 10.-Herbst, J. A., (2000) *Control 2000: Mineral and Metallurgical Processing*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- 11.-Herbst, J. A., Holsinger, S. R., and Pate, W. T. (1992) *Control Systems for Flotation Operations*, Control International Inc., Salt Lake City.
- 12.-Herbst, J. A., Pate, W. T., Tello, R., y Arreola, H.,(1995) Mexicana de Cobre, La Caridad Unidad Nacozari, Sonora, México. XIX International Mineral Processing Congress, Comminution and Simulation and Control.
- 13.-Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., (1990) *Introducción al Procesamiento de minerales*, Noriega Limusa, Argentina, Primera edición, pp 154-168.
- 14.-Klimpel, R. R., (1986) *The Industrial Practice of sulfide mineral collectors*, Chemical Reagents in the Mineral Processing Industry, pp 73-84.
- 15.-Koivistoinen, P., and Miettunen, J., (1985) *Flotation Control at Pyhäsalmi*, Developments in Mineral Processing, Flotation of Sulphide Minerals (volume 6), pp 447-472.
- 16.-Lynch, A. J., (1981) *Mineral and Coal Flotation Circuits and their simulation and control*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- 17.-Rajamani, R. K., Herbst, J. A., (1990) *Control '90 – Mineral and Metallurgical Processing*, Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc.
- 18.-Zaragoza, R., (1988) *Control automático de plantas de flotación*, Avances en Metalurgia Extractiva No Ferrosa, Universidad de Sonora. Memorias.

Anexo I. Análisis estadístico de datos del proceso.

Comparación de medias para la determinación de la confiabilidad del equipo AMDEL.

Tabla 1. Comparación de medias para los ensayos de la cabeza general.

<i>Prueba z para medias de dos muestras Cabeza General</i>								
	Lab %Pb	AMDEL %Pb	Lab %Zn	AMDEL %Zn	Lab %Cu	AMDEL %Cu	Lab %Fe	AMDEL %Fe
Media	1.44	1.51	6.56	6.41	0.56	0.44	31.70	30.17
Varianza	0.07	0.07	0.79	0.94	0.05	0.03	5.15	3.15
Observaciones	314.00	340.00	314.00	340.00	314.00	334.00	314.00	340.00
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Z	-3.27		2.03		7.45		9.53	
Valor crítico de z	2.58		2.58		2.58		2.58	
H₀ : Lab = AMDEL	Rechazado		No Rechazado		Rechazado		Rechazado	

Tabla 2. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Zn.

<i>Prueba z para medias de dos muestras Concentrado de Zn</i>								
	Lab %Pb	AMDEL %Pb	Lab %Zn	AMDEL %Zn	Lab %Cu	AMDEL %Cu	Lab %Fe	AMDEL %Fe
Media	1.14	1.22	51.04	50.18	0.55	0.47	10.49	11.21
Varianza	0.13	0.42	5.31	15.07	0.02	0.01	3.23	3.52
Observaciones	313.00	333.00	314.00	333.00	314.00	331.00	314.00	330.00
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Z	-2.04		3.46		8.35		-4.98	
Valor crítico de z	2.58		2.58		2.58		2.58	
H₀ : Lab = AMDEL	No Rechazado		Rechazado		Rechazado		Rechazado	

Tabla 3. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Pb.

<i>Prueba z para medias de dos muestras Concentrado de Pb</i>								
	Lab %Pb	AMDEL %Pb	Lab %Zn	AMDEL %Zn	Lab %Cu	AMDEL %Cu	Lab %Fe	AMDEL %Fe
Media	21.04	21.85	9.17	8.92	6.13	8.26	22.23	18.90
Varianza	14.71	16.33	1.39	1.06	3.66	3.41	6.30	43.97
Observaciones	314.00	333.00	314.00	333.00	314.00	333.00	313.00	332.00
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Z	-2.64		2.93		-14.43		8.54	
Valor crítico de z	2.58		2.58		2.58		2.58	
H₀ : Lab = AMDEL	Rechazado		Rechazado		Rechazado		Rechazado	

Tabla 4. Comparación de medias para los ensayos del concentrado de Cu.

<i>Prueba z para medias de dos muestras Concentrado de Cu</i>								
	Lab %Pb	AMDEL %Pb	Lab %Zn	AMDEL %Zn	Lab %Cu	AMDEL %Cu	Lab %Fe	AMDEL %Fe
Media	13.81	13.00	2.20	2.59	24.78	21.28	23.25	24.36
Varianza	29.91	13.43	0.33	1.05	11.54	30.19	6.14	3.53
Observaciones	294.00	333.00	295.00	333.00	295.00	333.00	295.00	333.00
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Z	2.14		-6.01		9.72		-6.28	
Valor crítico de z	2.58		2.58		2.58		2.58	
H₀ : Lab = AMDEL	No Rechazado		Rechazado		Rechazado		Rechazado	

Tabla 5. Comparación de medias para los ensayos de las colas finales.

<i>Prueba z para medias de dos muestras Colas finales</i>								
	Lab Pb	AMDEL Pb	Lab Zn	AMDEL Zn	Lab Cu	AMDEL Cu	Lab Fe	AMDEL Fe
Media	0.41	0.41	1.42	1.42	0.13	0.19		
Varianza	0.01	0.02	0.30	0.83	0.01	0.01		
Observaciones	314.00	333.00	314.00	333.00	314.00	333.00		
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00			
Z	0.03		-0.09		-8.55			
Valor crítico de z	2.58		2.58		2.58			
H₀ : Lab = AMDEL	No Rechazado		No Rechazado		Rechazado			

Anexo II. Análisis estadístico de muestreo al equipo AMDEL

Resultados de la comparación de medias para la cabeza general.

Tabla 1. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el Laboratorio Tizapa. Cabeza general.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas CIDT-TIZAPA (Cabeza General)</i>								
	CIDT %Pb	TIZAPA %Pb	CIDT %Zn	TIZAPA %Zn	CIDT %Cu	TIZAPA %Cu	CIDT %Fe	TIZAPA %Fe
Media	1.39	1.29	5.61	5.42	0.46	0.45	29.43	30.46
Varianza	0.03	0.06	0.88	0.60	0.01	0.01	3.33	0.74
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.96		0.98		0.97		-0.07	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	4.29		3.11		1.08		-1.93	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : CIDT = TIZAPA	Rechazado		Rechazado		No Rechazado		No Rechazado	

Tabla 2. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Cabeza general.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas TIZAPA-AMDEL (Cabeza General)</i>								
	TIZAPA %Pb	AMDEL %Pb	TIZAPA %Zn	AMDEL %Zn	TIZAPA %Cu	AMDEL %Cu	TIZAPA %Fe	AMDEL %Fe
Media	1.29	1.30	5.42	6.10	0.45	0.43	30.46	30.97
Varianza	0.06	0.04	0.60	0.55	0.01	0.01	0.74	0.83
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.93		0.97		0.75		-0.40	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	-0.43		-14.61		1.46		-1.33	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : TIZAPA = AMDEL	No Rechazado		Rechazado		No Rechazado		No Rechazado	

Resultados de la comparación de medias para el concentrado de Zn.

Tabla 3. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Zn.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas CIDT-TIZAPA (Concentrado Zn)</i>								
	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	1.36	1.22	47.29	50.65	0.69	0.72	10.92	11.39
Varianza	0.01	0.01	1.25	1.61	0.01	0.02	1.00	1.20
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.80		0.87		0.99		0.80	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	7.42		-21.03		-1.68		-2.68	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : CIDT = TIZAPA	Rechazado		Rechazado		No Rechazado		Rechazado	

Tabla 4. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado de Zn.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas TIZAPA-AMDEL (Concentrado Zn)</i>								
	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	1.22	1.00	50.65	50.38	0.72	0.63	11.39	11.01
Varianza	0.01	0.01	1.61	3.67	0.02	0.02	1.20	1.28
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.70		0.87		0.60		0.82	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	9.44		1.01		2.45		2.17	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : TIZAPA = AMDEL	Rechazado		No Rechazado		No Rechazado		No Rechazado	

Resultados de la comparación de medias para el concentrado de Pb.

Tabla 5. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Pb.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas CIDT-TIZAPA (Concentrado Pb)</i>								
	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	22.84	22.53	8.42	8.00	7.28	7.22	22.63	21.38
Varianza	23.48	20.67	13.25	14.39	17.25	17.47	7.93	9.62
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	1.00		1.00		1.00		0.98	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	2.44		4.59		0.83		6.79	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : CIDT = TIZAPA	No Rechazado		Rechazado		No Rechazado		Rechazado	

Tabla 6. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado Pb.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas TIZAPA-AMDEL (Concentrado Pb)</i>								
	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	22.53	23.76	8.00	9.06	7.22	6.47	21.38	20.81
Varianza	20.67	22.82	14.39	5.79	17.47	7.75	9.62	5.74
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.97		0.98		0.90		0.83	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	-3.95		-2.68		1.40		1.26	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62		2.62	
H₀ : CIDT = AMDEL	Rechazado		Rechazado		No Rechazado		No Rechazado	

Resultados de la comparación de medias para el concentrado de Cu.

Tabla 7. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Concentrado de Cu.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas CIDT-TIZAPA (Concentrado Cu)</i>								
	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA	CIDT	TIZAPA
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	19.24	19.00	1.90	1.73	22.63	22.56	22.39	20.07
Varianza	2.11	3.11	0.06	0.09	2.69	2.69	1.42	1.60
Observaciones	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Coefficiente de correlación	0.99		0.98		0.97		0.92	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	6.00		6.00		6.00		6.00	
Estadístico t	1.54		6.46		0.51		12.47	
Valor crítico de t	3.14		3.14		3.14		3.14	
H₀ : CIDT = TIZAPA	No Rechazado		Rechazado		No Rechazado		Rechazado	

Tabla 8. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Concentrado de Cu.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas TIZAPA-AMDEL (Concentrado Cu)</i>								
	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL	TIZAPA	AMDEL
	%Pb	%Pb	%Zn	%Zn	%Cu	%Cu	%Fe	%Fe
Media	19.00	11.64	1.73	1.62	22.56	28.10	20.07	23.76
Varianza	3.11	0.53	0.09	0.09	2.69	0.56	1.60	0.05
Observaciones	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Coefficiente de correlación	0.77		0.39		0.02		0.85	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	6.00		6.00		6.00		6.00	
Estadístico t	15.07		0.93		-8.19		-9.00	
Valor crítico de t	3.14		3.14		3.14		3.14	
H₀ : TIZAPA = AMDEL	Rechazado		No Rechazado		Rechazado		Rechazado	

Resultados de la comparación de medias para las colas finales.

Tabla 9. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio del CIDT de Monterrey y el laboratorio Tizapa. Cola final.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas CIDT-TIZAPA (Cola final)</i>						
	CIDT %Pb	TIZAPA %Pb	CIDT %Zn	TIZAPA %Zn	CIDT %Cu	TIZAPA %Cu
Media	0.45	0.39	0.83	0.88	0.12	0.12
Varianza	0.01	0.01	0.10	0.09	0.00	0.00
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.99		0.99		0.98	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	6.92		-4.34		0.65	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62	
H₀ : CIDT = TIZAPA	Rechazado		Rechazado		No Rechazado	

Tabla 10. Prueba estadística para la comparación entre el laboratorio Tizapa y el equipo AMDEL. Cola final.

<i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas TIZAPA-AMDEL (Cola Final)</i>						
	TIZAPA %Pb	AMDEL %Pb	TIZAPA %Zn	AMDEL %Zn	TIZAPA %Cu	AMDEL %Cu
Media	0.39	0.28	0.88	0.67	0.12	0.12
Varianza	0.01	0.01	0.09	0.13	0.00	0.00
Observaciones	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Coefficiente de correlación	0.87		0.79		0.86	
Diferencia hipotética de medias	0.00		0.00		0.00	
Grados de libertad	14.00		14.00		14.00	
Estadístico t	8.57		3.57		0.40	
Valor crítico de t	2.62		2.62		2.62	
H₀ : TIZAPA = AMDEL	Rechazado		Rechazado		No Rechazado	

Anexo III.

Gráficas de dosificación de Xantato 350 a los bancos primario 2 y agotativo 1 del circuito de flotación de Zn

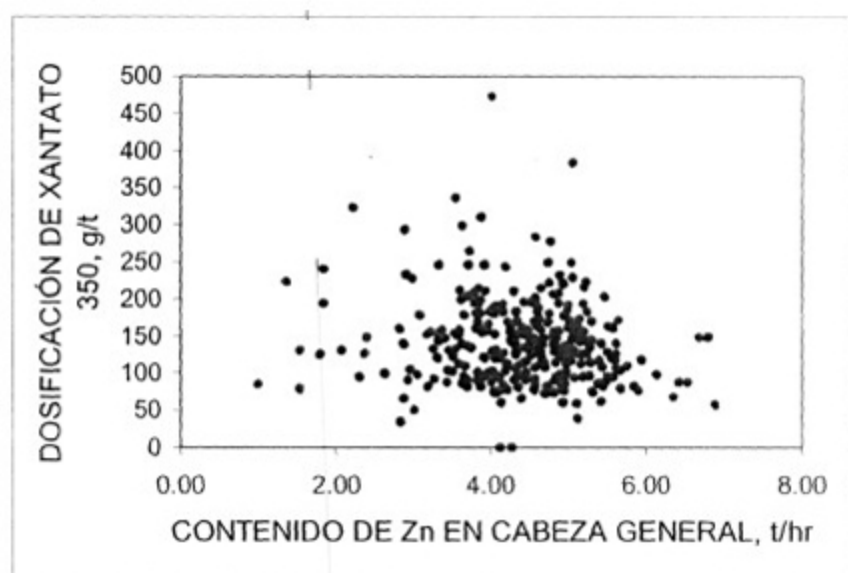


Figura 1. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2 en función del contenido de Zn en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.

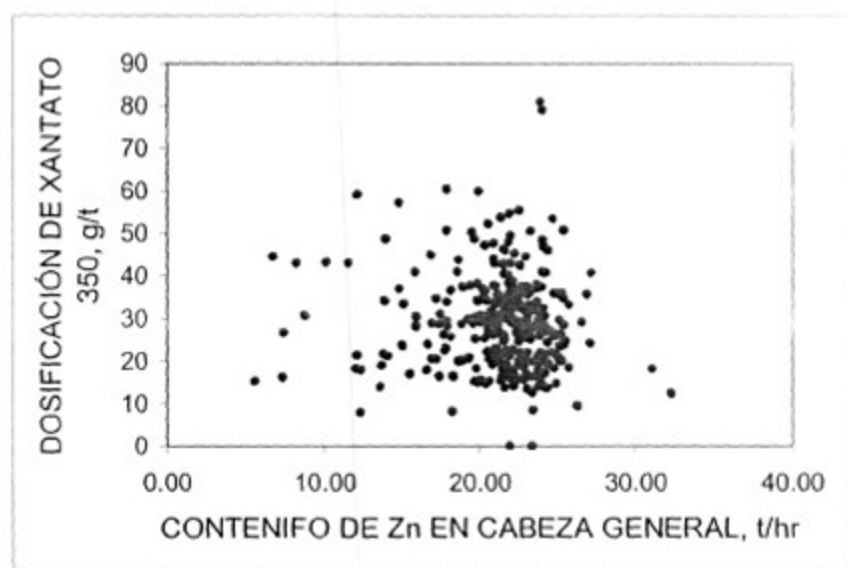


Figura 2. Dosificación de Xantato 350 al banco primario 2 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.

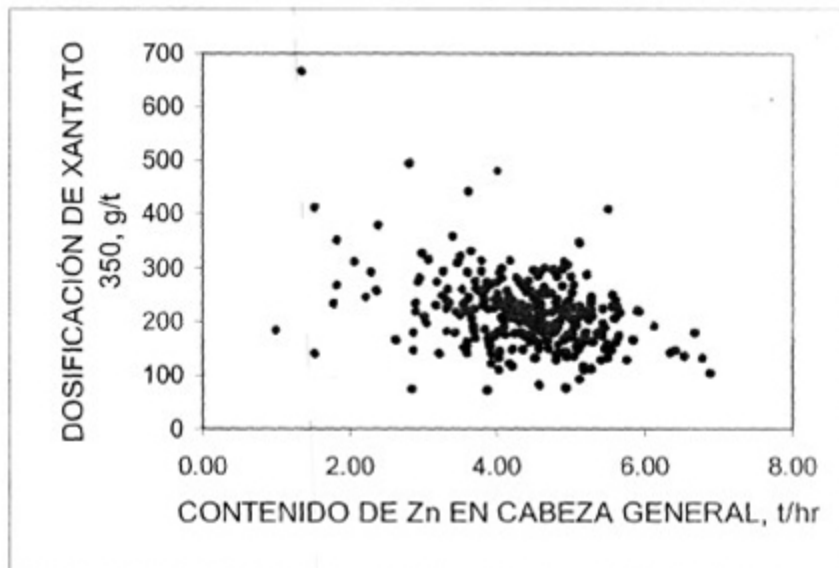


Figura 3. Dosificación de Xantato 350 al banco Agotativo 1 en función del contenido de Zn en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.

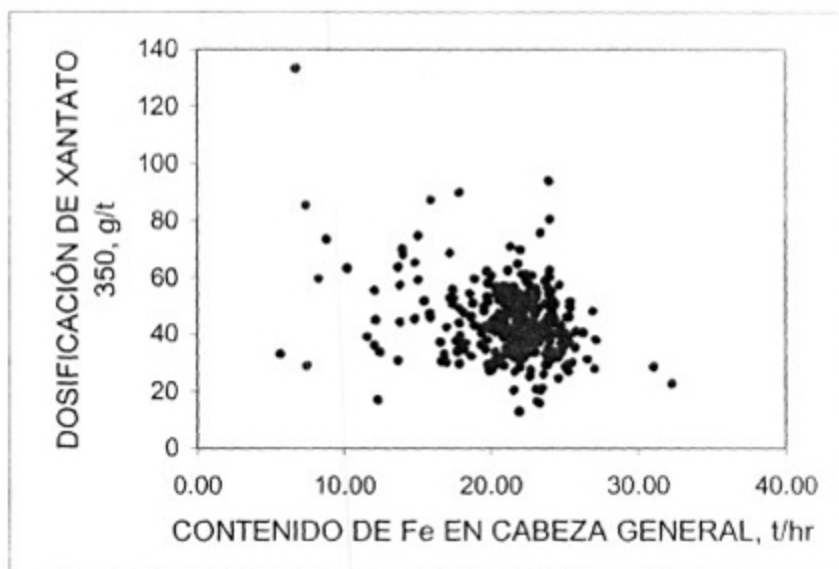


Figura 4. Dosificación de Xantato 350 al banco Agotativo 1 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte de operación.

Anexo IV.

Gráficas de dosificación de Aerofina 3418, Promotor 404 y Dextrina en el circuito de flotación Pb-Cu

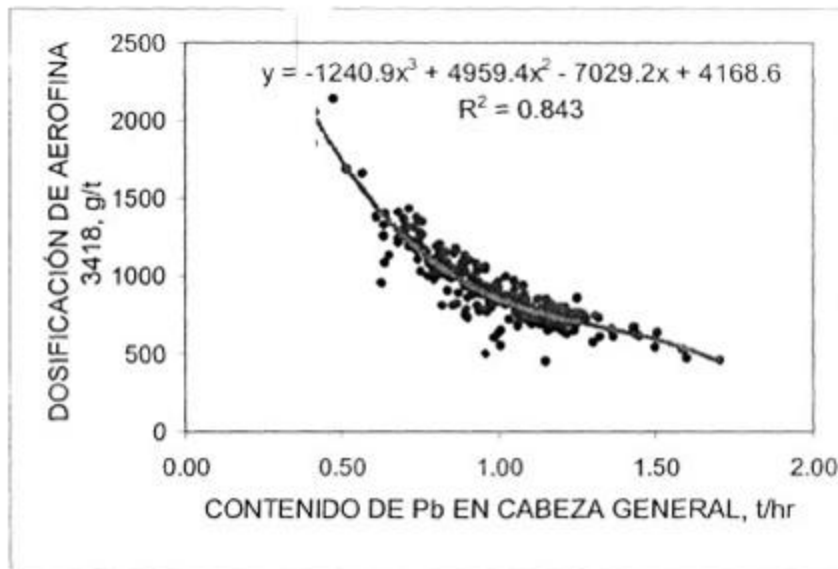


Figura 1. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

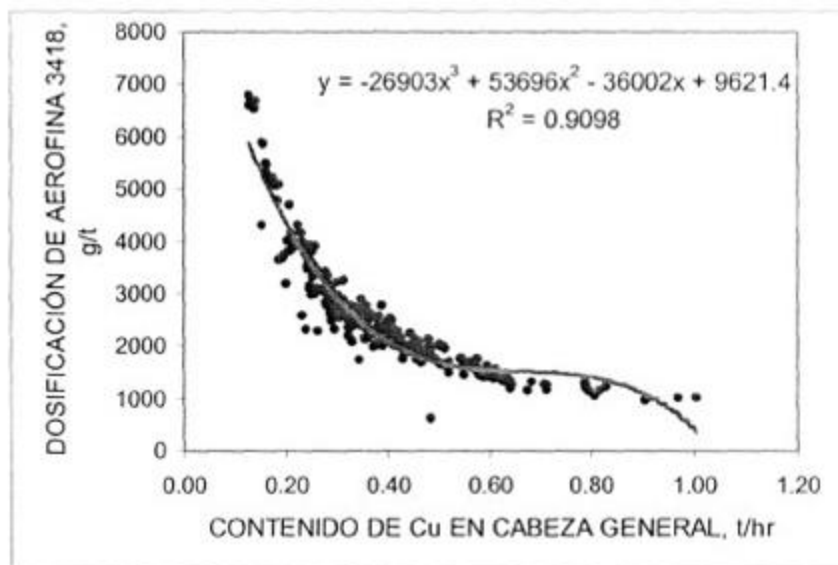


Figura 2. Dosificación de Aerofina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

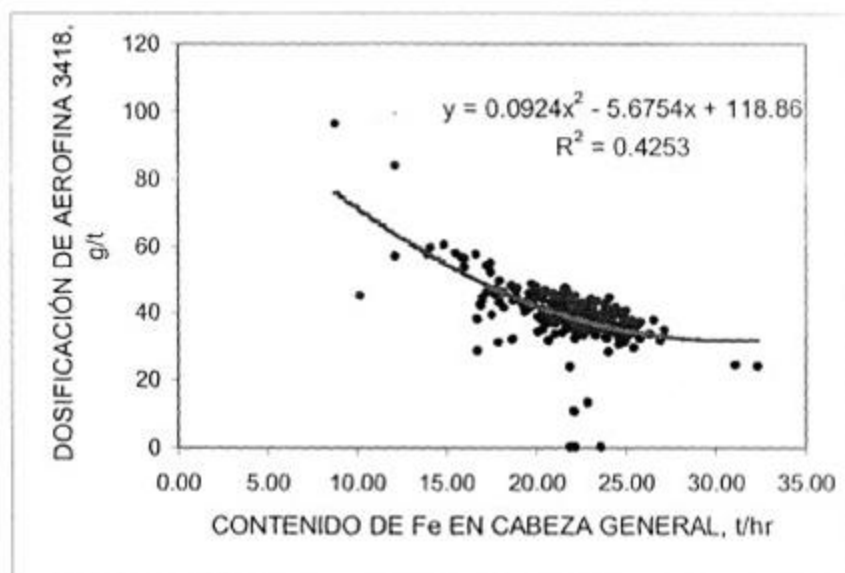


Figura 3. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

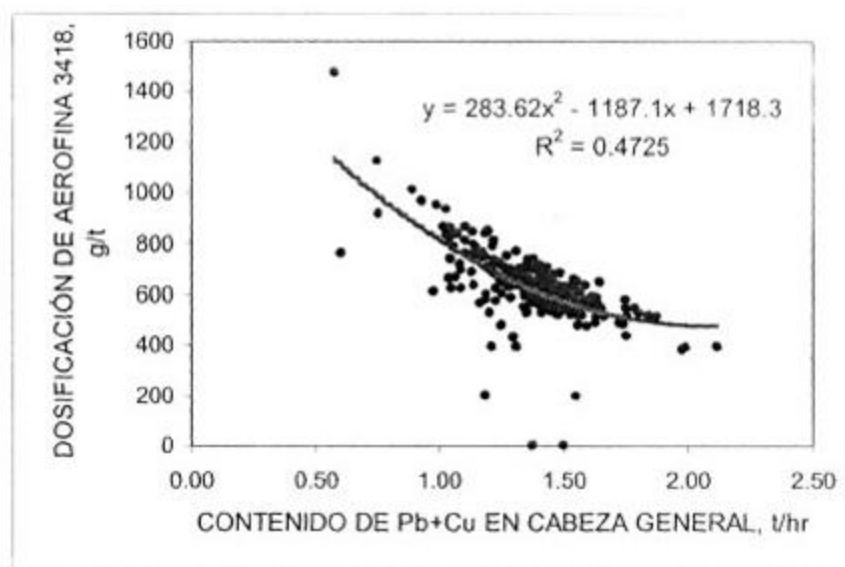


Figura 4. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 1 en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

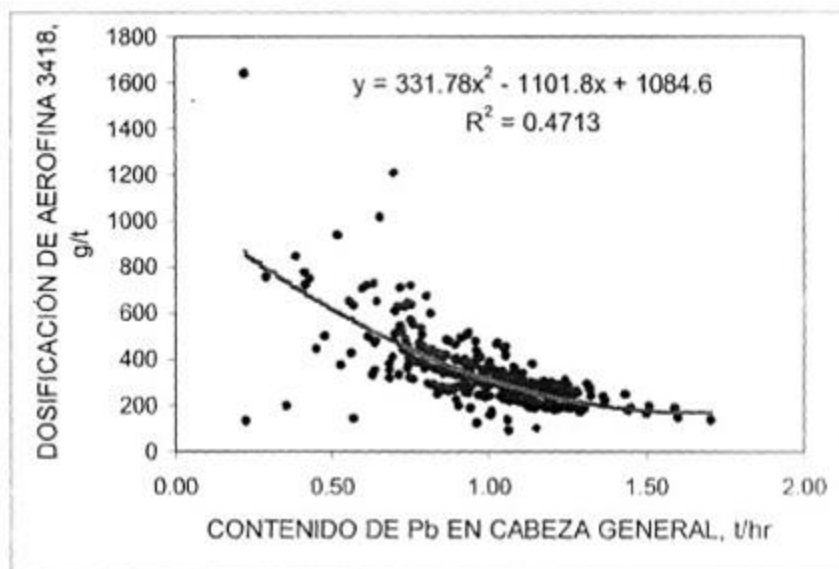


Figura 5. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

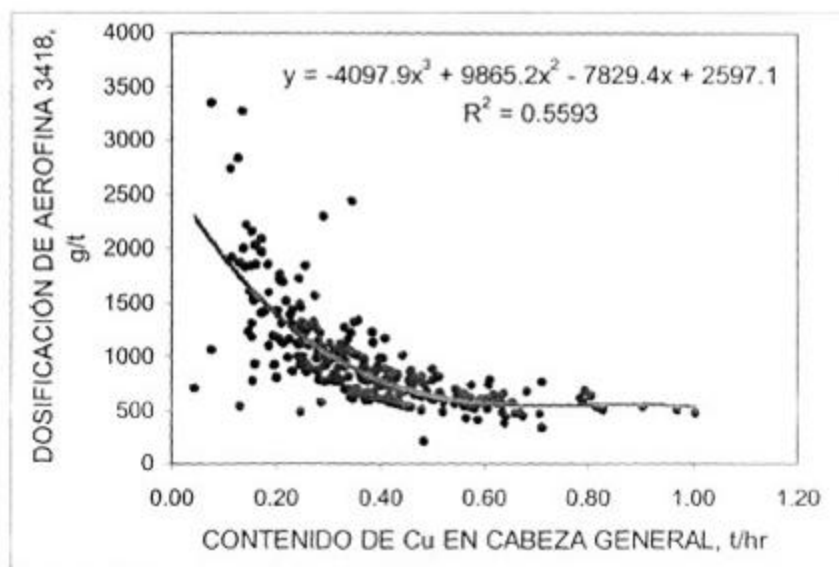


Figura 6. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

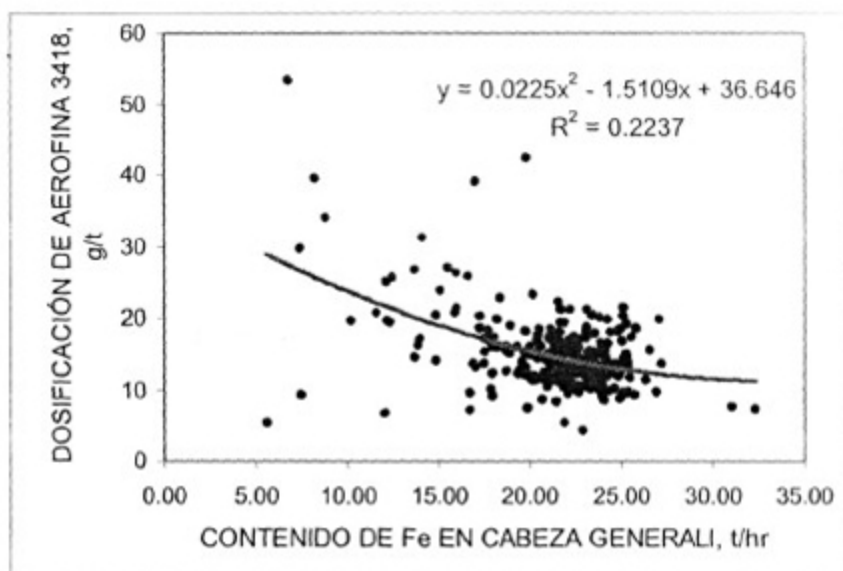


Figura 7. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

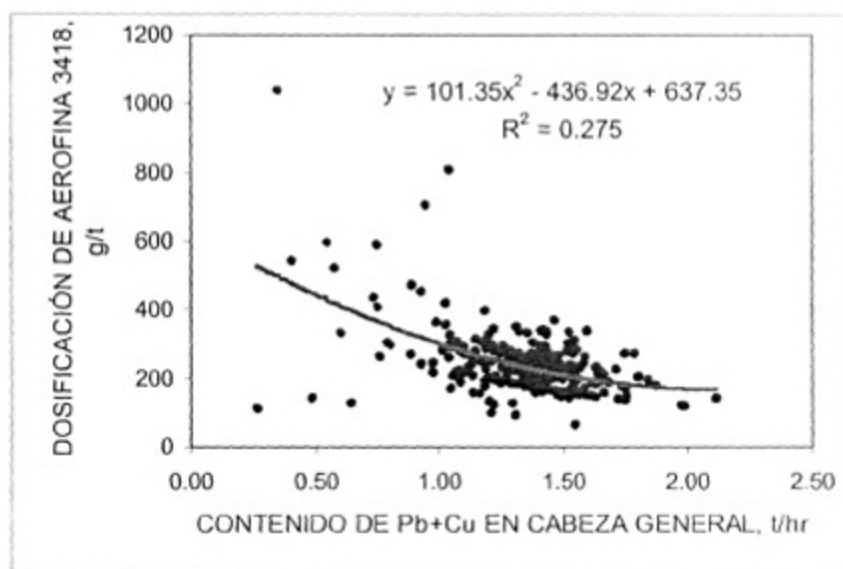


Figura 8. Dosificación de AeroFina 3418 al banco primario 2 en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

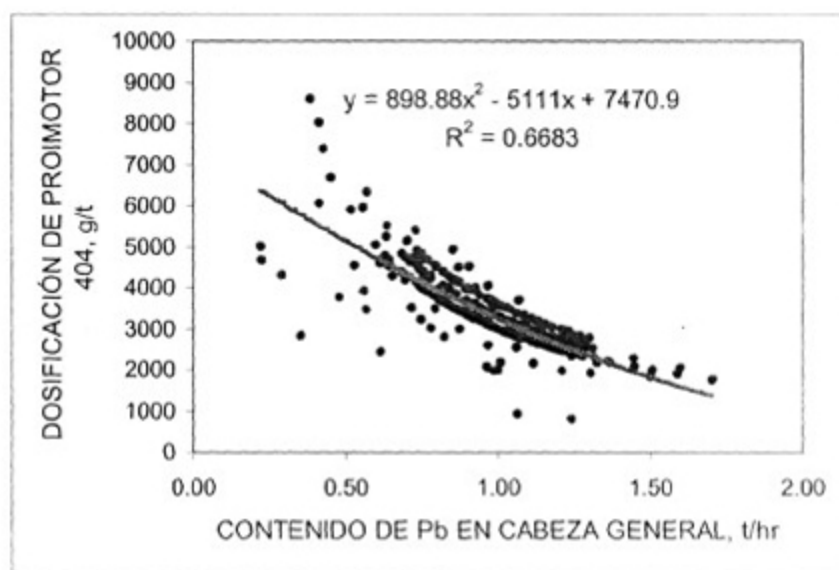


Figura 9. Dosificación de Promotor 404 al molino en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

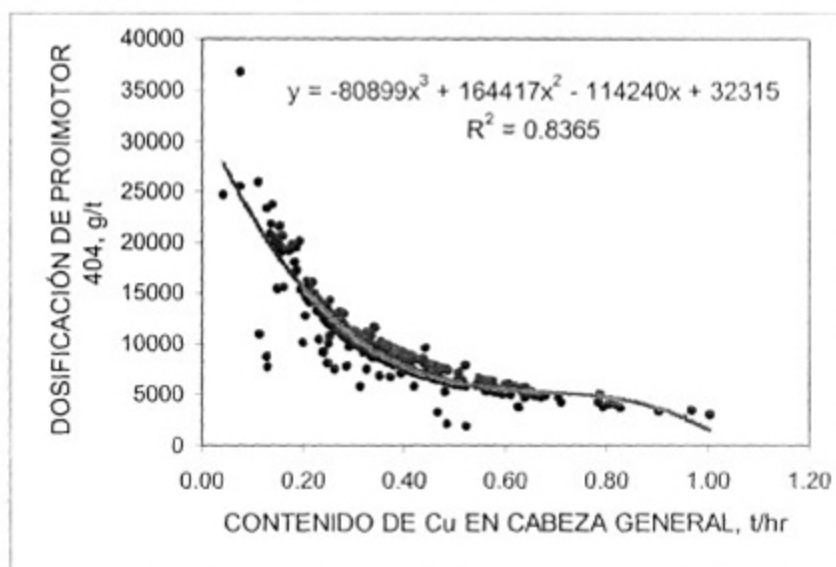


Figura 10. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

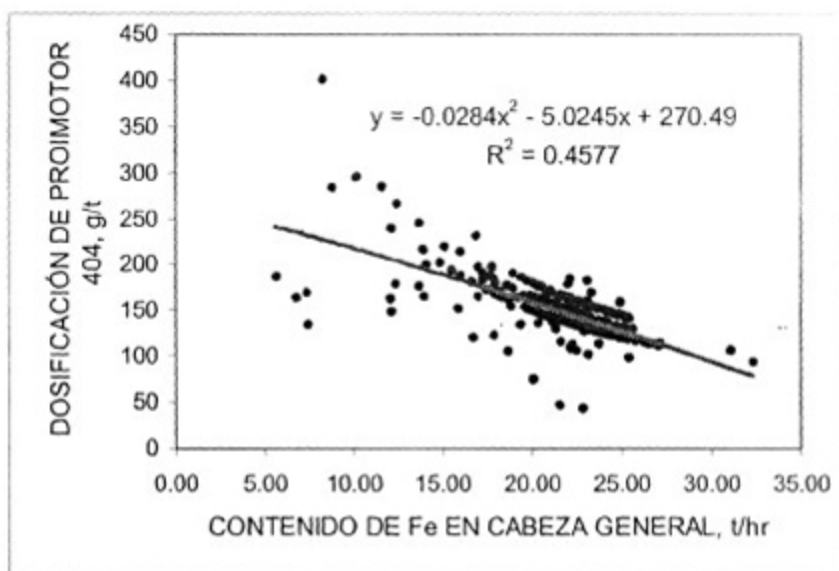


Figura 11. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

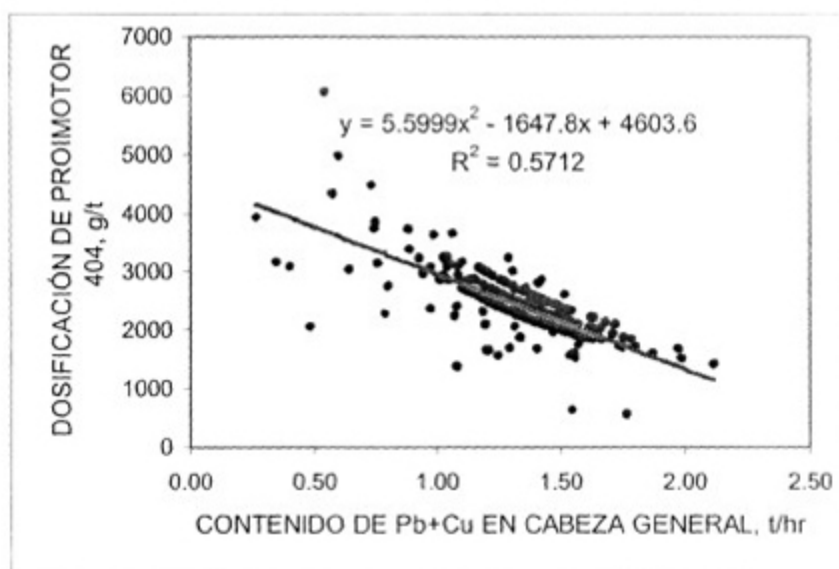


Figura 12. Dosificación de promotor 404 al molino en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

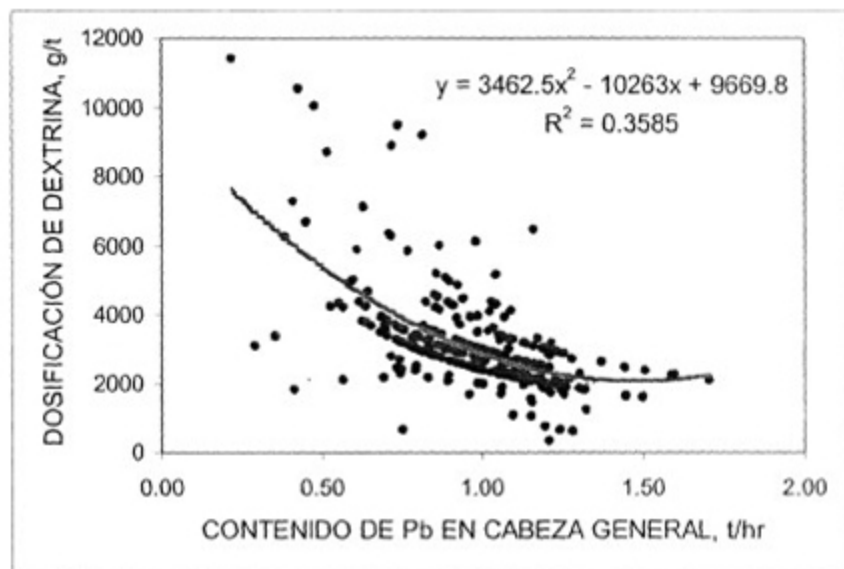


Figura 13. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Pb en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

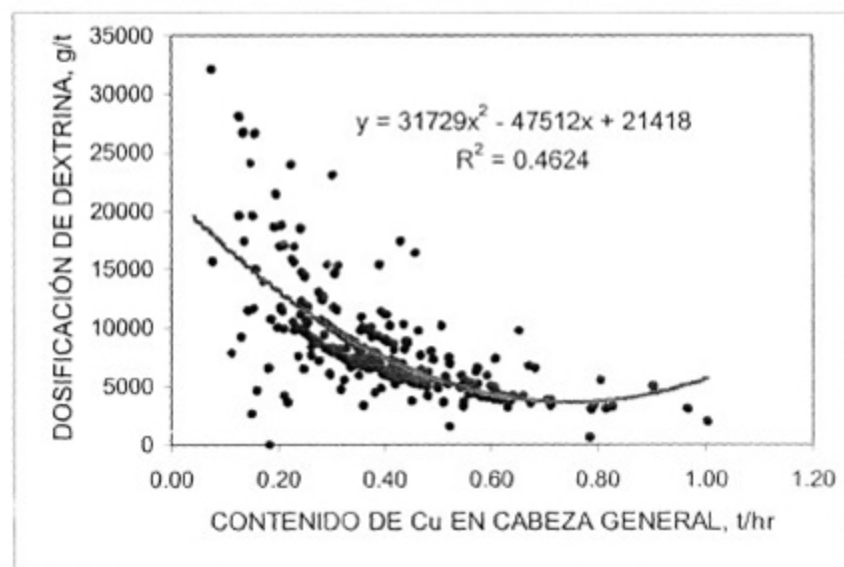


Figura 14. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

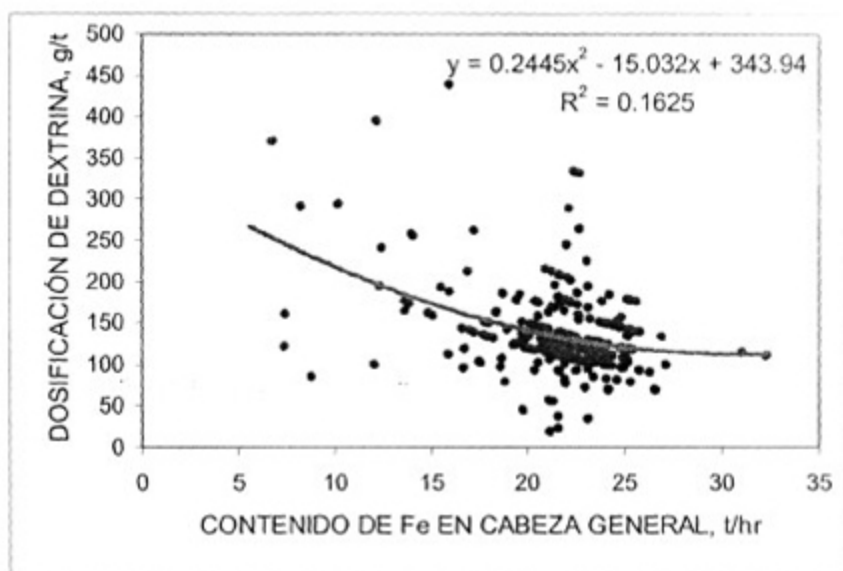


Figura 15. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Fe en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

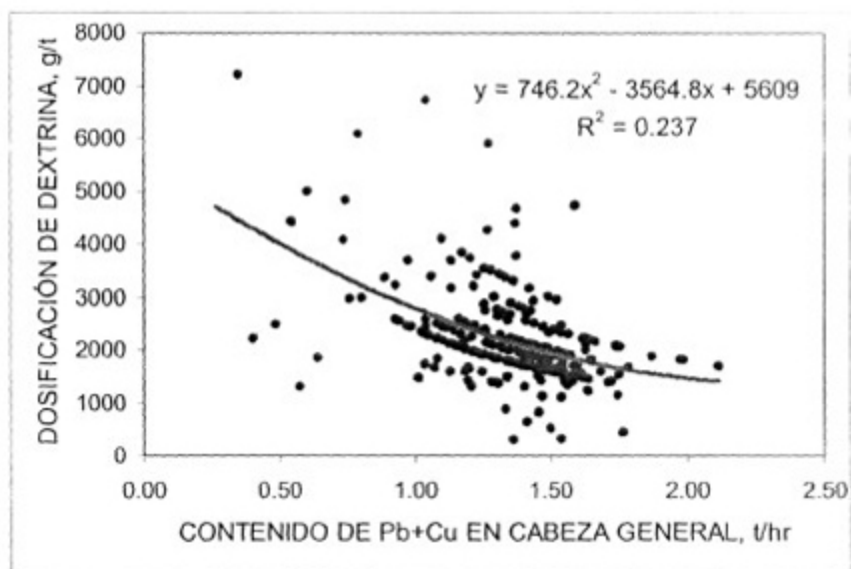


Figura 16. Dosificación de dextrina al circuito de separación Pb-Cu en función del contenido de Pb+Cu en la alimentación general. Datos tomados del reporte diario de operación.

Anexo V.

Comparación del consumo de reactivos.

Tabla 1. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación.

Prueba z para medias de dos muestras: Aerofina 3418 primario 1		
	Operadores	Modelo
Media	2679.02	2776.42
Varianza	1580276.94	2531697.14
Observaciones	298.00	303.00
Diferencia hipotética de las medias	97.39	
z	-1.67	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	

Tabla 2. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 2 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación

Prueba z para medias de dos muestras: Aerofina 3418 primario 2		
	Operadores	Modelo
Media	945.21	908.71
Varianza	204977.39	108961.54
Observaciones	302.00	303.00
Diferencia hipotética de las medias	36.50	
z	0.00	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	

Tabla 3. Comparación de consumos de Aerofina 3418 en el banco primario 1 del circuito de flotación Pb-Cu. Datos tomados del reporte diario de operación

Prueba z para medias de dos muestras Dosificación de Xantato 1		
	Operadores	Modelo
Media	450.17	305.12
Varianza	72416.86	2100.83
Observaciones	308.00	308.00
Diferencia hipotética de las medias	145.05	
z	-1.72E-04	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	

Tabla 4. Comparación de consumos de Xantato 350 al banco primario 2 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación

<i>Prueba z para medias de dos muestras Dosificación de Xantato 2</i>		
	<i>Operadores</i>	<i>Modelo</i>
Media	142.36	114.68
Varianza	3247.91	145.42
Observaciones	308.00	308.00
Diferencia hipotética de las medias	27.69	
z	-1.13E-03	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	

Tabla 5. Comparación de consumos de Xantato 350 al banco Agotativo 1 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación

<i>Prueba z para medias de dos muestras: Dosificación de Xantato 3</i>		
	<i>Operadores</i>	<i>Modelo</i>
Media	213.47	133.16
Varianza	4234.20	21.94
Observaciones	301.00	301.00
Diferencia hipotética de las medias	80.31	
z	-5.74E-04	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	

Tabla 6. Comparación de consumos de CuSO₄ al acondicionador 3 del circuito de flotación de Zn. Datos tomados del reporte diario de operación

<i>Prueba z para medias de dos muestras: Dosificación de CuSO₄</i>		
	<i>Operadores</i>	<i>Modelo</i>
Media	11036.40	9674.56
Varianza	5185818.64	4250191.07
Observaciones	307.00	308.00
Diferencia hipotética de las medias	1361.84	
z	1.94E-05	
Valor crítico de z	2.58	
Ho: Operadores > Modelo	No Rechazado	