

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA  
PILOTO AUTOMATIZADA DE PROCESAMIENTO DE  
MINERALES**

**INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:  
JORGE ENRIQUE BASTANTE PAZOS**

**PROMOCIÓN  
1984 – I**

**LIMA – PERÚ  
2010**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA  
PILOTO AUTOMATIZADA DE PROCESAMIENTO DE  
MINERALES**

## **SUMARIO**

El presente trabajo describe el proyecto de implementación de una planta piloto automatizada de procesamiento de minerales, la primera de ese tipo en el país y una de las más avanzadas en tecnología a nivel internacional. El objetivo de su concepción ha sido el de capacitar y actualizar a técnicos e ingenieros a través de la utilización de sistemas reales que cumplan a su vez con las consideraciones actuales de protección ambiental y seguridad industrial, permitiéndoles estar en condiciones de implementar sistemas más eficientes y que apoyen al mejoramiento de los procesos productivos.

Para hacer realidad este proyecto se contó con el apoyo financiero de entidades privadas, el concurso de empresas de servicios con experiencia en el desarrollo de proyectos ligados al sector minero e industrial en general y la participación de profesionales para cumplir con las diferentes etapas de las que constó este proyecto. En lo personal, fui responsable del proyecto desde su concepción hasta la puesta en marcha de la planta.

A siete años de su inauguración, la planta ha permitido durante este tiempo aportar a la formación de jóvenes y al desarrollo de profesionales provenientes de distintas especialidades y áreas productivas; todo esto a través de diversas actividades entre las que se pueden citar: capacitación en el control automático y supervisión de procesos y operaciones industriales, ejecución de investigación aplicada en el procesamiento de minerales, experimentación de alternativas de solución a problemas de control, así como la evaluación de sistemas de gestión del mantenimiento.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>3</b>
<b>LOS PROCESOS Y SU CONTROL</b>	
1.1 Procesos Industriales	4
1.2 Control de los Procesos	6
1.3. Concepción de la Planta Piloto Automatizada	9
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>14</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA</b>	
2.1. Criterios de Diseño de las Operaciones y Procesos	15
2.2 Obras Civiles	16
2.3. Suministro y Servicios Eléctricos	17
2.4. Montaje Mecánico	18
2.5. Puesta en Marcha de Equipos Electromecánicos	19
2.6. Instalación del Sistema de Control	19
2.7. Pruebas Iniciales de Puesta en Marcha del Sistema de Control	22
2.8. Inspecciones	23
2.9. Pruebas Operativas	24
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>25</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO</b>	
3.1 Unidad de Molienda – Clasificación	25
3.2 Unidad de Flotación	26
3.3 Unidad de Separación Sólido/Líquido	27
3.4 Tratamiento de Relaves	28

3.5 Sistema de Control Distribuido (DCS)	28
3.6 Sistema de Parada de Emergencia (ESD)	29
3.7 Sala de Control	30
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>31</b>
<b>OPERACIÓN Y CONTROL DE LA PLANTA</b>	
4.1 Operación de la Unidad de Molienda	32
4.2 Operación de la Unidad de Flotación, Circuito No. 1	34
4.3 Operación de la Unidad de Flotación, Circuito No. 2	36
4.4 Operación de la Unidad de Filtrado	36
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>38</b>
<b>SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA</b>	
5.1 Consideraciones Generales	38
5.2 Medidores e Interruptores	40
5.3 Válvulas y Variadores de Velocidad	41
5.4 Controladores de Procesos	41
5.5 Controladores Lógicos Programables	42
5.6 Sistema de Control Distribuido	43
5.7 Sistema de Parada de Emergencia	45
5.8 Sala de Control	50
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>53</b>
<b>COSTOS DEL PROYECTO</b>	
6.1 Equipamiento, Obras Civiles y Montaje Electromecánico	53
6.2 Sistema de Automatización y Control	56
6.3 Costos Complementarios del Sistema de Control	57
6.4 Costos de Gestión del Contratista	57
6.5 Costos Totales	58

<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>59</b>
<b>APLICACIÓN DE LA PLANTA PILOTO Y LOGROS OBTENIDOS</b>	
7.1 Aplicación de la Planta Piloto	59
7.2 Logros Obtenidos	62
7.3 Perspectivas de la Planta Piloto	63
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>66</b>
P&ID de la Unidad de Molienda	66
<b>ANEXO B</b>	<b>68</b>
Diagrama de Flujos de la Planta	68
<b>ANEXO C</b>	<b>70</b>
Formato de Estudio de HAZOP	70
<b>ANEXO D</b>	<b>72</b>
Distribución de la Sala de Control	72
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>72</b>

## **PRÓLOGO**

El avance de la Tecnología se evidencia actualmente en casi todas las actividades del quehacer humano y desde luego en el sector industrial. La necesidad de implementar sistemas de control automático con mejores y más confiables equipos, ha originado la aparición de instrumentos y sistemas multifunción, lo cual a su vez ha permitido a las empresas de producción, contar con una mayor gama de posibilidades de selección de los mismos. Está demostrado que la productividad de las empresas se incrementa en gran medida debido al nivel de automatización de sus procesos más importantes. Hoy muchas empresas nacionales han apostado por la modernización de sus sistemas de medición y control, pero también se ha podido constatar que no en todos los casos se ha tenido una selección correcta de los mismos, resultando en una solución ya sea inadecuada o de un costo muy elevado. Aquí el contar las empresas con el personal idóneo es fundamental tanto para la definición de las necesidades en sistemas de control, las especificaciones de los equipos, como en la efectiva coordinación con los proveedores de éstos y de los servicios de ingeniería requeridos. El dominio de estos aspectos por parte de aquel personal es por lo tanto imprescindible.

El aspecto formativo y de capacitación en temas asociados al funcionamiento y manejo de una planta de producción, consta de diferentes tópicos que típicamente se incluyen en diversos cursos, cada uno de los cuales puede incluir o no sesiones prácticas de laboratorio. Sin embargo es inusual contar con un ambiente de aplicación real que integre aquellos temas. La planta piloto automatizada ubicada en las instalaciones de Tecsup, se concibió, diseñó e implementó justamente para cubrir ese vacío, pues adicionalmente a la instrumentación y el control de procesos, aquella permite experimentar y probar aspectos asociados a disciplinas diversas: procesamiento de minerales, evaluación del consumo energético, gestión del mantenimiento, entre otros.

Para efectos de describir las diferentes etapas desde el diseño hasta la puesta en marcha de la planta, así como sus alcances, el presente informe se ha dividido en seis capítulos cuyos contenidos se describen a continuación.

El capítulo I, se inicia indicando las diferencias entre los distintos tipos de procesos que pueden encontrarse en plantas industriales, para luego hablar sobre la evolución de las

tecnologías que se utilizan en el control automático de los mismos. Finalmente se explican las razones por las cuales se optó por el tipo de proceso de producción con que cuenta la planta piloto, motivo del presente trabajo, así como el tipo de sistema de control elegido para la misma.

Las diversas etapas de construcción de la planta piloto se describen en el capítulo II, incluyendo las obras civiles, instalaciones eléctricas, calibración y configuración de los equipos, así como las pruebas de funcionamiento previas a la entrega del proyecto.

A través del capítulo III, se tiene una breve descripción de las diferentes unidades que componen la planta piloto de procesamiento de minerales y se hace referencia a la instrumentación con que se cuenta para la medición y control de las variables de procesos de cada una de las unidades mencionadas.

En el capítulo IV, se explica la forma en que trabaja cada unidad operativa, incluyendo la función de los distintos dispositivos y equipos de campo que intervienen, así como la relación de éstos con el sistema de control de la planta.

La descripción de la instrumentación de campo, así como la especificación de los equipos de control se encuentra en el capítulo V. Se pone aquí especial énfasis en el sistema de control distribuido y el sistema de parada de emergencia.

El capítulo VI, contempla los costos del proyecto, mientras que el capítulo VII describe los alcances tanto en el aspecto de formación y capacitación de profesionales de la industria, como el de investigación aplicada y de servicios. Aquí también se hace una reseña de las posibilidades futuras de la planta piloto.

Finalmente, se incluye las conclusiones obtenidas, los anexos que son referidos en los distintos capítulos del presente informe y la bibliografía respectiva.



## **CAPÍTULO I**

### **LOS PROCESOS Y SU CONTROL**

La necesidad ha dictado muchos de los avances en tecnología. En ningún otro campo esto es tan aparente como una disciplina llamada "instrumentación", una palabra desconocida, hace algunas décadas atrás. Durante este período, ha habido una evolución desde la fabricación de una serie de dispositivos, desarrollados para cubrir una necesidad específica de medición y control, hasta una ciencia en donde las necesidades y la economía de plantas enteras, están basadas en estrategias de control y sistemas de instrumentación adecuados. Los esfuerzos de muchos años de trabajo han permitido que en la actualidad se tenga la posibilidad de elegir entre varias opciones. La elección al final debe considerar aspectos tan importantes como por ejemplo para un proyecto de mediana o gran envergadura:

- Análisis del grado de las necesidades de instrumentación y control.
- Tipo de tecnología a aplicar; con proyección para el futuro, en el caso de ampliación de la planta.
- Personal calificado debidamente entrenado para el mantenimiento de los equipos.
- Tiempo de retorno de la inversión realizada.

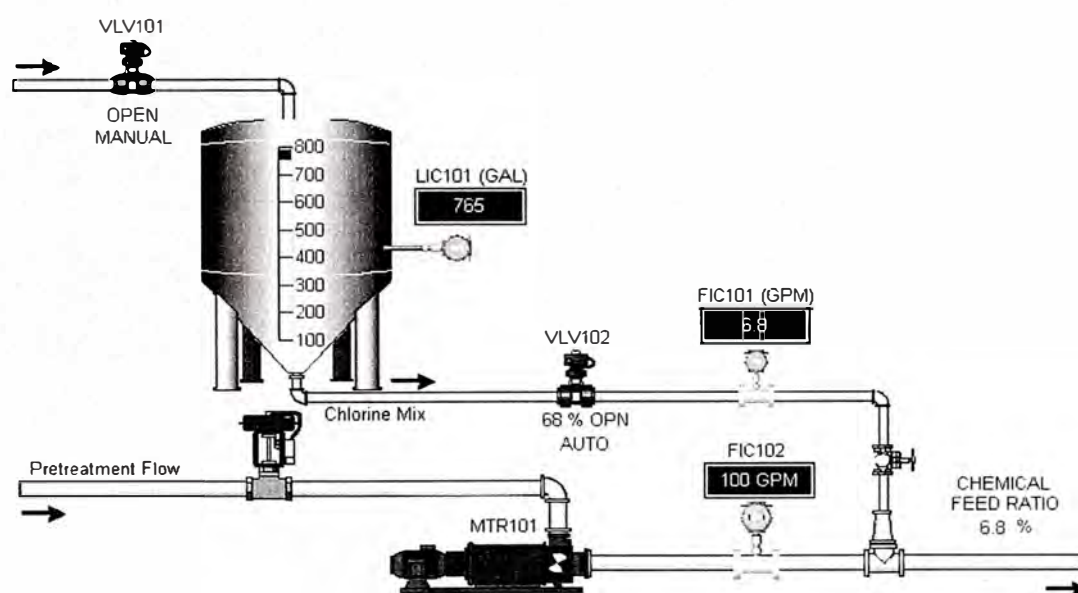
El término "control de procesos", es también de uso frecuente en la jerga industrial. Está referido a la toma de decisiones para mantener una o más variables de procesos, dentro de límites pre-establecidos o hacer cumplir una cierta secuencia de operaciones, programada de antemano por el responsable. Actualmente, esto es realizado por equipos y sistemas, sin la intervención directa del operador, vale decir es el denominado "control automático" de dichos procesos.

Hoy en día, la palabra "automatización" es utilizada para referirse al mismo aspecto. Sin embargo es conveniente señalar que este término no necesariamente se limita aquí al control automático en sí, sino que podría incluir la integración de los equipos, las máquinas y los procesos en un sistema total, en el cual también se puede considerar la parte administrativa de la planta.

## 1.1 Procesos Industriales

En términos generales existen dos tipos de procesos de producción en la industria: los denominados procesos continuos y los procesos discontinuos. Los procesos continuos, ver Fig. 1.1, tienen ese nombre debido a que en ellos se trabaja con materiales cuyo flujo es continuo. Las materias primas ingresan a una velocidad constante y pasan a través de un número de operaciones de transformación, hasta que el producto surge en la última operación. Los materiales no permanecen estacionarios en ninguna unidad de procesamiento que no sean tanques de almacenamiento intermedios o finales. Cada equipo tiene una tarea específica y debido a la gran cantidad de pasos de procesamiento y unidades físicas, los equipos de transporte tales como bombas, sopladores y fajas transportadoras cumplen un rol muy importante.

Los controladores necesarios deben asegurar que el proceso opere en forma estable con el mínimo de disturbios y “picos” como sea posible. La mayoría de los lazos de control están ocupados con mantener constantes variables tales como presión, flujo, temperatura, nivel y analíticas. Unas cuantas operaciones requieren operaciones de temporizado ó secuenciamiento de pasos.



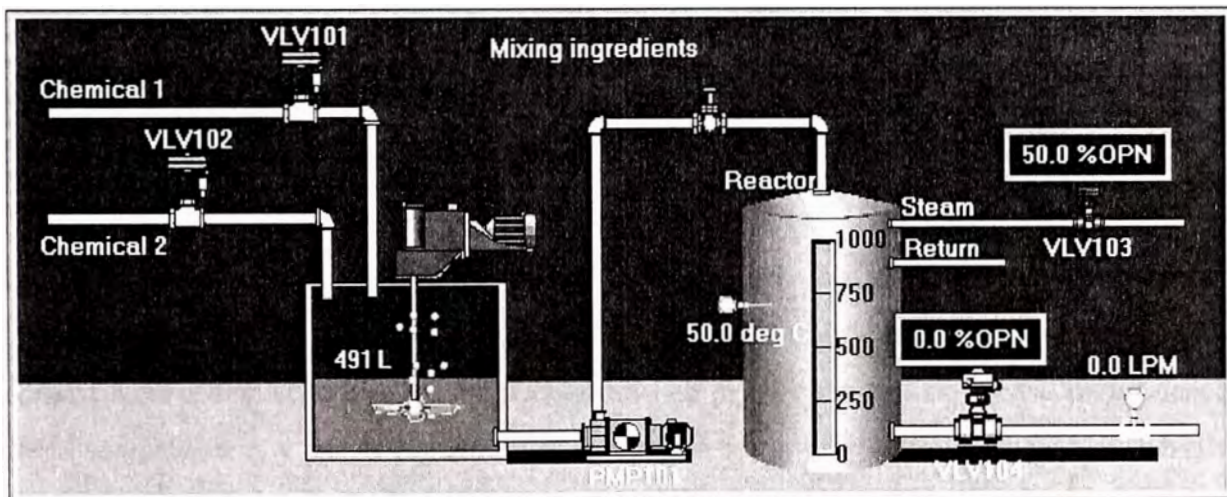
**Fig. 1.1** Ejemplo de un proceso continuo (cortesía de National Instruments)

Los procesos discontinuos, ver Fig. 1.2, se pueden clasificar en dos tipos: los de “tipo batch” o por lotes y los procesos tipo manufactura. En los primeros, al igual que en los continuos, se trata de mantener constante una o más variables. Sin embargo, aquí no hay un

flujo continuo de material. Estos procesos tienen un número diferente de operaciones sucesivas químicas o físicas las cuales son llevadas a cabo en uno o más reactores o tanques para transformar las materias primas en los productos deseados.

Un proceso batch (por lotes) se realiza siguiendo una receta. La mezcla de ingredientes permanece en un tanque o reactor hasta que sus características hayan cambiado para cumplir con ciertas especificaciones. Realizando esto en un número reducido de contenedores, se minimiza el espacio requerido y el equipamiento necesario, así como el costo de la planta. Sin embargo, debido a la naturaleza del proceso, las cantidades de producto, que se obtienen en un tiempo razonable, son limitadas. Estos procesos se relacionan principalmente con cualquiera de los siguientes:

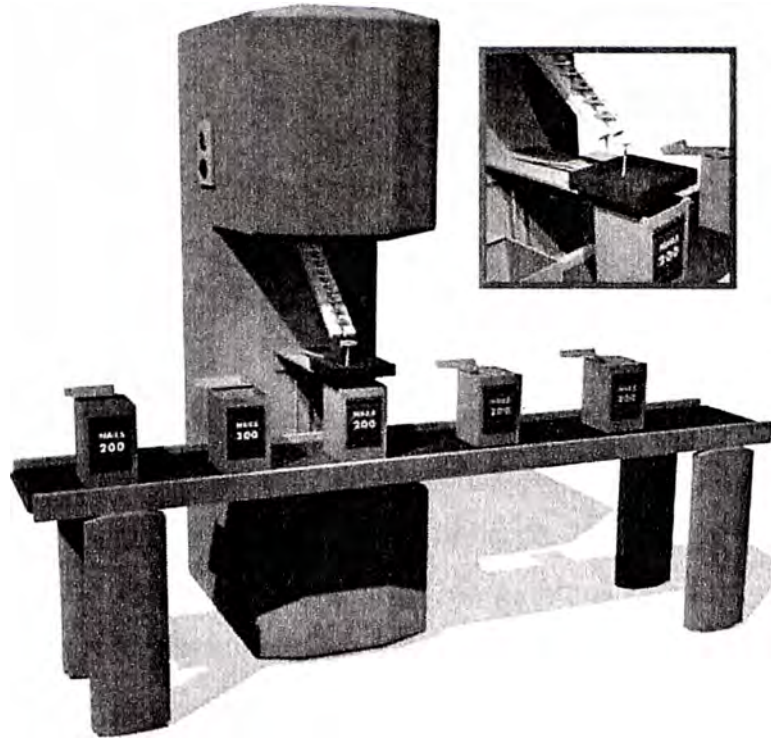
- Productos logrados en muchas y diferentes formulaciones pero en relativamente pequeñas cantidades, tales como perfumes, productos farmacéuticos y detergentes sintéticos.
- Productos costosos con mercados limitados o corta vida útil tales como perfumes.
- Productos que requieren largos tiempos de fermentación ó de maduración en condiciones especiales (vino, cerveza, etc.).



**Fig. 1.2** Ejemplo de un proceso tipo batch (cortesía de National Instruments)

En un proceso tipo manufactura, ver Fig. 1.3, a diferencia de los anteriores, no se trata de mantener constante variable alguna. Más bien aquí, lo importante es cumplir con una serie de pasos (que se repiten cíclicamente) que aseguren la calidad del producto final. Actualmente se emplean para el control de la mayoría de ellos, los denominados controladores lógicos programables (PLC por sus siglas en inglés). Sin embargo, también

se utilizan para este objetivo sistemas electro-mecánicos, electro-neumáticos, electro-hidráulicos y en fin todos aquellos relacionados a la producción en serie de elementos bajo el cumplimiento de un programa o secuencia de pasos pre-establecidos.



**Fig. 1.3** Ejemplo de un proceso tipo manufactura (cortesía de Proxsensors)

## 1.2 Control de los Procesos

En principio, todos los procesos industriales fueron controlados manualmente por el operador (hoy aún existe este tipo de control en muchas fábricas); la labor de este operador consistía en observar lo que estaba sucediendo en el proceso (tal es el caso de un descenso en la temperatura) y hacía algunos ajustes (como abrir una válvula de vapor), basado en instrucciones de manejo y en la propia habilidad y conocimiento del proceso por parte del operador. Este lazo - proceso a sensor, a operador, a válvula, a proceso - se mantiene como un concepto básico en el control de procesos.

El control de los primeros procesos industriales se basó en la habilidad de los operadores. En éste sin embargo, sólo las reacciones de un operador experimentado marcan las diferencias entre un control relativamente bueno y otro errático; más aún, esta persona estará siempre limitada por el número de variables que pueda manejar. Por otro lado, la recolección de datos requiere de esfuerzos mayores para un operador, que ya está

dedicando tiempo importante en la atención de los procesos observados y que por lo tanto se encuentra muy ocupado como para escribir números y datos, que evidentemente son necesarios para un mejor control sobre el proceso. Todo esto resulta en tener datos que pueden ser imprecisos, incompletos y difíciles de manejar.

El control automático a diferencia del manual, se basa en dispositivos y equipos que conforman un conjunto capaz de tomar decisiones sobre los cambios o ajustes necesarios en un proceso para conseguir los mismos objetivos que en el control manual pero con muchas ventajas adicionales. Adicionalmente a esto, existe una serie de elementos que pueden integrarse a este conjunto para lograr cumplir con varias funciones, algo que como se ha comentado, sería imposible de ser logrado por un operador con la precisión y eficiencia deseadas.

Los primeros sistemas de control datan de la era de la Revolución Industrial. Sin embargo, con la aparición de los sistemas neumáticos de control empieza lo que podría considerarse el inicio de la era de la automatización. Sin embargo, las limitaciones radicaban en la lentitud de la respuesta del sistema de control de cambios rápidos y frecuentes y a su inadecuada aplicación en situaciones en que los instrumentos estuviesen demasiado alejados (pérdidas).

Posteriormente, los dispositivos electrónicos aparecieron como alternativa de reemplazo a los controladores neumáticos. Pero fundamentalmente, el desarrollo de los microprocesadores es el que ha permitido una serie de ventajas en la medición y control de procesos con el surgimiento de los denominados transmisores y controladores digitales, de los PLC, además de sistemas especializados como por ejemplo, las máquinas de control numérico computarizado (CNC).

Con la aplicación de las computadoras digitales en el control de procesos industriales, aparecen los sistemas de control digital directo, hasta los sistemas de supervisión y control actuales, con los cuales se logra manejar un gran número de procesos y variables, recopilar datos en gran cantidad, analizar y optimizar diversas unidades y plantas e incluso, realizar otras actividades, tales como planificación del mantenimiento, control de calidad, inventario, etc.

Los controladores industriales más comunes incluyen los PLC, los controladores de procesos, los llamados sistemas SCADA, los sistemas de control distribuido y más recientemente las computadoras personales aplicadas al control industrial. Válvulas, resistencias calefactoras, brazos de robot, bombas, motores y fajas transportadoras son

algunos de los actuadores que un controlador puede usar para operar un proceso en forma automática.

Al hablar de control automático, es necesario indicar que podemos referirnos a alguna de las siguientes posibilidades:

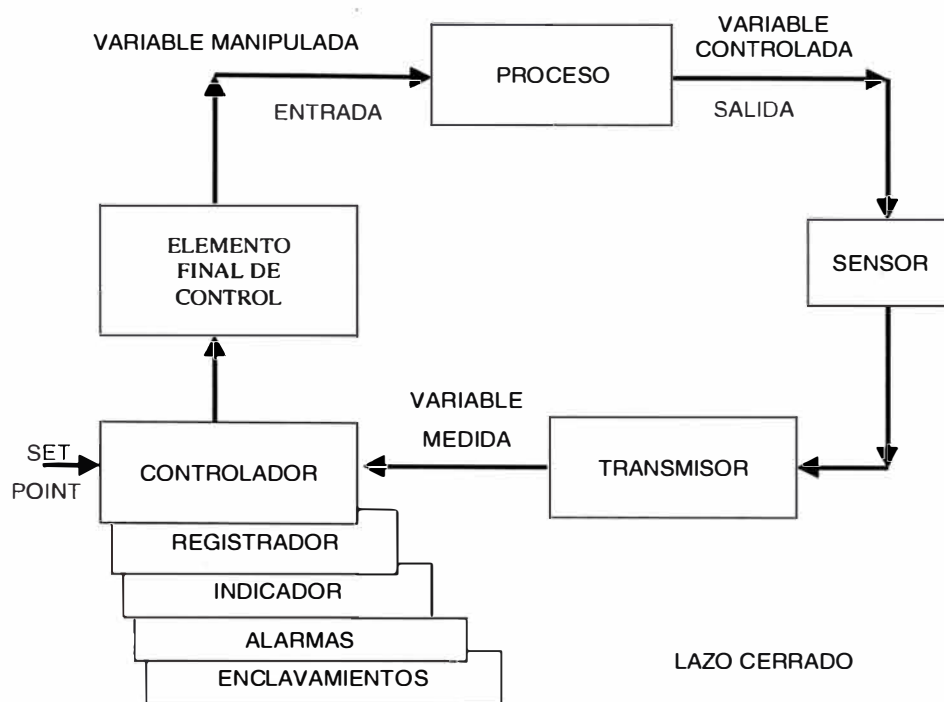
- Control por mandos
- Control regulatorio

En el primer caso, se trata del control por acciones discretas, por ello es que también se le conoce como control discreto. Esto es típico de procesos del tipo manufactura, en donde no solamente las señales de entrada al sistema de control son del tipo discreto, sino también lo son las señales de control que se envían hacia los actuadores (encendido/apagado, arranque/ parada). Las acciones de control obedecen aquí a una secuencia o programa pre-establecido y se dan en una forma de paso a paso en donde cada uno de estos pasos empieza solamente si el previo ha finalizado. Los equipos de control utilizados en estos casos son típicamente los PLC.

A diferencia de los anteriores, un control por regulación, ver Fig. 1.4, modifica continuamente el valor de una variable (la cual es denominada variable manipulada) con el fin de mantener otra variable constante o dentro de cierto rango (la llamada variable controlada). Evidentemente las señales que ingresan aquí al sistema de control son del tipo analógico. Sin embargo, las salidas podrán ser continuas o discretas dependiendo de las características de salida del equipo de control o de las características del actuador conectado al anterior.

Las acciones de control obedecen aquí a decisiones basadas en la diferencia resultante de la comparación de la variable que se desea controlar con un valor de referencia o valor de consigna (traducción de la palabra inglesa set point como se le conoce en la jerga industrial).

Un controlador continuo o también denominado regulador de procesos, recibe información de flujos, temperaturas, presiones y otras variables continuas que pueden cambiar en cualquier momento. Allí decide entonces el equipo de control si éstas tienen valores o niveles aceptables y en función a esa decisión, envía la señal de salida con el valor necesario al actuador para que éste modifique alguna variable en el proceso si esto fuese necesario.



**Fig. 1.4** Sistema de control por regulación

Algunos procesos por su complejidad requieren formas de control especiales que cumplan con ciertos requerimientos específicos. La tecnología digital ha permitido que a diferencia de años anteriores sea posible el control preciso de este tipo de procesos. Por otro lado el desarrollo de computadoras digitales y la necesidad de integrar los dispositivos de control impulsaron la aparición de las redes industriales y de protocolos de comunicación.

Los sistemas de control computarizados tienen muchas aplicaciones, especialmente en la supervisión remota de los procesos y la clasificación de un sistema de este tipo depende de su tamaño, función y filosofías de control. Hoy en día y tal como nos consta como usuarios de computadoras, el mayor desarrollo se encuentra en el software, que en el caso de su aplicación al control y supervisión de procesos industriales, permite una serie de beneficios a los usuarios, impensados hasta hace algunas décadas atrás.

### 1.3. Concepción de la Planta Piloto Automatizada

Como ya se mencionara anteriormente el objetivo principal para construir la planta piloto ha sido de capacitar y actualizar a técnicos e ingenieros en los sistemas actuales de

medición y control a través de la utilización de una planta real de procesamiento de minerales, la cual, aunque hecha a escala, consta de todas las etapas típicas, desde la de molienda hasta la de separación sólido – líquido, pasando por la de extracción del mineral valioso por flotación. La razón de haber elegido este tipo de proceso (pudo haber sido otro) es fundamentalmente porque la minería constituye la principal actividad productiva de nuestro país. Por otro lado se da el caso que un porcentaje apreciable de nuestros graduados cuya actividad principal está relacionada al control de procesos, están empleados en empresas del sector minero o realizan servicios de ingeniería para el mismo. Para una planta tal que consta de procesos continuos y discontinuos, se decidió implementar un sistema que incluyese elementos especializados en la medición y control de variables propias de ambos tipos de procesos y que permitiesen trabajar con tecnologías de última generación. Debido a esto, entre los equipos de control se tienen PLC, controladores de proceso y un sistema de control distribuido, además de un sistema de parada de emergencia. En todos los casos, existe comunicación de aquellos con los diferentes dispositivos de campo a través de una red con protocolos industriales y con supervisión computarizada de todos los procesos desde una sala de control. Para efectos de definir al proveedor de las instalaciones, equipos y de la ingeniería, se invitó a mediados del año 2001 tanto a empresas nacionales como extranjeras, con experiencia en este tipo de proyectos, a formalizar sus propuestas. A continuación se mencionan los elementos que dichas empresas debían incluir en sus propuestas:

#### Equipos e instalaciones:

- Sensores, transmisores digitales e indicadores digitales para cada variable del proceso.
- Paneles de operador en los puntos más importantes de la planta.
- Controladores de procesos y PLC integrados en una red digital y compatible con un software de supervisión no propietario.
- Computadoras para la red industrial y para la red administrativa.
- Sistema integrado entre ambas redes.
- Cámaras de vídeo en los puntos más importantes de la planta.
- Sala de control y supervisión y una oficina de ingeniería.
- Accesos a puntos elevados de la planta mediante escalinatas y pasarelas tal como en un ambiente industrial real.
- Sistemas de seguridad para personal y equipo.



### Alcances esperados del proyecto:

- Configuración y programación de los equipos y sistemas de automatización en forma local y remota.
- Toma en forma local de información de las variables de procesos en los diferentes puntos de la planta.
- Supervisión en tiempo real de todos los procesos de la planta, mediante el uso de computadoras conectadas a la red industrial.
- Generación de reportes de las variables de los procesos, actividad de los equipos, datos de la producción, etc.
- Pasar de un trabajo en línea, que incluya las diversas etapas de la planta formando un conjunto, a un control de cada una de ellas en forma independiente, permitiendo de este modo que diferentes grupos o equipos de participantes, trabajen cada uno sin interacción con otro grupo.

### Características Técnicas:

- Manejo de los Procesos: si bien es cierto que la planta debía ser un ejemplo del grado actual de la automatización, el contratista debía tomar las consideraciones necesarias para que sea posible el manejo individual de cada etapa de la planta; esto para permitir el trabajo por separado y en forma independiente, por parte de varios equipos o grupos de trabajo.
- Sensores y transmisores digitales: la información de cada variable debía ser obtenida en los diferentes puntos del proceso. Los transmisores a utilizar debían emplear un protocolo de comunicación digital que permita en el futuro la interoperabilidad con dispositivos de otros fabricantes. Deberían poder ser configurados tanto en forma local como en forma remota.
- Se consideró deseable contar en el área de procesos con algunos dispositivos con tecnología inalámbrica para comunicarse de este modo con los sistemas de control de la planta.
- Indicadores digitales y paneles de operador: debían ser instalados en los puntos más importantes de la planta piloto. El usuario podría así controlar y supervisar a través de

los paneles de operador algunas de las variables en forma local. Era deseable que contasen éstos con una pantalla táctil (conocidas como del tipo “touch screen”) para este propósito.

- **Actuadores:** los elementos finales de control o actuadores tendrían comunicación digital con los controladores de los mismos, formando parte de la red industrial. Debía existir un software que permita obtener información de los mismos que eventualmente podría ayudar a su mantenimiento. Como debería suceder con los dispositivos de medición de variables de procesos, habrían puntos de toma de información accesibles para el usuario.
- **Controladores de procesos y PLC:** estos equipos debían estar integrados en una red digital y ser compatibles con un software de supervisión no propietario. Igualmente la comunicación debía efectuarse a través de una red industrial que utilizase un protocolo abierto.
- **Sistema de control y supervisión por computadora:** debían existir computadoras para el control y supervisión de todos los procesos desde una sala de control. El tipo de computadoras para este propósito debía ser industrial. El software utilizado debía ser no propietario.
- **Sala de control y supervisión:** la sala de control debía contar con un ambiente similar a los existentes en plantas de producción en donde además de las computadoras ubicadas en consolas especiales, se tendrían eventualmente los gabinetes con los controladores de procesos y PLC necesarios, tal como sucede en situaciones industriales. El sistema debía permitir la generación de reportes, detección y manejo de alarmas por parte de los usuarios.
- **Ambiente industrial:** la disposición de los tanques de procesos, tuberías, bombas, compresoras y otros componentes del proceso debía ser similar a los que se dan en ambientes industriales. Del mismo modo en relación a los pasillos y accesos, con la inclusión de escalinatas y pasarelas elevadas que diesen la apariencia industrial requerida.
- **Sistemas de seguridad:** los diferentes procesos debían contar con los dispositivos, equipos y sistemas de seguridad necesarios para proteger tanto al personal que estuviese utilizando la planta, como a los equipos de medición y control de la misma. Asimismo, debían ser ubicados avisos de seguridad en puntos adecuados del ambiente

y debían emplearse en las señales mencionadas, los símbolos y los colores utilizados normalmente en estos casos.

- Reemplazos: el contratista debía prestar asistencia técnica a Tecsup en caso de presentarse problemas con los dispositivos, equipos y sistemas provistos por él. De existir fallas de fabricación, se comprometería a reemplazar lo defectuosos en el más breve plazo sin costo adicional para la institución. Si el problema se generaba por un mal uso de los mismos, debía proveer un reemplazo del mismo, facturándole a la institución los costos de este reemplazo.
- Entrenamiento: el contratista se comprometería a dar entrenamiento al personal asignado por Tecsup en el manejo de los dispositivos, equipos, sistemas y en general de cada sección que conforma la planta como parte de la oferta.

## **CAPÍTULO II**

### **CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA**

Se comentó en el capítulo anterior el proceso inicial para obtener propuestas de empresas interesadas en la implementación del proyecto. Con el estimado de una inversión cercana al millón de dólares, se buscó el financiamiento respectivo. El aporte principal (no reembolsable) para este proyecto provino de una fundación internacional (aproximadamente 50% del total) y de empresas de producción locales (40%). A mediados del año 2002 se definió a la empresa que finalmente se encargó del proyecto. Ésta, especializada en montaje de plantas incluyendo mineras, se asoció con una empresa proveedora de equipos de automatización y de servicios de ingeniería, firmándose el contrato respectivo con Tecsup en Septiembre del mismo año.

Las partes principales del acuerdo firmado por ambas partes comprendían la ingeniería básica y de detalle, suministro de diversos materiales y equipos, construcción y puesta en marcha de la planta piloto, tal como se enumera a continuación:

#### **I.- Equipamiento, obras civiles y montaje electromecánico**

- Desarrollo de la ingeniería.
- Suministro de equipos, materiales directos y consumibles.
- Obras civiles.
- Suministro de materiales y obras eléctricas.
- Obras de montaje mecánico.
- Pruebas y puesta en marcha.
- Entrega de materiales de operación de la planta.

#### **II.- Sistema de automatización**

- Proyecto de ingeniería.
- Suministro e instalación del sistema de control de la planta.

#### **III.- Gestión de las diversas etapas del proyecto**

## 2.1. Criterios de Diseño de las Operaciones y Procesos

El diseño de los componentes mecánicos de la planta piloto de flujo continuo tomó como base una capacidad de procesamiento entre 50 a 150 lbs/h de mineral. Se consideró que debía contar con secciones de molienda y su clasificación, acondicionamiento, flotación, espesamiento y filtración. Las características constructivas son del tipo estándar para efectos de este tipo de plantas, incidiéndose en que las operaciones y procesos de concentración considerados son exclusivamente para medios no ácidos, es decir con valores de pH iguales o mayores a 7.0, esto con el fin de evitar el deterioro prematuro de los equipos a utilizar. El tamaño del mineral a ser alimentado a la planta se definió como 100% @ - ¼". Adicionalmente se tomó en consideración para efecto del diseño de los equipos mecánicos, que se debían obtener al final del proceso, uno o dos productos de concentración.

Tecsup se responsabilizó del servicio de suministro de agua y de la energía eléctrica así como el manipuleo y eliminación de residuos sólidos y efluentes fuera del recinto de planta. Del mismo modo, la preparación de un programa logístico considerando aspectos tales como el carguío de mineral a la tolva de finos o la preparación de reactivos y su ingreso a los alimentadores respectivos (previas al inicio de cualquier puesta en operación de la planta), la descarga y limpieza de los equipos al final del trabajo efectivo, así como la limpieza de pisos y zonas aledañas a la planta.

Para el diseño de la tolva de finos, se hizo conocer al proveedor de los equipos mecánicos, que la planta iba a operarse determinados días de la semana y durante un lapso aproximado de 8 horas al día. Se consideró un mineral con G.S. 3.0 TM/m<sup>3</sup>. Según esto y tomando un promedio de procesamiento de 125 lb/h (0.057 TM/h) se tuvo:

Para 8 horas:  $0.057 \text{ TM/h} \times 8 \text{ h} = 0.46 \text{ TM}$

Volumen requerido de la tolva para ese lapso:  $0.46 \text{ TM} / 3.0 \text{ TM/m}^3 = 0.153 \text{ m}^3$

Para efectos prácticos se diseñó la tolva para un exceso de 50% (para eventuales fluctuaciones de gravedad específica del mineral), o sea de aproximadamente 0.25 m<sup>3</sup>. Los cálculos realizados en el proceso de balance de materiales, tanto en la unidad de molienda como en las sucesivas, determinaron los tamaños de los equipos que se iban a requerir en las diferentes etapas de procesamiento que componen la planta, así como sus condiciones de trabajo.

## 2.2 Obras Civiles

Tecsup proveyó para el proyecto un local techado rectangular de aproximadamente 176 m<sup>2</sup>. Los criterios para la construcción de la planta incluyeron adecuar la infraestructura proyectada al local existente con el objeto de realizar la menor cantidad de modificaciones posibles en éste.

El trabajo principal consistió en disponer de una estructura adecuada de soporte de los equipos mecánicos, basada en una losa de concreto en toda el área de la planta proyectada y sus correspondientes pedestales. Se consideró una adecuada pendiente y altura sobre el nivel de la losa. Para esto se demolió la losa existente.

Se proyectó un sistema de drenaje consistente en canaletas perimetrales de concreto armado para recoger los líquidos discurriendo por la losa, ya sea por operación o limpieza y conducirlos a un tanque de bombeo.

Por otro lado se trazaron las canaletas subterráneas para la conducción de cables de alimentación de energía eléctrica así como aquellos de comunicación de los equipos de automatización. Se instalaron también pozos de tierra separados para los equipos eléctricos y los equipos electrónicos, como es requerido en instalaciones de este tipo.

En resumen, las obras civiles ejecutadas fueron:

- Trabajos preliminares tales como la demolición de la losa de concreto existente dentro del área proyectada y eliminación exterior de los escombros. Se hizo seguidamente el trazo y replanteo topográfico.
- Movimiento de tierras, tareas que incluyeron: corte, excavación y relleno con material granular compactado.
- Obras de concreto, las que consistieron en el solado (con un espesor de 2 pulgadas), la construcción de canaletas y pozos, la construcción de pedestales y la construcción de la losa.
- Trabajos varios, tales como embebidos e insertos metálicos, la colocación de la rejilla metálica de protección en las canaletas, la colocación del grout de alta resistencia (con un espesor de 1 pulgada) luego del montaje definitivo de los equipos, el sellado de las juntas de extensión, así como la limpieza dentro de la zona de trabajo y sus áreas de influencia mientras duró la fase de obras civiles del proyecto.

### 2.3. Suministro y Servicios Eléctricos

Las consideraciones generales en la parte eléctrica de la planta, fueron que debía contarse con una capacidad instalada de alrededor de 30 kW, siendo la máxima demanda estimada en unos 24 kW.

Se debía contar con una tensión nominal de 380V trifásicos para la parte de fuerza y 220 V monofásicos para la parte de control.

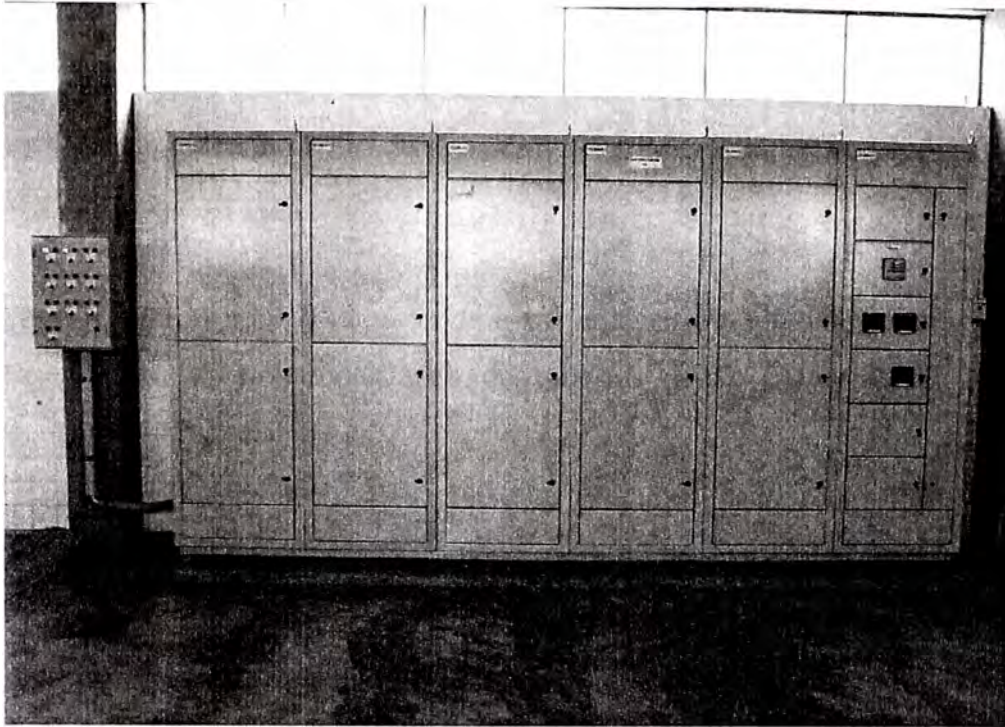
La distribución de la energía eléctrica se realiza a través de un centro de control de motores (CCM) del tipo auto-soportado. Para efectos de la instalación de los equipos en éste, se determinó que tuviese unas dimensiones aproximadas en centímetros de 20x18x60 (altura, ancho y profundidad).

El CCM contiene los equipos de control de los motores eléctricos, tales como contactores eléctricos, un PLC y variadores de velocidad, siendo la conexión entre éstos y los motores, una del tipo subterráneo y contando con una malla a tierra de protección de una resistividad menor a 5 ohmios.

Las tareas ejecutadas en esta parte incluyeron:

- Montaje del CCM.
- Acondicionamiento y montaje de electro-ductos desde el punto de alimentación al CCM.
- Cableado y conexionado de la alimentación principal al CCM.
- Acondicionamiento y montaje de electro-ductos desde el CCM a todos los motores eléctricos.
- Instalación de cables de fuerza y conexionado desde el CCM a todas las cargas puntuales.
- Instalación de cables de control y conexionado para mando remoto.
- Instalación del sistema de malla a tierra para los equipos eléctricos.
- Prueba y puesta en servicio.

La Fig. 2.1 muestra el CCM instalado en la planta.



**Fig. 2.1** Centro de Control de Motores

#### **2.4. Montaje Mecánico**

Esta etapa vino a continuación de las obras civiles y eléctricas. Se incluyó en esta partida el transporte hacia Tecsup de los equipos previamente ensamblados en las instalaciones del proveedor. El listado general de los equipos de procesos que fueron instalados es el siguiente:

- Un transportador de faja de 12" con sistema motriz y motor-reductor de 1 HP.
- Una tolva de almacenamiento de finos con faja alimentadora al molino de bolas.
- Un molino de bolas de 12" de diámetro y 12" de largo.
- Cuatro bombas centrífugas verticales de ¾" con motores de 0.75 HP.
- Dos acondicionadores de minerales de 12" de diámetro y 18" de alto.
- Dos bancos de seis celdas de flotación Sub – A # 5.
- Dos espesadores de 36" de diámetro y 36" de alto.
- Dos sistemas de filtrado contando cada uno de ellos con un filtro, una bomba de vacío, un receptor de filtrado, un soplador de lóbulos y una bomba de filtrado.
- Un alimentador para reactivos secos de 6" de diámetro con motor de 0.5 HP.
- Dos alimentadores tipos cuadruplex para reactivos líquidos.



- Una bomba de eje vertical de 1 y ½" x 24" con motor de 2 HP.
- Un hidrociclón de 6" del tipo de apertura de apex regulable manualmente.
- Un tanque para almacenamiento de agua con 3 m<sup>3</sup> de capacidad con indicador de nivel y válvula de control de descarga.

Las tareas que siguieron a la colocación de estos equipos en sus ubicaciones ya definidas previamente, fueron las interconexiones de tuberías y las fijaciones de los anclajes respectivos.

## **2.5. Puesta en Marcha de Equipos Electromecánicos**

Al culminar el montaje electromecánico se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

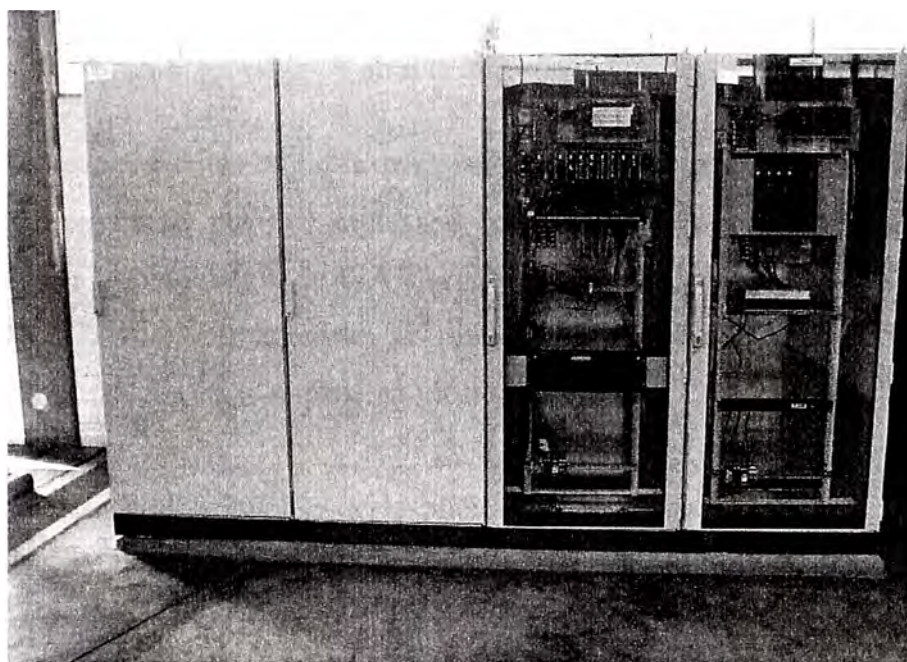
- Pruebas de vacío, en las cuales disponiendo de la energía eléctrica necesaria se pusieron en operación todos los equipos electromecánicos instalados para verificar su correcta operación mecánica y eléctrica, haciéndose los ajustes del caso.
- Pruebas con carga, en las cuales disponiendo de la energía eléctrica, mineral, agua y reactivos necesarios, ya cargados en sus respectivos equipos de distribución, se puso en operación la planta completa para efectos de comprobar la continuidad y correcta operación de todos los equipos, haciéndose los ajustes del caso.

Estas actividades fueron ejecutadas por personal de la institución, con alguna experiencia en plantas minero - metalúrgicas, pero supervisadas y guiadas por el contratista; esto con la idea de familiarización tanto con las operaciones y procesos como con los equipos instalados.

## **2.6. Instalación del Sistema de Control**

Todos los trabajos de instalación de equipos de medición y control estuvieron a cargo de la empresa proveedora de equipos de automatización y de servicios de ingeniería. Estos trabajos se iniciaron con la conexión de los equipos de campo y los de panel, así como la comunicación de éstos con los equipos incluidos en el CCM y los gabinetes conteniendo el

sistema de control distribuido (DCS por sus siglas en inglés) y sistema de parada de emergencia (ESD por sus siglas en inglés), ver Fig. 2.2. Del mismo modo, se realizaron las tareas de establecer la comunicación de estos equipos con las con las computadoras de la sala de control.



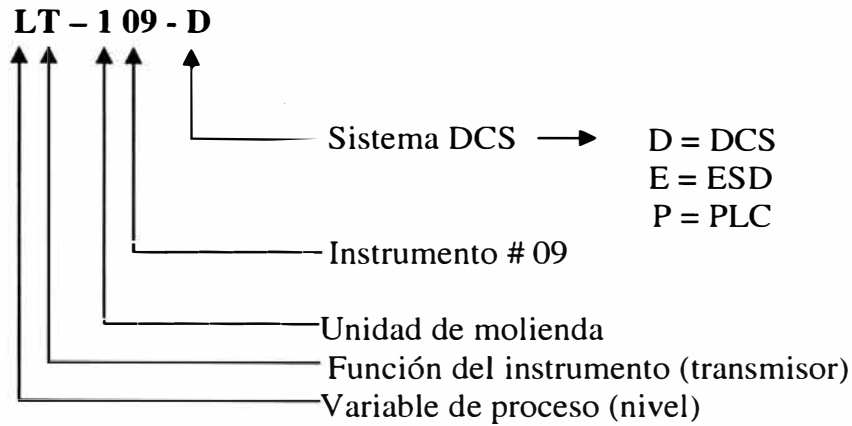
**Fig. 2.2** Gabinetes con el DCS y el ESD

Posteriormente a la instalación y cableado de los equipos de campo y panel, los cuales venían pre-configurados de fábrica, se procedió a la comprobación de los ajustes de los mismos y a realizar las pruebas de funcionamiento correspondientes (etapa de comisionamiento).

Se incluyó en esta parte la tarea de colocar una placa identificadora para cada instrumento instalado, tomando como referencia las normas de la ISA (Sociedad Internacional de Automatización) relativas a la identificación de la instrumentación.

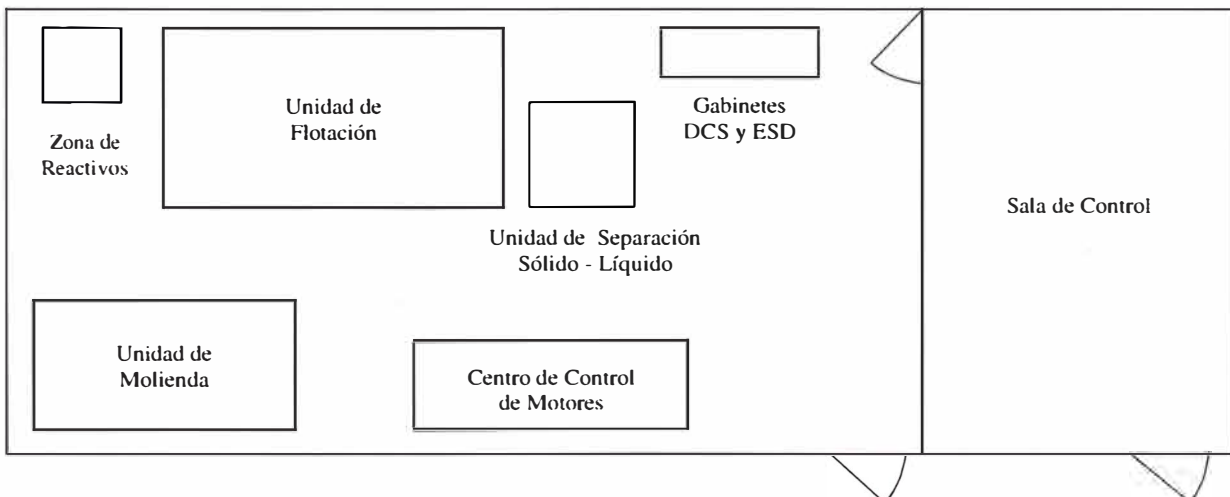
En este punto se utiliza un criterio el cual indica que la numeración de la instrumentación (conocida como “tag” en la jerga de instrumentación) se establece tomando en cuenta las “secciones” en las que se divide la planta piloto, luego se incluyen letras para identificar la variable del proceso a la cual se asocia el instrumento, la función de dicho instrumento y el sistema de control al que pertenece éste.

Por ejemplo:



Los planos correspondientes a la instrumentación y las tuberías de procesos (o más conocida como de P&ID por sus siglas en inglés) de todas las unidades de la planta, utilizan también la nomenclatura de ISA ya mencionada. Ejemplo de esto se puede apreciar en el ANEXO A que corresponde al plano desarrollado por el contratista, de la instrumentación instalada en la unidad de molienda.

La Fig. 2.3 muestra la distribución de la planta en sus partes principales, cada una de las cuales será descrita posteriormente. El ambiente tiene una longitud de aproximadamente 22 metros y el ancho es de 8 metros. La mayor parte del área corresponde a la zona de procesos. Se cuenta con un acceso independiente a la sala de control y otro a la zona mencionada y una puerta que los comunica. Adicionalmente se tiene una salida de emergencia al lado de los gabinetes que contiene al DCS y al ESD, así como una puerta metálica corrediza entre la unidad de molienda y la zona de reactivos para recepción de mineral chancado.



**Fig. 2.3** Distribución de la Planta

## 2.7. Pruebas Iniciales de Puesta en Marcha del Sistema de Control

Durante estas pruebas se trabajó en primera instancia con agua y posteriormente con flujo de mineral, poniéndose a prueba:

- La instrumentación continua y discreta a lo largo de la línea del proceso, verificando su funcionamiento a través de las diversas lecturas de los indicadores y las señales de entrada y salida correspondientes.
- Los sistemas DCS, PLC y ESD.

Particularmente en el caso de cada lazo de control, se realizaron distintas pruebas incluyendo:

- Prueba de canales: canales discretos de entrada (24 VDC) y canales discretos de salida (24 VDC y contacto seco), canales analógicos de entrada (4-20 mA, con conexión a 2 hilos), canales analógicos de salida (4-20 mA) y canales tipo HART (protocolo industrial muy utilizado en sistemas de instrumentación).
- Pruebas locales, las cuales fueron las de encendido de motores de manera manual y desde las botoneras locales tanto para el encendido y apagado de los motores o válvulas. Se verificó también el correcto funcionamiento de los selectores de automático a manual.
- Pruebas remotas que se llevaron a cabo desde las estaciones de operador ubicadas en la sala de control de la planta, mediante el uso de las pantallas de supervisión y software de control.

En todos los casos se utilizaron formatos previamente definidos para el seguimiento de las distintas señales involucradas. Las herramientas utilizadas para las pruebas de funcionamiento fueron:

- Multímetros digitales de precisión.
- Cables para instrumentación.
- Configuradores Hand Held para pruebas HART.
- Equipos de calibración.
- Herramientas mecánicas varias.

Las distintas pruebas se desarrollaron en dos partes: la primera constituida por las inspecciones y la segunda por las pruebas operativas para comprobar el funcionamiento del hardware y software del equipo o sistema de control.

## **2.8. Inspecciones**

Las inspecciones se llevaron a cabo con el llenado de formatos específicos tanto para el hardware como el software de cada equipo o sistema. Éstas fueron:

- Verificación del listado de las partes del hardware de componentes activos y pasivos. Las partes activas son los módulos de control, módulos de señales de entrada o salida, módulos de comunicación, fuentes de poder y estaciones de operador. En esta inspección se verificaron y registraron en un documento los modelos, números de serie y cantidades. Las partes pasivas son el resto de componentes de hardware tales como los cables del sistema y los terminales, registrándose tanto las cantidades como los números de parte.
- Verificación del listado del software, registrándose para este fin los modelos, número de serie, versiones y cantidades de licencias a ser utilizadas por los sistemas DCS, ESD y PLC.
- Inspección de construcción de los gabinetes y el cumplimiento de sus normas y estándares de protección. Esto se verificó con los manuales respectivos.
- Verificación del correcto montaje y cableado de las fuentes de poder, con el uso de los planos o diagramas de conexión.
- Verificación del correcto montaje de los racks, de los módulos de control y de las señales de entrada y de salida. Con la ayuda de los planos de arquitectura y disposición de racks se verificó que cada módulo de control y de entrada o de salida se encontrasen en el rack y slot correctos. Se anotaron los modelos, los números de serie y las cantidades.
- Verificación del correcto conexionado de los buses de comunicación, utilizando para este fin tanto los planos de arquitectura, como los planos de conexionado de comunicación.
- Verificación del correcto conexionado de las borneras y terminales respectivos para cada uno de los módulos, utilizando para este fin los planos de conexionado respectivos.

## 2.9. Pruebas Operativas

Luego de concluidas las inspecciones se procedió a realizar las pruebas de operación del sistema para verificar el correcto funcionamiento de la integración hardware – software, Se utilizó un protocolo de pruebas y se verificó el comportamiento de los componentes bajo prueba en condiciones de operación normal y en condiciones de falla a fin de verificar el correcto funcionamiento de sus rutinas de protección. Las pruebas fueron las siguientes:

- Prueba de energizado de componentes. Esta prueba consistió en energizar computadoras, módulos de comunicación del sistema, fuentes de poder, módulos de control, módulos de entrada/salida y observar su comportamiento vía software en los casos permitidos y sus leds de indicación local. Se verificó también los niveles de alimentación del sistema.
- Prueba de redundancia de comunicación de buses. Esta prueba consistió en colocar fallas en la comunicación que comunican a los distintos racks y de esta forma verificar que la comunicación se mantiene por efectos de la redundancia de comunicación de los buses así considerados.
- Prueba de autonomía de la batería del controlador, la cual consistió en provocar el apagado de todas la fuentes de alimentación que energizan a los controladores para verificar que el programa de control no se pierde al volver nuevamente la energía.
- Prueba de las señales de entrada/salida en los módulos. Para efectos de esta prueba se utilizaron simuladores de señales, verificándose los niveles respectivos de las señales analógicas y discretas a nivel de bornera.

## **CAPÍTULO III**

### **DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO**

La planta automatizada concentra minerales por flotación. Es capaz de procesar alrededor de 100 a 150 lb/h de mineral triturado mono y polimetálico. Cuenta con tres unidades operativas principales enlazadas que son:

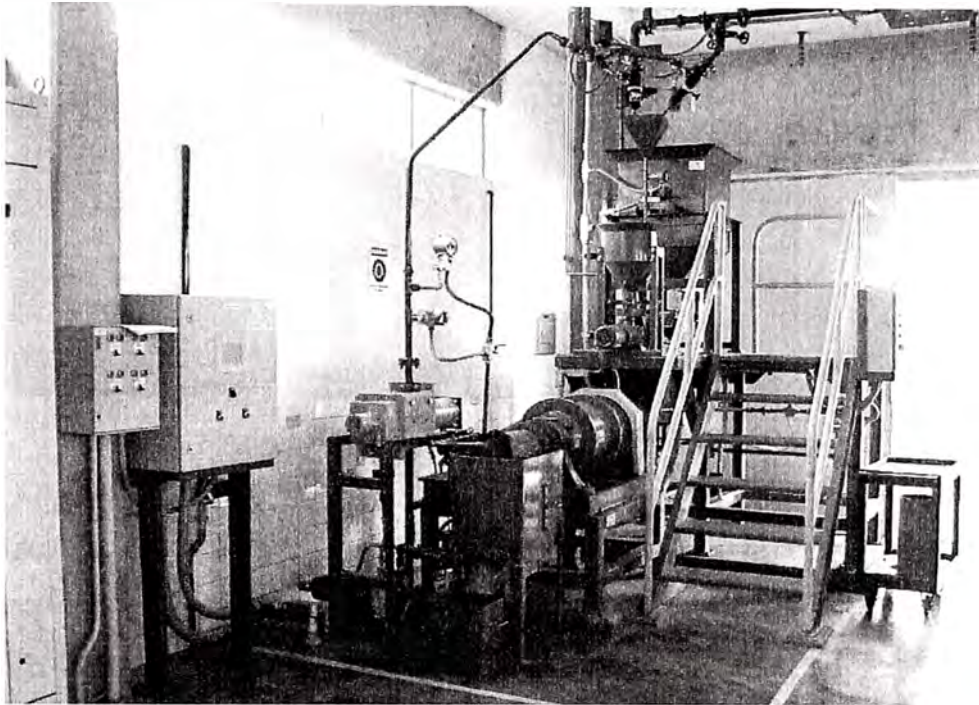
- Unidad de molienda – clasificación,
- Unidad de flotación
- Unidad de separación sólido – líquido.

El control de las variables de proceso que influyen en la buena calidad del producto concentrado se realiza mediante un sistema integrado por una red que permite que desde una sala de control se monitoreen y reproduzcan las operaciones de la planta y se puedan simular procesos metalúrgicos mediante software. Como característica adicional se debe mencionar que cualquier etapa de la planta puede ser operada independientemente otorgando esto la flexibilidad requerida para fines de capacitación. A continuación se hace una descripción de las etapas de la misma:

#### **3.1 Unidad de Molienda – Clasificación**

La etapa de molienda – clasificación prepara el mineral hasta tamaños de partículas adecuados que permitan su posterior concentración en las celdas de flotación. El mineral es acopiado en una tolva de finos que proveerá de mineral triturado al molino mediante una faja transportadora. La tolva de finos dispone de un sensor ultrasónico que indica el nivel de llenado de mineral. El molino trabaja en circuito cerrado con 2 hidrociclones. La alimentación de agua al molino se realiza desde dos tanques situados en el exterior. El flujo de agua suministrado y la dosificación de mineral así como la velocidad de operación son gobernados por medio de un PLC y de un panel de operador con pantalla táctil (touch screen) a través del cual se pueden monitorear algunos parámetros fundamentales del

proceso, tales como peso del mineral y flujo de agua y realizar algunas acciones de operación necesarias. La Fig. 3.1 es una fotografía en la que se aprecia a la izquierda el panel en donde residen estos dos equipos. Otras datos de variables tales como densidad y presión están disponibles para ser enviadas por el PLC a la sala de control, en la cual se ha previsto la instalación de un Estimador de Tamaño de Partícula (PSE), basado en un Sistema Experto, con el fin de optimizar el proceso de clasificación.



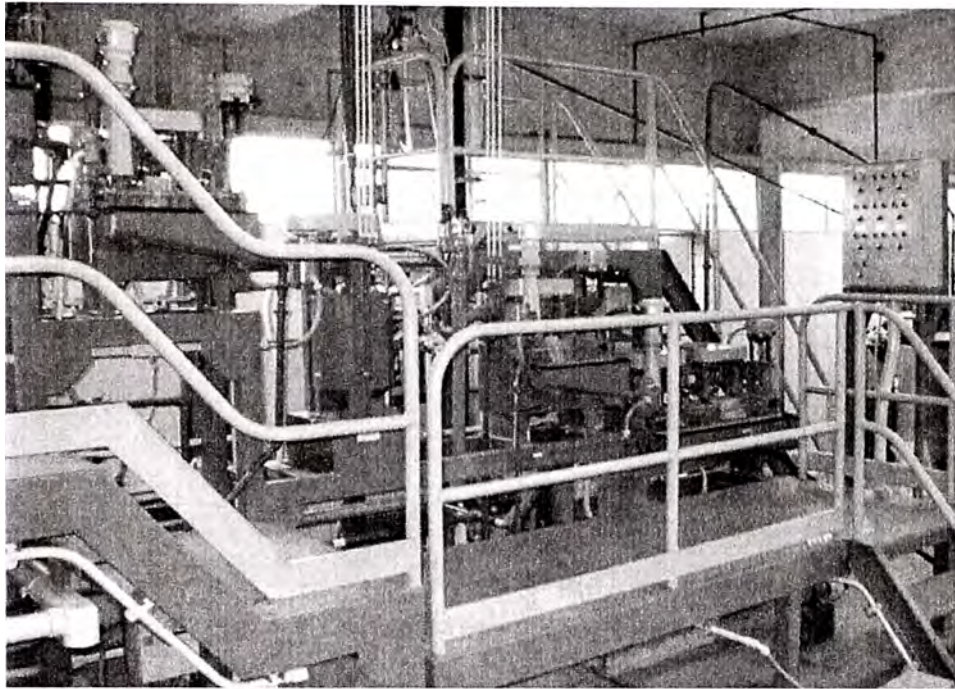
**Fig. 3.1** Unidad de Molienda – Clasificación

### **3.2 Unidad de Flotación**

Consta de dos bancos de 4 y 6 celdas respectivamente con agitación mecánica y suministro de aire mediante un soplador. La distribución de celdas está diseñada para modificar los circuitos de acuerdo al tipo de flotación que se requiera. La etapa de limpieza de concentrados obtenidos en los bancos de celdas mencionados se realiza en la celda columna, la cual es una celda de flotación vertical y de acrílico transparente. La agitación en estas celdas no es mecánica sino neumática, y el aire es inyectado por su parte inferior. Se dispone de un banco de ocho tanques pequeños de preparación de reactivos que se dosifican a las diferentes celdas de flotación e inclusive el molino, por medio de una red de tuberías de acero galvanizado. La dosificación es realizada mediante bombas peristálticas.



La Fig. 3.2 es una vista de algunas de las celdas de esta unidad.

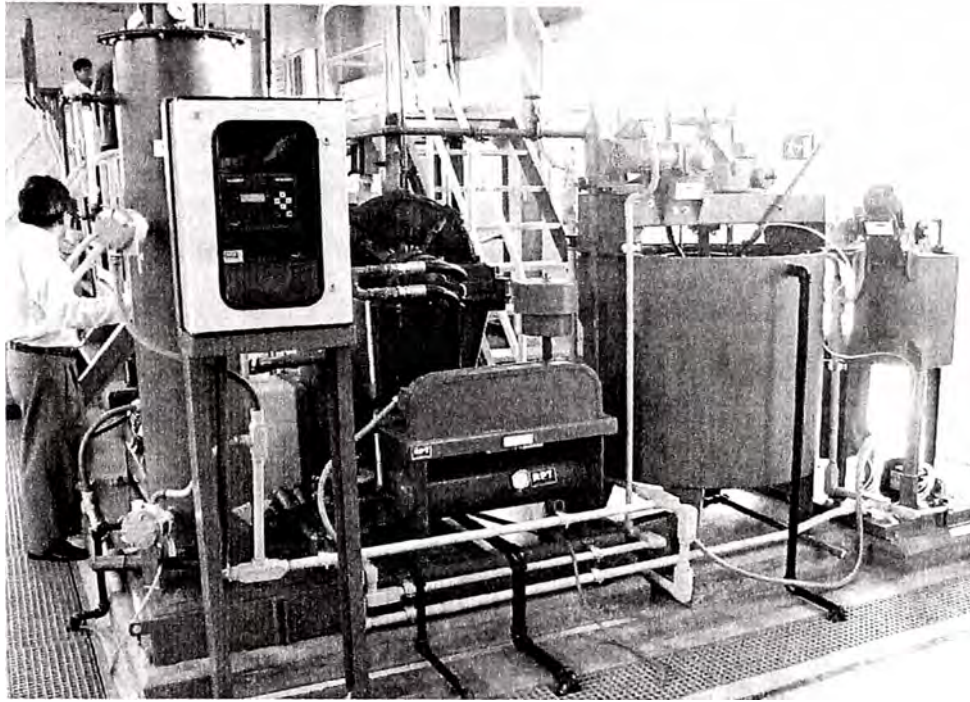


**Fig. 3.2** Celdas de Flotación

La automatización en ésta área incluye sistemas de control de nivel de pulpa en las celdas cuyos dispositivos de medición son transmisores ultrasónicos, control de flujo de pulpa a través de válvulas proporcionales y densidad de pulpa. Esta etapa es gobernada por medio de dos controladores de procesos. Además se tiene el control sobre la dosificación de reactivos y monitoreo del pH. La celda columna es totalmente automatizada, destacándose control de flujos de pulpa, aire, agua de lavado y reactivos, control de la altura de nivel de pulpa y colas de la celda, todo esto también a través de controladores de procesos.

### **3.3 Unidad de Separación Sólido/Líquido**

La etapa de separación sólido líquido, ver Fig. 3.3, consiste en el desaguado de los concentrados y consta de dos equipos principales: el espesador y el filtro de discos. Es importante destacar que el circuito de espesado y filtrado puede ser utilizado por cualquiera de los circuitos de flotación. La automatización en este circuito incluye un control de flujo de pulpa y flujos de descarga, el monitoreo del nivel de llenado del espesador, el nivel de vacío en el filtro y la velocidad de rotación del disco de vacío.



**Fig. 3.3** Unidad de Separación sólido/líquido

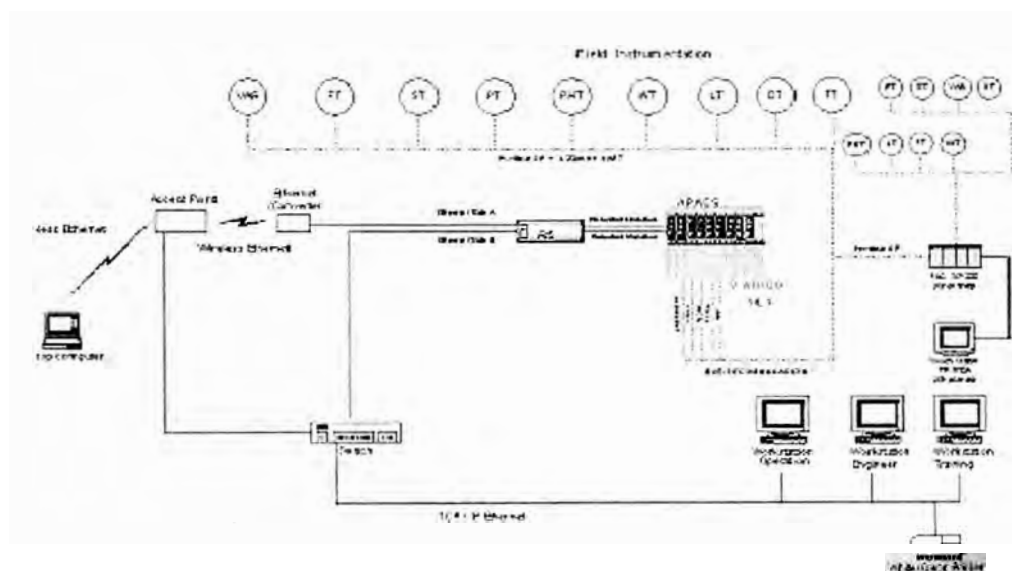
### **3.4 Tratamiento de Relaves**

La planta piloto posee una bomba central de sumidero activada por la acción de un medidor ultrasónico de nivel; la función principal de aquella es la de bombear todos los productos de desecho que genere la planta hacia unos depósitos de concreto situados en la parte exterior del ambiente. Dichos relaves son productos de descarte, los cuales son finalmente desaguados y ensacados para su posterior gestión y eliminación sin afectar el entorno.

### **3.5 Sistema de Control Distribuido (DCS)**

El DCS (Distributed Control System) es un equipo utilizado por importantes empresas de producción de nuestro país. Está basado en un controlador que reúne en un solo equipo las bondades de un PLC de alta capacidad de procesamiento y las de un controlador de procesos. Este DCS colecta la información de las diversas variables de la planta - referirse a la Fig. 3.4 - tales como densidad, temperatura, nivel, flujo, temperatura, pH, presión, peso y velocidad y realiza las acciones de control necesarias en función a las estrategias establecidas para cada una de las etapas de la planta.

Esta importante labor es ejecutada directamente ó indirectamente a través de la interacción con los controladores de procesos de las celdas de flotación, el PLC de la unidad de molienda - clasificación y el PLC del Centro de Control de Motores (CCM), responsable del manejo de los variadores de velocidad, importantes para el control regulatorio de algunos motores AC. La interacción del DCS con la instrumentación de campo se realiza a través de una red industrial que incluye la presencia de protocolos de comunicación tales como Profibus, Modbus y Hart, además de la clásica señal analógica de 4-20 mA y señales discretas. Adicionalmente a través de un servidor industrial, se comunica en forma inalámbrica con computadoras portátiles para efectos de configurar equipos de campo llámense transmisores, controladores o PLC, estando previsto el monitoreo y control por Internet.



**Fig. 3.4** Sistema de Control

### 3.6 Sistema de Parada de Emergencia (ESD)

Tal como es necesario en todo proceso, se cuenta en la planta piloto con un ESD (Emergency Shutdown System), responsable de la seguridad de personal y equipos de procesos. Viene a ser una especie de PLC configurado únicamente para esta labor e independiente de las funciones del DCS. En caso de recibir una señal proveniente de algún sensor de seguridad que indique una situación crítica o insegura, ejecuta las acciones necesarias para evitar un daño a algún equipo u operador.

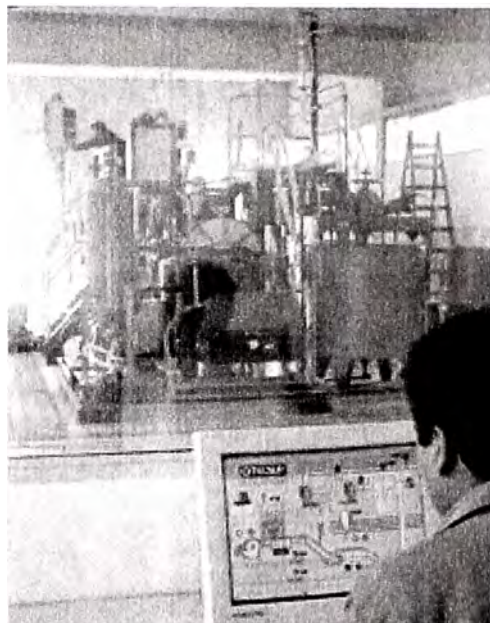
### 3.7 Sala de Control

La sala de control es un espacio contiguo a la zona de procesos de la planta que permite visualizar los equipos de las diferentes unidades operativas, así como las actividades que allí se realizan, a través de un muro de vidrio de un espesor adecuado que reduce al mínimo los ruidos provenientes de los equipos mecánicos de la zona de proceso. El acceso entre ambas partes también está diseñado para limitar dichos ruidos. En la Fig. 3.5 se tiene una vista de la zona de procesos desde la sala de control.

La sala cuenta con 2 computadoras principales (estaciones de ingeniería) en donde reside el

software de configuración del DCS y ESD y el software de supervisión y control de procesos. Este último permite mostrar en pantalla las distintas etapas de la planta y monitorear las tendencias de las diferentes variables de las mismas, además de generar reportes y hacer las modificaciones necesarias de los parámetros de control para el funcionamiento óptimo de toda la planta.

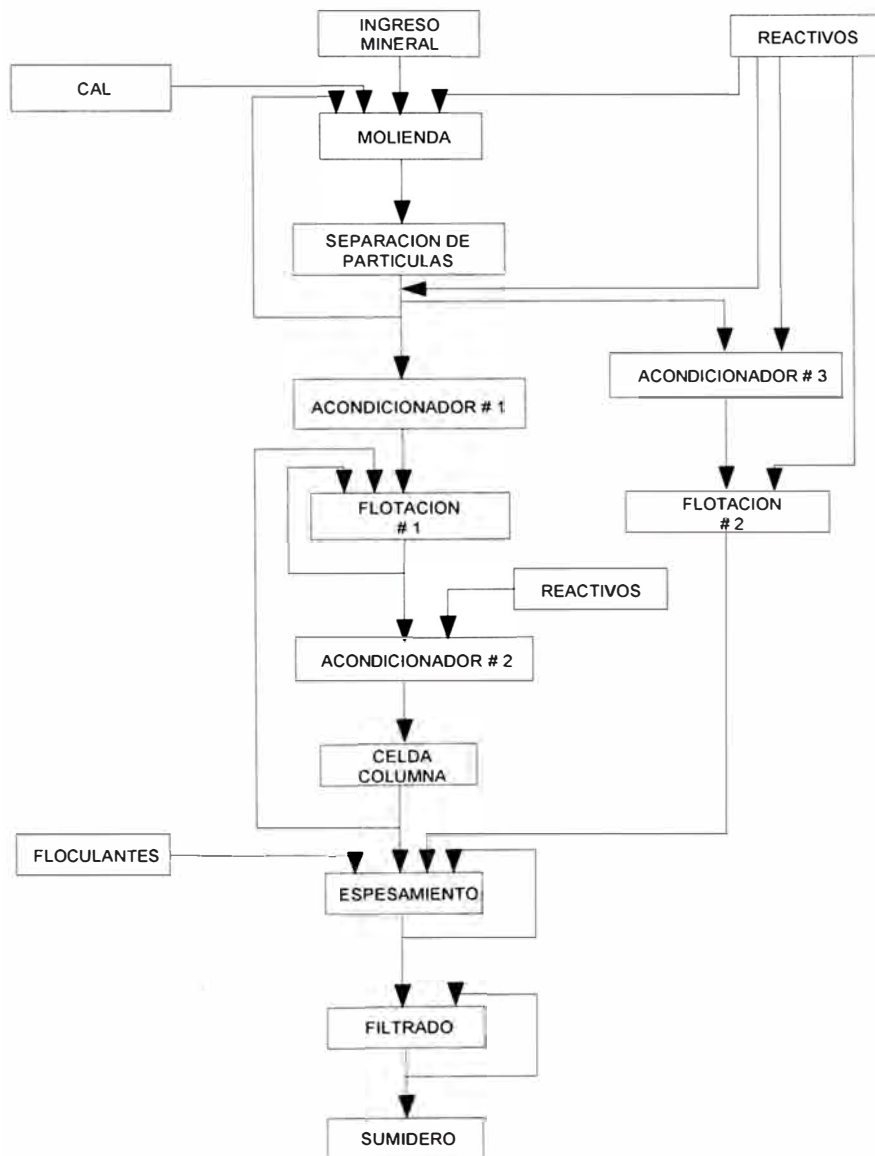
Se cuenta adicionalmente con otras 8 computadoras (estaciones de entrenamiento) para fines de capacitación y perfeccionamiento y que pueden interactuar en mayor o menor grado con los procesos de planta dependiendo de los niveles de seguridad otorgados. Estas computadoras están conectadas a una red inalámbrica.



**Fig. 3.5** Sala de Control

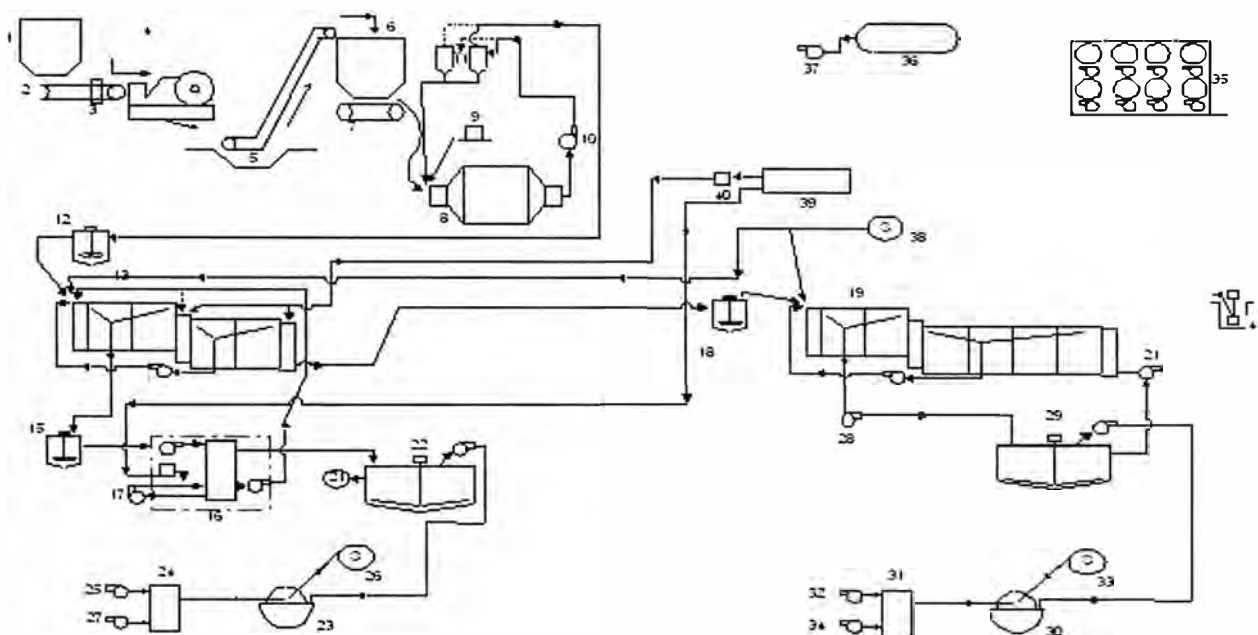
## CAPÍTULO IV OPERACIÓN Y CONTROL DE LA PLANTA

Ya se ha indicado anteriormente que la planta piloto consta de tres unidades operativas, contando cada una de ellas con el equipamiento de medición y control necesarios. La Fig. 4.1 es un gráfico que muestra en líneas generales la secuencia en la que se realiza el procesamiento de minerales en la planta.



**Fig. 4.1** Diagrama de Flujo del Proceso

Para efectos de describir la operación de cada una de las etapas de la planta vamos a remitirnos a la Fig. 4.2, la cual presenta la disposición de cada uno de los equipos de proceso de la planta y como es el flujo de material entre ellos. El ANEXO B muestra también este diagrama en el plano original, el cual incluye el cuadro con las especificaciones principales de los equipos. En los párrafos siguientes se coloca entre paréntesis el número asignado en el plano a los equipos que se mencionan para la descripción de la operación ya señalada.



**Fig. 4.2** Flujo de Material en la Planta

#### 4.1 Operación de la Unidad de Molienda

El proceso se inicia con el llenado manual de la denominada tolva de finos (6 en la Fig. 4.2). En esta tolva se tiene instalado un transmisor de nivel el cual tiene la función de monitorear de manera continua el nivel de contenido de carga al interior de la tolva de finos. Una vez llena la tolva de finos el operador procede a la revisión en forma consecutiva de las diferentes condiciones previas al encendido y puesta en marcha de la planta: alimentador de reactivos secos, nivel de agua, estado de las válvulas manuales de entrada y salida de esta etapa (abiertas o cerradas), estado de las válvulas de los acondicionadores y de ingreso de reactivos, condición inicial de los motores eléctricos,

entre otros. Luego de concluir con la revisión de todas estas condiciones se procede al encendido del motor que gobierna el accionamiento de la faja alimentadora. La faja alimentadora (5) tiene la función de alimentar de carga al molino de bolas (8), transportando la carga proveniente de la tolva de finos (6).

En la faja transportadora se tiene instalado un sensor que tiene por función medir el peso en forma continua de la carga depositada en la faja alimentadora proveniente de la tolva de finos. Adicionalmente se tiene instalado un medidor de velocidad del motor de la faja alimentadora. La combinación de la información permite obtener el flujo de carga a la planta. La faja alimentadora vierte su carga en una canaleta que es la que finalmente alimenta al molino de bolas. A esta canaleta llegan dos ingresos adicionales, uno que es el proveniente de los reactivos secos (9). Otra de las cargas que recibe la canaleta que alimenta el molino de bolas es el ingreso de agua a baja presión proveniente de un tanque elevado (36). Este tanque elevado tiene un sensor de nivel para medición continua de nivel de agua al interior del tanque elevado. Para el envío de agua a la canaleta el operador de abrir una válvula manual y luego accionar otra.

A la entrada del molino se tiene también una línea de reactivos la cual es habilitada al permitir el ingreso de estos reactivos (35) mediante la apertura de la válvula manual. Para una medición del caudal de agua que ingresa a la canaleta se ha establecido la ubicación de un transmisor de flujo continuo. Adicionalmente se tiene un transmisor de flujo para el monitoreo del caudal de agua que ingresa a la salida del molino.

En la zona de molienda se cuenta con lazo de regulación PID que está conformado por un medidor de parámetros eléctricos multifunción que mide los consumos de energía eléctrica en Kw, I, V y frecuencia del motor que acciona al molino de bolas. El lazo de control tiene como señales de regulación el peso de la carga en la faja alimentadora, la corriente I del motor del molino y como elemento final de control el motor que acciona la faja alimentadora, esto con la ayuda de un variador de velocidad.

En el molino de bolas se tiene también un sensor de temperatura para la medición continua de la temperatura en el motor del molino y también se cuenta con un sensor de velocidad, que tiene por finalidad de medir la velocidad del motor que acciona al molino de bolas. A la salida del molino de bolas se tiene una tubería que alimenta a una bomba peristáltica (10); para asegurarle la succión a esta bomba se ha dispuesto un pequeño tanque pulmón. A este tanque ingresa una línea de agua a baja presión. La bomba peristáltica tiene un variador de velocidad para incrementar o disminuir la velocidad del motor que gobierna la

bomba. El incremento o disminución de esta velocidad está en función de las necesidades del proceso.

En la línea de descarga de la bomba peristáltica hacia los dos hidrociclones (11) se mide la presión de descarga con un manómetro; en la misma línea se tienen transmisores para hacer una medición continua tanto de presión como de densidad. Ambos transmisores tienen por finalidad futura integrarse a un sistema de estimación de tamaño de partículas denominado PSE el cual se integrará a futuro.

En el hidrociclón se produce los denominados “underflow” y “overflow”. El underflow de los hidrociclones se produce con la caída dentro del hidrociclón de las partículas más pesadas las cuales caen nuevamente dentro del molino. Para detectar únicamente la existencia del underflow se ha considerado la colocación de interruptores de flujo. Para el caso de overflow, éste se produce cuando las partículas más finas son impulsadas hacia el primer acondicionador. En la línea de overflow se tiene un interruptor de flujo el cual tiene como función el detectar la presencia de overflow en el sistema de hidrociclones.

#### **4.2 Operación de la Unidad de Flotación, Circuito No. 1**

El overflow es recibido en el denominado acondicionador 1 (12), al cual llegan suministros de reactivos; el ingreso de los mismos es proporcionado por la válvula manual. Previamente el operador debe haber seteado antes de arrancar la planta con cual acondicionador piensa trabajar. En el acondicionador 1 se tiene un motor monitoreado por un medidor de parámetros eléctricos; este motor acciona un agitador, el cual se debe encender antes de recibir la pulpa. Adicionalmente, este acondicionador posee un sensor de pH. Aquí se tiene un segundo lazo PID de regulación teniendo como variable la medición del pH, y como elemento final de control a un variador de velocidad.

Este lazo tiene una finalidad netamente metalúrgica, esto es el regular el nivel de pH, aumentando o disminuyendo el envío de reactivos secos (cal) al molino de bolas. Este aumento o decremento se lleva a cabo variando la velocidad del motor que alimenta de reactivos secos al molino. Luego de pasar por el primer acondicionador, la pulpa ingresa al denominado circuito de flotación 1 (13). Este circuito está compuesto por dos secciones. En la sección A se tiene ubicado un transmisor de nivel por ultrasonido para la caja de la sección A y envía su señal a un controlador de lazo, que regula la apertura de una válvula de control con posicionador. En la sección B de este circuito de flotación se tiene también



un segundo juego de equipos similares al de la sección A. Ambos circuitos de flotación son accionados por motores eléctricos. Adicionalmente, en el primer circuito de flotación se tiene también una medición de pH.

El concentrado más pesado en el circuito de flotación 1 es enviado desde la sección A al acondicionador 2 (15). Para controlar el paso de flujo desde la celda de flotación a este acondicionador, se tiene un interruptor de flujo. En el acondicionador 2 se tiene también un sensor de pH. Adicionalmente se ingresan reactivos vía una válvula manual. El concentrado más pesado en el primer circuito de flotación sección B es reingresado a la sección A con la ayuda de una bomba de recirculación (14) y su ausencia de presión es detectada por un interruptor de presión.

En la línea de succión se tiene ubicado un interruptor de flujo. En esta misma línea de succión se tiene un tanque pulmón para ayudar a la bomba de recirculación a hacer su trabajo sin problemas. En la línea de descarga de esta bomba se tiene un interruptor de presión, para detectar pérdidas de presión en la línea de descarga.

El segundo acondicionador es accionado por un motor. El contenido del acondicionador es extraído mediante una bomba de alimentación que tiene como motor al que succiona el contenido del acondicionador 2 y lo envía a una celda de flotación que es denominada la celda columna (16). La línea de aire entregada por la compresora a la celda columna es sensada por un transmisor de presión. En la celda columna se tiene un lazo de regulación de nivel compuesto por el transmisor de nivel, un controlador de lazo simple y una bomba de recirculación de velocidad variable denominada bomba de relaves (17).

Adicionalmente en la celda columna se tiene un burbujeador que trabaja conjuntamente con una bomba y en su línea de entrada cuenta con un interruptor de presión: esta bomba extrae el contenido de la celda columna y lo ingresa al burbujeador. Hacia este mismo burbujeador llega una línea de aire regulado proveniente del compresor (39). El compresor posee un transmisor de presión para el sensado constante de la presión de descarga que es enviada hacia la celda columna y hacia los circuitos de flotación 1 y 2.

La línea de aire que va a las secciones de flotación es pasada previamente por un secador (40); en esta línea se cuenta con interruptor de presión que ayuda a detectar rupturas de líneas de aire o pérdidas de presión.

Otra línea de llegada a la celda columna es una proveniente de un soplador (26), el cual también tiene otra línea de descarga a las secciones de flotación A y B. El concentrado de la celda columna es enviado luego al espesador (22) correspondiente a la etapa de filtrado.

### **4.3 Operación de la Unidad de Flotación, Circuito No. 2**

El circuito de flotación 2 (19) está compuesto por un acondicionador 3 (18) accionado por un motor que tiene asociado un medidor de parámetros eléctricos; adicionalmente posee un sensor de pH. El acondicionador 3 se comunica mediante una tubería con el circuito de flotación 2. En el circuito de flotación 2 se tienen 2 secciones. La sección A es accionada por un motor, mientras que la sección B es accionada por 2 motores. El circuito de flotación 2 recibe también una línea de servicio para los reactivos la cual es habilitada con el accionamiento de la válvula manual. En el circuito de flotación 2 también se cuenta con un medidor de pH de sus celdas de flotación.

La evacuación del concentrado contenida en la sección A se realiza con ayuda de una bomba que lo envía a una bomba sumidero (41) en donde el nivel de los relaves es monitoreado por un interruptor de nivel. Para facilitar la descarga de esta sección A se tiene un tanque pulmón. Para el caso del concentrado en la sección B éste es evacuado con ayuda de una bomba (20) que también tiene un tanque pulmón en su línea de succión y esta carga es re-circulada a la sección A del mismo circuito. La bomba en su línea de succión tiene un interruptor de flujo y un interruptor de presión en la línea de descarga de la bomba. En la sección A se tiene ubicado un transmisor de nivel para la caja respectiva y envía su señal a un controlador de lazo, que regula la apertura de una válvula de control con posicionador. En la sección B del circuito de flotación 1 se tiene también un segundo juego de equipos similares al de la sección A.

### **4.4 Operación de la Unidad de Filtrado**

La sección de filtrado comprende tres sistemas, el sistema de floculantes, sistema espesador y el filtro de disco.

El sistema de floculantes es un sistema compuesto por una pequeña tolmeta de llenado con un gusano alimentador el cual es accionado por un motor que alimenta a un tanque agitador. Este tanque es accionado por otro motor. En el tanque también se tiene una línea de servicio de agua a baja presión que es habilitada por una válvula manual. Luego, el contenido del tanque agitador es entregado al tanque recipiente, a través de una línea a alimentación habilitada mediante el uso de una válvula manual. Una bomba envía el contenido en el tanque recipiente al espesador.

El espesador posee una línea de concentrado proveniente de la celda columna y una línea de ingreso desde la sección A del circuito de acondicionador 3. El espesador está compuesto por un rastrillo que es accionado por un motor y tiene instalado un sensor de densidad que conforma un lazo PID de control con un variador de velocidad que gobierna el motor del espesador. Otros desechos son eliminados mediante la bomba de sumidero. El espesador envía su contenido al filtro de disco (23) a través de una bomba.

El filtro de disco es accionado por un motor que hace girar el disco, que es una malla a la cual se adhieren los concentrados. Este motor es controlado a través de un variador de velocidad. Al disco ingresa una línea proveniente de un soplador el cual ayuda a que se desprendan las partículas que se quedan adheridas a la malla. Este sistema se complementa con el uso de una bomba de vacío (25) y una bomba de filtrado (27).

## **CAPÍTULO V**

### **SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA**

A continuación se explican los elementos y criterios utilizados para la selección de los dispositivos y equipos de medición y control que forman parte de la Planta Piloto, así como las características principales de los mismos.

#### **5.1 Consideraciones Generales**

Los instrumentos de medición de flujo, presión, nivel, temperatura, velocidad, peso, densidad, PH, parámetros eléctricos, así como los actuadores tales como válvulas de control, válvulas de corte, variadores de velocidad, fueron seleccionados de acuerdo con los requerimientos del proceso y contando con las características necesarias para integrarse con la filosofía y arquitectura de control elegida.

Se puso énfasis para efectos de la selección de dichos instrumentos, que éstos cumplieren con las normas y estándares aplicables en instalaciones industriales, entre los cuales se mencionan:

- ISA        International Society of Automation
- NEMA     National Electrical Manufacturer's Association
- IEEE     Institute of Electrical and Electronic Engineers
- NEC      National Electrical Code
- FMFactory Mutual Research Corporation
- ANSI     American National Standards Institute
- ANSI - B 2-1     Pipe threads
- ANSI - B 16.5     Steel pipes flanges and flanged fittings
- ANSI - B 16.104 Control Valve Seat Leakage.
- IEC      International Electrotechnical Commission
- ASTM    American Society for testing and materials
- ASME    American Society of Mechanical Engineers

Para los instrumentos que son comunicados con el DCS, se tuvo en cuenta el siguiente criterio:

- Transmisores de señal analógica de 4-20 mA: utilizados para aquellas variables que se usan en el DCS como parte de un lazo de control.
- Bus de Campo o Protocolo HART: utilizado para instrumentos dedicados al monitoreo o supervisión de variables de proceso.
- Bus de Campo o Protocolo Modbus: utilizado para aquellos controladores que se integran al sistema DCS mediante este protocolo.
- Bus de Campo o Protocolo Profibus: utilizado para aquellos variadores de frecuencia que se integran al sistema DCS a través de este protocolo.

Los dispositivos asociados al Sistema de Parada de Emergencia (ESD) se conectaron en forma de cableado duro al mismo, siendo sus salidas señales discretas.

Cada instrumento se identificó en el campo, mediante una placa de material de acero inoxidable en la cual se grabó el “tag” asignado en función a la ingeniería de detalle. Para esto se tomó en cuenta las normas ISA para la identificación de la instrumentación de campo y de panel.

Las especificaciones de errores y resolución para el funcionamiento de la instrumentación señalada fueron los siguientes:

- El máximo error no debía superar el  $\pm 0.5\%$  de la gama (o span como se conoce en la jerga de instrumentación).
- La histéresis no debía exceder el 0.5% de la gama (span).
- La banda muerta no debía exceder el 0.25% de la gama (span).
- El efecto de un cambio de 38 °C (equivalente a 100 °F) en la temperatura ambiente sobre la señal de salida de un instrumento no debía exceder el 1% de la gama (span).

Todos los instrumentos fueron seleccionados teniendo en cuenta las condiciones generales de operación y ambiente. Siendo el típico ambiente uno húmedo y polvoriento, se tomó en consideración una temperatura mínima de 12°C y una máxima de 36°C, para una humedad fluctuante entre 70% a 98%. Para el grado de protección de cada instrumento se tomó en consideración su localización física.

## 5.2 Medidores e Interruptores

La medición de flujo se realiza por medio de transmisores del tipo electromagnético o ultrasónico con indicación local. Cuentan con un indicador digital (“display”) integrado al transmisor.

La medición de nivel se realiza por medio de transmisores de tipo ultrasonido con salida en mA (estándar de instrumentación de 4-20 mA). Éstos basan su operación en el tiempo de ida y vuelta de cada impulso hacia el material y desde éste, el cual es compensado por la temperatura y se convierte en distancia para su visualización respectiva. Los interruptores de nivel se utilizan como respaldo en caso el transmisor de nivel salga fuera de servicio. La colocación de estos interruptores responde al estudio de HAZOP que se menciona más adelante.

La medición de presión, dependiendo del tipo, se realiza por medio de transmisores de presión manométrica, transmisores de presión diferencial o transmisores de presión absoluta con indicación local. Todos estos cuentan con un indicador digital integrado al equipo.

Para efectos de medición de temperatura se consideró solamente la medición de la misma en la superficie del motor del molino, siendo la salida de este transductor una señal de 4-20 mA hacia el PLC de esta unidad. El encoder encargado de medir las RPM (revoluciones por minuto) de aquel motor es de acoplamiento directo y envía su información de velocidad vía pulsos al PLC.

Se cuenta con medición continua de peso en la faja transportadora. El sistema está compuesto por 2 celdas de carga y un indicador local digital que entrega el peso instantáneo y totalizado, además de enviar la señal correspondiente al equipo de control. Este sistema es complementado con la presencia de un variador de velocidad para medir el flujo de carga.

Otra de las variables medidas es densidad. El equipo para este fin utiliza el principio radiactivo para la medición en línea. Cuenta con un indicador local y se integra al PLC.

Los medidores de pH, compuestos de sonda, indicador y transmisor se ubican en un sector contiguo a la unidad de flotación.

Los medidores de parámetros eléctricos tales como corriente, potencia, frecuencia, voltaje y factor de potencia se encuentran ubicados en la parte frontal del Centro de Control de Motores (CCM).

### **5.3 Válvulas y Variadores de Velocidad**

Las válvulas de control utilizadas para el control del nivel de pulpa en las celdas de flotación son de control neumático y cuentan con un posicionador electro-neumático. Son accionadas con una señal de 4-20 mA provenientes de los controladores de proceso. En otros casos y debido a los bajos caudales con los cuales se trabaja, se ha incluido válvulas de corte de acción eléctrica con apertura y cierre únicamente, las que son accionadas por señales discretas.

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos configurables, encargados de variar la velocidad de un motor (de corriente alterna o de corriente continua) de acuerdo con alguna necesidad operativa del proceso.

Estos equipos poseen indicadores digitales locales con el fin de observar la velocidad instantánea desarrollada por el motor respectivo. Estos equipos son accionados con una señal de 4-20 mA proveniente del controlador correspondiente y se ubican dentro del CCM.

### **5.4 Controladores de Procesos**

Los controladores de procesos son equipos especializados en el control continuo de variables. En el caso de la planta piloto se decidió su utilización solamente en la unidad de flotación. Se cuenta con dos controladores de procesos de tecnología digital que regulan el nivel de pulpa en cada una de las celdas mecánicas. Cada uno de ellos maneja dos lazos, siendo las señales de entrada aquellas provenientes de los transmisores de nivel ultrasónicos y teniendo como elementos finales de control, válvulas neumáticas de acción proporcional.

Las señales que reciben de los transmisores de nivel son de 4-20 mA, como también lo son las que entrega a los posicionadores de las válvulas de control. Éstos últimos tienen incorporado un conversor de corriente a presión. Por las características propias de un controlador de este tipo, y dependiendo del trabajo a realizar, pueden actuar también en modo manual.

Otros dos controladores de procesos, también digitales, manejan en la celda columna las siguientes variables: flujos de pulpa, de aire, de agua de lavado, de reactivos, altura de nivel de pulpa y colas de la celda.

## 5.5 Controladores Lógicos Programables

Más conocidos como PLC en la jerga industrial, estos equipos de tecnología electrónica, han sido originalmente diseñados para controlar procesos industriales cuyas variables son del tipo discreto, pero que han evolucionado en el tiempo, pudiendo actualmente utilizárseles en algunas aplicaciones comúnmente reservadas para los llamados controladores de procesos.

En el caso de la planta piloto, se cuenta con dos PLC: el que controla la unidad de molienda - clasificación y el del Centro de Control de Motores (CCM), responsable del manejo de los variadores de velocidad, los cuales controlan a su vez algunos motores AC de la planta.

El PLC de la unidad de molienda se ubica dentro de un gabinete, el cual incluye un panel de operador, a través del cual se pueden monitorear algunos parámetros fundamentales del proceso y realizar algunas acciones de operación de dicha unidad. Este equipo recibe señales continuas provenientes de dispositivos de medición de flujo, temperatura, nivel, presión, densidad, velocidad y peso, discretas desde interruptores, variadores de velocidad y una bomba y entregando a su vez señales de control hacia variadores de velocidad, motores, y válvulas solenoide.

En resumen, este PLC recibe y entrega las siguientes señales:

- Analógicas de entrada (AI): 12
- Analógicas de salida (AO): 3
- Discretas de entrada (DI): 12
- Discretas de salida (DO): 14
- Modbus: 1
- Pulsos: 2

El PLC ubicado en el CCM gobierna seis variadores de velocidad (los cuales también están instalados dentro de dicho centro y están asociados al control regulatorio de otros tantos motores de la planta); éste se conecta con tableros para el cambio de control de manual automático de algunos procesos, recibe las señales provenientes de 3 medidores de parámetros eléctricos ubicados en una de las columnas del CCM, se comunica con el DCS vía protocolo Profibus, entre otras funciones.



## 5.6 Sistema de Control Distribuido

El nombre del equipo que viene a ser el controlador principal de la planta es APACS, siglas de Sistema Avanzado de Control y Automatización de Procesos, originalmente producido por la empresa norteamericana Moore y actualmente de propiedad de la alemana Siemens.

Este es un equipo que tiene una estructura basada en módulos enchufables en un rack, cada uno dedicado a una tarea particular, tales como ejecutar una estrategia de control, funciones de entrada/salida o funciones de comunicación. Se comunica con estaciones de operador que pueden ser una o más PC en las cuales corren uno o más paquetes de software de interfaz de operador o una o más estaciones de trabajo corriendo el denominado software supervisor.

El equipo mencionado está instalado en un rack (palabra inglesa muy utilizada para referirse a una especie de barra en la cual se fija un equipo electrónico) de 10 ranuras (o “slots” según la jerga de instrumentación) dentro de un gabinete. Este rack contiene los siguientes módulos:

- ACM (Módulo de Control Avanzado) el cual es el cerebro del sistema, a través del cual se pueden realizar estrategias de control para procesos continuos o discretos y utilizando distintos lenguajes de programación.
- SAM (Módulo Análogo Estándar), que son dos módulos de 32 canales I/O que actúan como interfaces entre los módulos de control y las señales de campo. Cada canal puede ser configurado como entrada o salida.
- HFM (Hart Field Module), el cual tiene 16 canales, cada uno de los cuales puede recibir hasta 8 instrumentos con comunicación Hart en una arquitectura del tipo multidrop.
- PFM (Profibus Field Module), el cual se comunica con todos los instrumentos con protocolo Profibus DP.
- Fuente de alimentación de 400 watts.

El controlador APACS posee comunicación redundante entre sus módulos a través del protocolo propietario Modulbus, el cual es integrado con una interfaz RIS (Rack Interface Server, por sus siglas en inglés), estación que convierte el protocolo mencionado a protocolo Ethernet.

La red de interfaz de operador que utiliza el controlador APACS, usa el protocolo TCP/IP. A través del RIS se tiene una conexión con las PCs o estaciones de trabajo ubicadas en la sala de control.

En estas estaciones de trabajo, se cuenta con un paquete de software especializado que contiene una serie de herramientas, entre las cuales se incluye, el software de supervisión de la planta, el software para la configuración del controlador, así como un software simulador que permite simular la estrategia de control prevista y probar cualquier modificación en computadora sin tener que necesariamente se tenga que utilizar físicamente el equipo que controla la planta.

Uno de los aspectos importantes de este equipo es que dispone de un nivel estándar de redundancia. Por ejemplo, los módulos de comunicación utilizan dos caminos para el manejo de los datos: si apareciese un problema en alguno de estos caminos, la comunicación podría continuar por el otro.

Existe redundancia opcional en estos equipos como la de módulo a módulo o la de rack a rack, pero no ha sido considerada para esta aplicación en la planta piloto. Además de lo anterior, el sistema durante su operación, realiza una serie de diagnósticos para reducir cualquier tiempo de parada, disminuyendo el tiempo necesario para identificar y determinar la falla.

Con respecto al hardware del controlador, es importante señalar que se trata del mismo equipo utilizado en aplicaciones reales, contando con protección contra la vibración mecánica, el calor, la humedad, las descargas electrostáticas, la interferencia electromagnética, entre otros.

En cuanto al dimensionamiento del APACS y en función a las variables con que se cuenta en la planta, se definió que el equipo mencionado contase con señales que a continuación se enumeran, sumando las correspondientes a las secciones de flotación, filtrado y tanques de reactivos:

- Analógicas de entrada (AI): 3
- Discretas de entrada (DI): 7
- Discretas de salida (DO): 84
- HART: 121
- Modbus: 7
- Profibus: 5

## 5.7 Sistema de Parada de Emergencia

Este es un sistema de control crítico para protección de personal y equipos en una planta, diseñado en reemplazo de opciones tradicionales tales como relés mecánicos, PLC o sistemas modulares triplemente redundantes (TMR).

La idea en el uso de este sistema es evitar fallas en condiciones industriales riesgosas. El sistema seleccionado se denomina QUADLOG, producto también de la firma diseñadora del APACS.

Este sistema está compuesto por un módulo CCM (Módulo de Control Crítico), que es el cerebro del sistema de emergencia, complementado por el módulo CDM (Módulo de Control Discreto), el cual tiene 32 canales, cada uno de los cuales pudiendo ser configurado como entrada o salida. El sistema es del tipo I/O/D (uno de uno con diagnóstico).

En lo referente a su ubicación, está en un rack colindante con el del DCS. Con respecto al software que utiliza, es el mismo que el del APACS, lo cual es ventajoso en lo referente a su integración con el sistema de control.

Para el dimensionamiento del QUADLOG se hizo previamente un estudio de las amenazas operacionales o HAZOP (Hazard and Operability Analysis por sus siglas en inglés), el cual permite evaluar y determinar las amenazas en instalaciones de procesos.

El desarrollo de todo Hazop involucra la aplicación de palabras guía como por ejemplo el decir “ no, más, menos, etc, al referirnos a los parámetros o condiciones de operación, es decir variables de proceso tales como flujo, presión, etc. pertenecientes al proceso que se analiza. Todas las desviaciones analizadas son pertenecientes a subsistemas dentro del proceso a los cuales denominamos nodos.

El objetivo principal de este estudio es poder identificar las amenazas potenciales como son problemas operacionales o fallas de diseño en las instalaciones.

Esta identificación se realiza mediante una evaluación sistemática de los denominados nodos.

Otros objetivos son:

- Comprobar en forma rigurosa de la seguridad y operatividad de la instalación.
- Hacer recomendaciones que permitan implementar acciones de previsión o protección ante las amenazas potenciales identificadas.

Dentro de los alcances que corresponden al estudio de HAZOP se pueden enumerar los siguientes:

- Identificar las causas principales de una situación peligrosa o un problema operativo.
- Revisar y actualizar los procedimientos de operación.
- Implementar recomendaciones, modificaciones y elaboración de estudios más a fondo que permitan prevenir, proteger o mitigar adecuadamente ante situaciones potenciales peligrosas o problemas de tipo operativo.
- Obtener una operación más segura, con personal mejor capacitado y consciente de las amenazas potenciales existentes en las operaciones.

La metodología utilizada para este estudio incluyó 4 etapas:

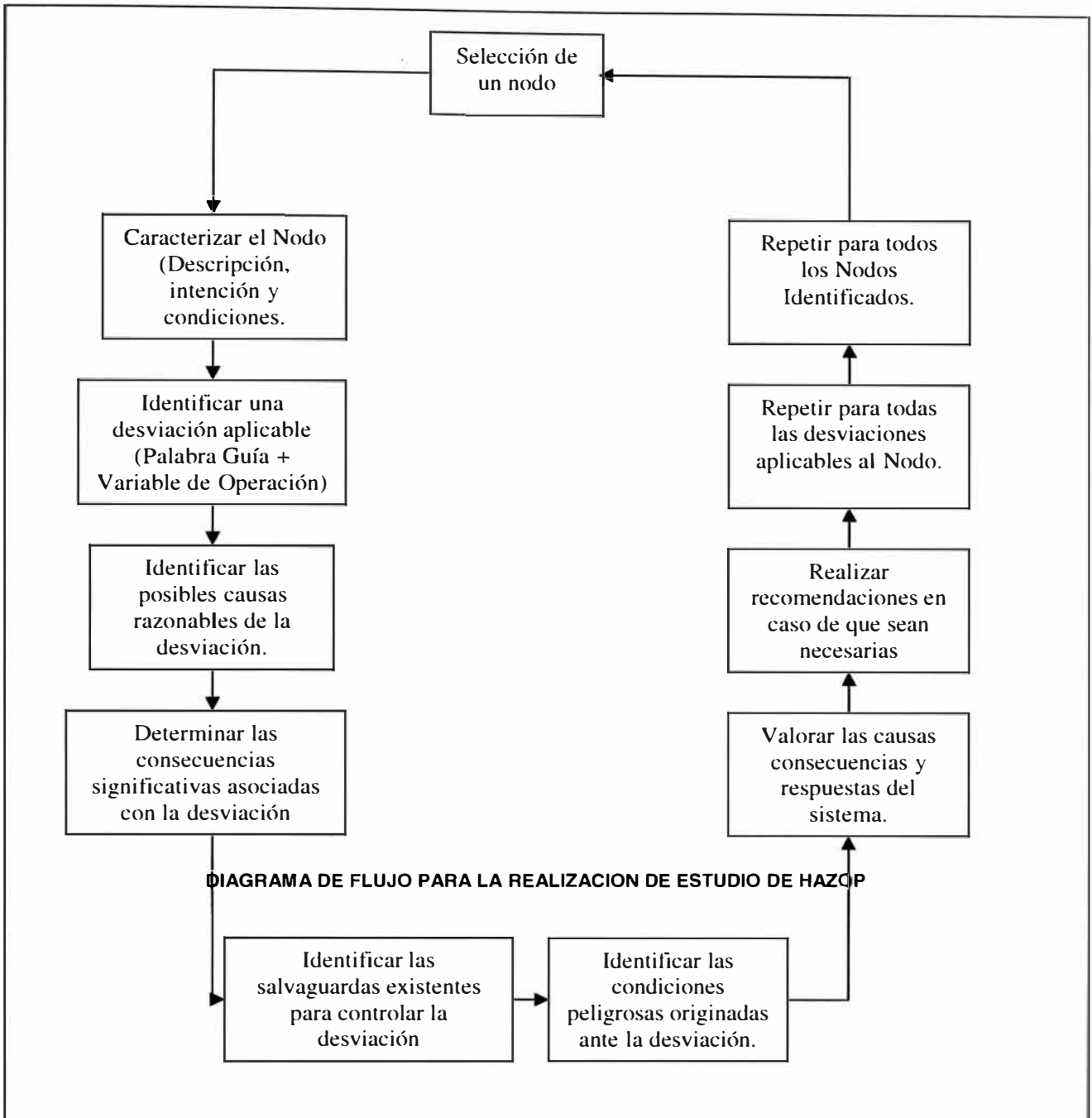
- Preparación del estudio.
- Identificación de los nodos
- Desarrollo del estudio de HAZOP
- Informe del estudio.

Dentro de la preparación del estudio, se incluyeron los objetivos y alcances indicados anteriormente, así como los siguientes documentos: P&ID de la planta piloto, P&ID de parada de emergencia propuesto. Participaron en esta actividad, tanto los representantes de las empresas contratadas para la implementación del proyecto, así como los representantes de Tecsup.

Para la identificación de los nodos o denominados también grupos de elementos de interés, se utilizó como criterio para la selección de los nodos o elementos, el análisis de la función del elemento y sus condiciones de operación. Por ejemplo: la línea de alimentación al molino de bolas.

Habiéndose obtenidos los nodos, se procedió a continuación al desarrollo de las secciones de trabajo HAZOP de acuerdo a un cronograma de fechas y horarios establecidos previamente.

Para comprender mejor el desarrollo del HAZOP, se muestra a continuación en la Fig. 5.1 un diagrama de flujo, en el cual se puede apreciar la forma de realizar el análisis a partir de un determinado nodo.



**Fig. 5.1** Diagrama de Flujo para el estudio de HAZOP

Como se observa de la figura anterior, este procedimiento se debe realizar detalladamente con cada uno de los nodos identificados.

A continuación se incluye la Tabla N° 5.1, en la cual se presenta un cuadro conteniendo diversas palabras guía utilizadas durante este procedimiento, así como el significado respectivo de cada una de ellas en la segunda columna y finalmente un ejemplo de aplicación en cada caso.

**Tabla N° 5.1** Palabras guía y su significado

Palabra Guía	Significado	Ejemplo
No	No se obtiene la intension prevista en el diseño.	No Flujo
Mas	Aumento cuantitativo sobre la intension de diseño.	Mas presion
Menos	Disminucion cuantitativa sobre la intencion de diseño.	Menos Temperatura
Ademas de	Aumento cualitativo . Se consiguen las intensiones de diseño y algo mas.	Ademas de gas presencia de crudo.
Parte de	Disminucion cualitativa. Solo se obtiene parte de la intencion esperada.	Parte de quimico inyectado.
Inverso	Se obtiene la intencion contraria a la deseada.	Flujo Inverso.
Otro	Modo alterno. Otro hecho que pueda ocurrir.	Escape o derrame.

En el ANEXO C se muestra un formato utilizado para el estudio de HAZOP.

Con respecto al significado de los términos utilizados, se hace una descripción de los mismos a continuación.

Las desviaciones consideradas son aquellas que afectan la intención del nodo que se está evaluando. Esto quiere decir que por ejemplo una desviación debida a una menor presión puede no afectar la operación del elemento en cuestión en el momento del análisis respectivo.

Las causas son los eventos que originan una desviación, por ejemplo, si se considera el análisis de una línea de entrada a un tanque y se toma en cuenta la desviación debido a una mayor presión.

Las causas que originan más presión son:

- Aumento de la descarga de la bomba hacia el tanque.
- Apertura inadecuada de válvulas de control.
- Falla en válvula de control que regula nivel en el tanque.

Las consecuencias son los efectos sobre la operación que pueden determinar la ocurrencia de las causas posibles de desviación. Basándonos en el ejemplo anterior, las posibles consecuencias por aumento de presión son:

- Presurización de las líneas.
- Aumento del nivel del tanque.
- Posible derrame.

Dentro de las respuesta del sistema se considera, los tipos de respuesta con que cuenta la operación para atender la desviación tales como alertas o salvaguardas que puede tener la operación de control, falla de algún equipo o error humano.

Continuando con el ejemplo se pueden considerar algunas respuestas que se pueden dar en el sistema:

- Cierre de la válvula de entrada al tanque.
- Alerta en los transmisores de nivel debida a una elevación de los niveles del producto dentro del tanque.
- Apagado de la bomba de carga a tanque.

Como condiciones peligrosas se puede citar como ejemplo el derrame de algún producto y el origen de cortocircuitos en los equipos eléctricos que puedan ser alcanzados por el derrame.

Luego de identificar las causas, consecuencias potenciales, condiciones peligrosas y las respuestas del sistema para las desviaciones planteadas en cada nodo, se evalúa si las condiciones actuales de operación o de seguridad del sistema son adecuadas y suficientes o si es necesario mejorarlas.

En caso de que se consideren no suficientes, se realizarán las recomendaciones que se crea convenientes.

Siguiendo con el ejemplo, las recomendaciones posibles pueden ser:

- Instalación de válvulas de control a la entrada del tanque de mezcla.
- Mantenimiento de la bomba de descarga.

En cada recomendación que se realice, se debe de asignar una prioridad y un responsable, el cual puede ser una persona, un departamento o varios departamentos, según corresponda.

Estas prioridades dependen de la urgencia, pueden ser inmediatas a corto plazo o pueden esperar un rediseño del proceso.

Para el estudio del HAZOP de la planta piloto, se revisó toda la información referente a la misma, desde su operación como proceso hasta las causas de una falla operacional de algún equipo instalado; se analizaron seguidamente las consecuencias, peligros y salvaguardas a implementar.

Los nodos analizados para las distintas unidades de la planta fueron 56.

A modo de ilustración, se listan algunos de ellos, mencionándose las variables asociadas en la Tabla N° 5.2.

**Tabla N° 5.2** Parte de los nodos analizados

Nodo	Descripcion	Variables Analizadas						Densidad
		Nivel	Flujo	Presion	Velocidad	Peso	Movimiento	
1	Tolva de Almacenamiento de Mineral de Cabeza.	X						
2	Faja Alimentadora				X	X		
3	Canaleta de Alimentacion al Molino.		X					
4	Alimentador de Reactivos Secos ( Cal )		X					
5	Tubería de Alimentacion de Agua a la entrada del Molino.		X					
6	Under Flow (Gruesos de los Hidro Ciclones)		X					
7	Molino de Bolas.						X	
8	Linea de salida del molino.		X					
9	Linea de agua a la salida del molino, previa ingreso a la bomba del hidrociclon.							X
10	Bomba peristaltica.							
11	Linea de alimentacion al Hidrociclon.		X	X				
12	Hidrociclon		X					
13	Hidrociclon (Standby)		X					
14	Overflow		X					
15	Linea de ingreso al acondicionador 1		X					
16	Linea de ingreso al PSM		X					
17	Linea de Ingreso al acondicionador 2		X					
18	Linea de Ingreso desde el acondicionador 1 al circuito de flotacion 1.		X					
19	Cicuito de Flotacion 1 (Linea de Ingreso de aire de baja presion) .		X	X				
20	Cicuito de Flotacion 1 (Linea de Ingreso de aire de alta presion) .		X	X				

## 5.8 Sala de Control

La sala de control fue diseñada para cumplir con los siguientes propósitos:

- Realizar una supervisión y control remotos de las diferentes unidades que constituyen la planta piloto, utilizando un software especializado.
- Configurar los diferentes equipos de control, en especial PLC, DCS y ESD, así como establecer las estrategias de control en ellos.
- Aplicar paquetes de software en actividades relacionadas a: cálculos metalúrgicos, gestión del mantenimiento, control automático, entre otros.
- Servir de ambiente de formación y capacitación en las actividades mencionadas en los puntos anteriores.

Para los propósitos mencionados, se instalaron dos computadoras principales, actuando una como estación de operación y otra como estación de ingeniería; además se cuenta con otras ocho computadoras para fines de instrucción o entrenamiento.

Las dos primeras tienen dos tipos de conexiones con el servidor instalado en el rack del DCS, una alámbrica y otra inalámbrica.

Las demás computadoras de la sala reciben la información de las dos primeras por medio de una red inalámbrica.

En el RIS se instaló un software que tiene la función de interfaz, de servidor de datos históricos y de servidor de visión, esto con el fin de poder acceder tanto al sistema de



control APACS como al sistema de control QUADLOG desde una computadora remota y a través de Internet.

En las estaciones principales reside el software de configuración del DCS y ESD denominado 4-mation, el cual permite configurar diversas estrategias de control tanto en diagrama de escalera, como diagrama de bloques, texto estructurado y diagrama de secuencia.

Como software de supervisión se utiliza el Process Suite, muy utilizado en plantas reales, el cual permite mostrar en pantalla las distintas etapas de la planta y monitorear las tendencias de las diferentes variables de las mismas, además de generar reportes y hacer las modificaciones necesarias de los parámetros de control para el funcionamiento óptimo de toda la planta.

Se cuenta también con un software denominado Control Simulator que permite simular el control y probar toda modificación que se le haga al sistema sin tener que utilizar el equipo que controla la planta y por lo tanto sin poner en riesgo la misma. Adicionalmente se tiene librerías especializadas para diseñar procesos que se deseen probar con el Control Simulator.

Los paquetes de software mencionados cumplen con los estándares internacionales IEC 1131-3.

Las ocho estaciones de entrenamiento se utilizan para fines de instrucción y pueden interactuar en mayor o menor grado con los procesos de planta dependiendo de los niveles de seguridad otorgados.

La sala de control tiene una capacidad para 18 participantes y cuenta con aire acondicionado. Adicionalmente se cuenta en este ambiente con los elementos de enseñanza necesarios tales como pizarra acrílica y proyector multimedia, además de los paquetes de software de oficina y conexión a Internet.

En el ANEXO D se tiene un diagrama que muestra las dimensiones y distribución de la sala de control.

En la Fig. 5.2 se puede apreciar el diagrama de flujo del sistema de supervisión por computadora de la planta.

En la Fig. 5.3 se observa una pantalla realizada con el software Process Suite, en la cual se representa a la unidad de molienda y en donde se aprecia los valores en tiempo real de las variables asociadas.

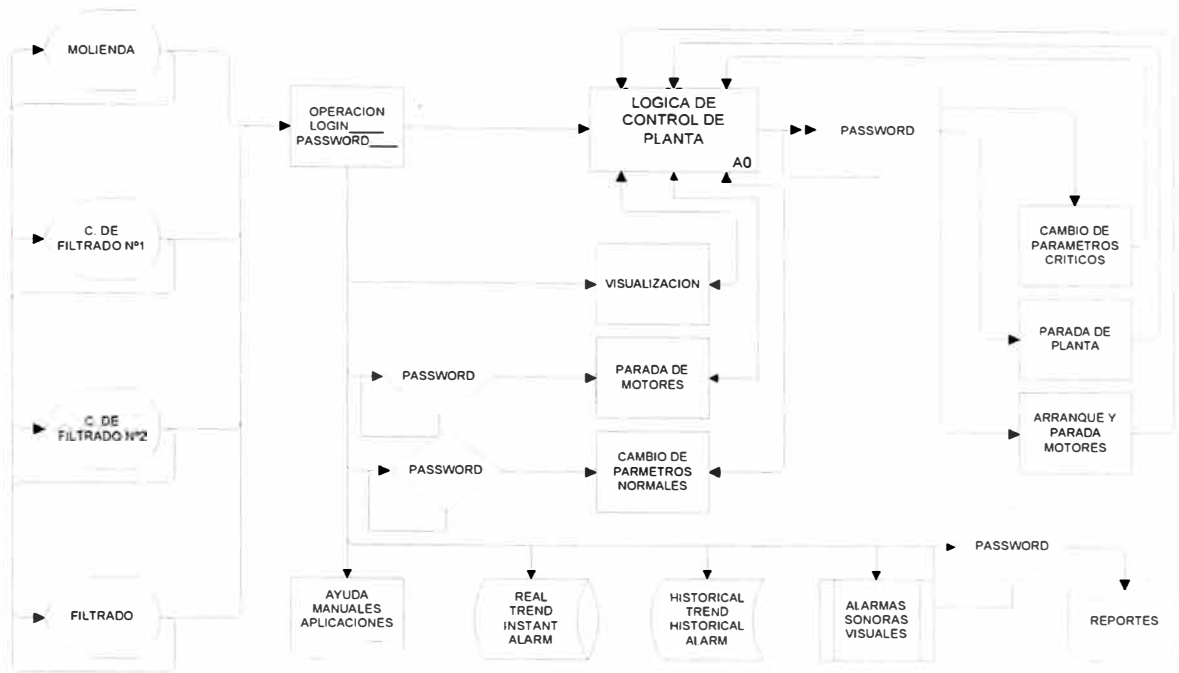


Fig. 5.2 Diagrama de Flujo del Sistema de Supervisión por Computadora

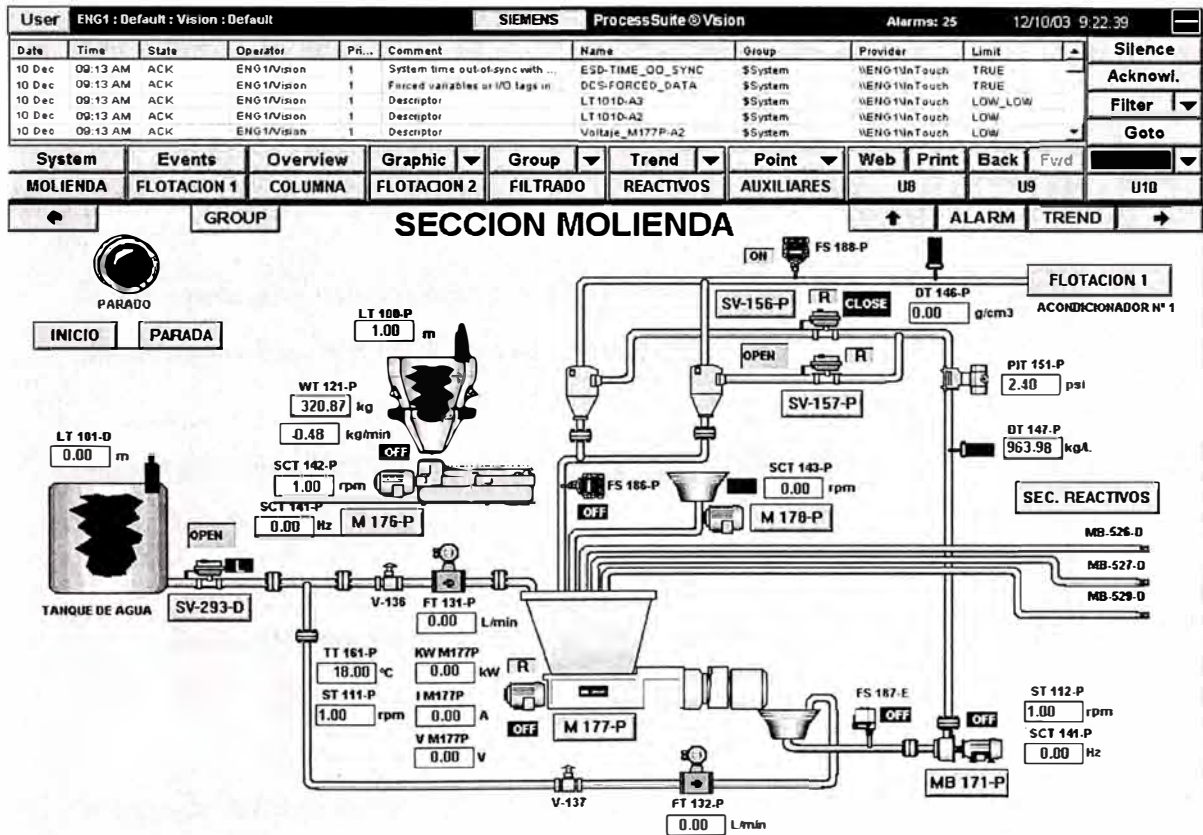


Fig. 5.3 Representación en Process Suite de la Unidad de Molienda

## CAPÍTULO VI COSTOS DEL PROYECTO

Tal como se indicó anteriormente, el aporte principal para la implementación de este proyecto provino de una fundación internacional (que cubrió aproximadamente el 50% del total de la inversión) y de empresas de producción locales (40%). El restante 10% fue cubierto por la Institución. Los costos en que se incurrieron en el proyecto son detallados a continuación, habiéndose dividido los mismos en distintas Tablas según el rubro. Los valores aparecen en dólares americanos y no incluyen el impuesto general a las ventas (I.G.V.)

### 6.1 Equipamiento, Obras Civiles y Montaje Electromecánico

**Tabla N° 6.1** Costos de Equipamiento, Obras civiles y Montaje Electromecánico

Ítem	Descripción	Cant.	Valor Unit.	Valor Total
I.1	Tolveta para almacenamiento de “finos”, incluyendo faja alimentadora 6”x18” (ítems 1 y 2 del d. flujos)	1	6.800	6.800
I.2	Molino de bolas Denver de 12” de diámetro x 12” de largo (ítem 3 del d. flujos)	1	14.500	14.500
I.3	Alimentador de reactivos secos de 6” de diámetro (ítem 4 del d. flujos)	1	5.800	5.800
I.4	Bomba centrífuga vertical Denver de ¾” (ítems 5, 9, 12, 15, 16 y 23 del d. flujos)	6	5.400	32.400
I.5	Hidrociclón Krebs de 6”, del tipo apertura de ápex	2	1.800	3.600

	regulable (ítem 6 del d. flujos)			
I.6	Acondicionador de minerales Denver de 12" de diámetro x 18" de alto (ítems 7, 10 y 13 del d. flujos)	3	5.100	15.300
I.7	Banco de 4 celdas Denver DR-5 con control de nivel (ítem 8 del d. flujos)	1	18.050	18.050
I.8	Celda de flotación Metso, tipo columna, de 75 mm de diámetro (ítem 11 del d. flujos)	1	24.360	24.360
I.9	Banco de 6 celdas Denver DR-5 con control de nivel (ítem 14 del d. flujos)	1	21.820	21.820
I.10	Espesador Denver de 36" de diámetro x 36" de alto (ítem 17 del d. flujos)	1	21.500	21.500
I.11	Sistema de filtrado Denver, compuesto por: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro de disco 2' x 1' (ítem 18 del d. flujos)</li> <li>- Recibidor del filtrado (ítem 19 del d. flujos)</li> <li>- Bomba de vacío (ítem 20 del d. flujos)</li> <li>- Soplador (ítem 21 del d. flujos)</li> <li>- Bomba de filtrado (ítem 22 del d. flujos)</li> </ul>	1	30.100	30.100
I.12	Tanque de reactivos de 1 galón de capacidad (ítem 25 del d. flujos)	8	210	1.680
I.13	Bomba dosificadora de reactivos tipo tornillo (parte del ítem 25 del d. flujos)	8	890	7.120
I.14	Sistema de preparación de alimentación de floculante (ítem 26 del d. flujos).	1	4.800	4.800

I.15	Bomba para agua 20GPM@100 psi. (ítem 27 del d. flujos)	1	360	360
I.16	Soplador de celdas (20 GPM@10 oz/pulg <sup>2</sup> (ítem 28 del d. flujos)	1	990	990
I.17	Secador de aire para compresor (ítem 30 del d. flujos)	1	2.010	2.010
I.18	Bomba de eje vertical de 1 ½ "x 24", completa con motor de 2 HP (ítem 31 del d. flujos)	1	7.100	7.100
I.19	Tanque recipiente (ítem 24 del d. flujos)	1	800	800
I.20	Lote de tuberías y válvulas; incluye soportes	1	9.200	9.200
I.21	Lote de chutes y cajas metálicas	1	2.500	2.500
I.22	Lote de estructuras varias (pasarelas, fundas de seguridad, escaleras de acceso y demás accesorios)	1	10.800	10.800
I.23	Obras civiles	1	10.300	10.300
I.24	Suministro y montaje eléctrico	1	52.000	52.000
I.25	Montaje mecánico y puesta en marcha	1	23.500	23.500
I.26	Lote de repuestos recomendados	1	25.000	25.000
	Total Parte I			352.390

## 6.2 Sistema de Automatización y Control

**Tabla N° 6.2** Costos del Sistema de Automatización y Control

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor Unit.</b>	<b>Valor Total</b>
II.1	Sistema de control distribuido APACS	1	130.480	130.480
II.2	Sistema de control para unidad de molienda	1	12.800	12.800
II.3	Instrumentación de campo	1	94.030	94.030
II.4	Sistema de parada de emergencia QUADLOG	1	17.020	17.020
II.5	Instrumentación de campo para sistema de parada de emergencia	1	13.550	13.550
II.6	Sistema de control inalámbrico	1	3.150	3.150
II.7	Módulo RIS de sistema APACS	1	14.170	14.170
II.8	Control simulador y librerías especializadas	1	0	0
II.9	Diseño y programación de pantallas HMI	1	0	0
II.10	Documentación de entrenamiento	1	0	0
II.11	Servicios	1	23.700	23.700
II.12	Instalación	1	11.300	11.300
	<b>Total Parte II</b>			<b>352.330</b>

### 6.3 Costos Complementarios del Sistema de Control

**Tabla N° 6.3** Costos Complementarios del Sistema de Control

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Valor Unit.</b>	<b>Valor Total</b>
III.1	Implementación de sala de control	1	20.000	20.000
III.2	Integración del CCM al DCS y complemento de instalaciones eléctricas	1	38.850	38.850
	Total Parte III			58.850

### 6.4 Costos de Gestión del Contratista

La implementación de la planta piloto estuvo a cargo de una empresa especializada en montaje de plantas de producción, incluyendo plantas mineras.

Esta empresa se asoció con una empresa proveedora de equipos de automatización y de servicios de ingeniería.

La gestión de la empresa mencionada en primera instancia, incluyó entre otras actividades, la adquisición de la mayoría de los equipos de la zona de procesos de la planta, la coordinación para la fabricación de otros, supervisión de las obras civiles y de las instalaciones tanto eléctricas como mecánicas, el seguimiento de las tareas propias de la empresa asociada para los fines de este proyecto, el aseguramiento de los acuerdos en las reuniones de coordinación.

Esta gestión tuvo un costo de 34 mil dólares americanos (sin incluir el impuesto general a las ventas).

Las reuniones de coordinación respectivas que se realizaron tanto en las instalaciones de Tecsup como en las oficinas del contratista, incluyeron por parte de éste a un ingeniero mecánico, el cual actuó como representante de dicha empresa ante Tecsup, además de un ingeniero electrónico, especialista en instrumentación y control, representando a la empresa proveedora de los equipos de automatización y de los servicios de ingeniería para la instalación y puesta en marcha de dichos equipos.

## 6.5 Costos Totales

Para el cálculo de los costos totales del proyecto, se muestra a continuación un cuadro resumen en el cual se aplica el impuesto general a las ventas (I.G.V.) a cada una de las sumas parciales obtenidas en los puntos anteriores.

**Tabla N° 6.4 Costos Totales**

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor Total</b>
I	Equipamiento, Obras Civiles y Montaje Electromecánico	419.344
II	Sistema de Automatización y Control	419.273
III	Costos Complementarios del Sistema de Control	70.032
IV	Costos de Gestión del Contratista	40.460
	Total	949.109



## **CAPÍTULO VII**

### **APLICACIÓN DE LA PLANTA PILOTO Y LOGROS OBTENIDOS**

Ya se han mencionado anteriormente las razones para implementar el proyecto que es la razón de ser de este informe de ingeniería. En las páginas siguientes se describirán las actividades que se han desarrollado en el tiempo en que está en funcionamiento la planta piloto y posteriormente se discutirán algunas ideas y propuestas que podrían aplicarse a ésta, siempre con el propósito de formar y capacitar profesionales en un ambiente de aplicación real.

#### **7.1 Aplicación de la Planta Piloto**

Como ya se ha hecho referencia, la planta ha aportado, desde su inauguración hace siete años, principalmente a la formación de tecnólogos y a la capacitación de profesionales provenientes de diversas especialidades y sectores productivos. Las diversas áreas relacionadas con la planta y hacia las cuales se ha enfocado dicho aporte son: instrumentación y control, procesamiento de minerales, gestión del mantenimiento, electricidad industrial, por citar las principales. Adicionalmente la planta ha permitido la realización de tareas de investigación aplicada, mayormente dirigidas a ofrecer servicios a empresas mineras. A continuación se describe brevemente las actividades en estos campos.

#### **Formación y Capacitación**

Las actividades aquí se han desarrollado tanto en la formación de estudiantes de carreras tecnológicas en esta disciplina, como en la capacitación de ingenieros a través de cursos de extensión y programas de especialización.

En lo que respecta al aspecto formativo de jóvenes estudiantes, en Tecsup se ofrecen carreras tecnológicas ligadas al ámbito industrial. La mayor parte de ellas incluye cursos cuyos temas principales se relacionan a las formas de medir y controlar variables de procesos.

Particularmente en la carrera de Electrónica y Automatización Industrial, los egresados de la misma se orientan al trabajo en plantas de producción en actividades que van desde el aseguramiento de la operatividad de instrumentos de campo y panel, hasta el desarrollo de proyectos de automatización. Esto sin duda obliga a tener una formación de primer nivel, la cual pasa por una serie de cursos asociados, además de experiencias pre-profesionales en empresas industriales.

En los cursos mencionados se dispone de laboratorios muy bien equipados, aunque dirigidos a cubrir un tema específico, ya sea medición, control automático o redes industriales, por citar algunos ejemplos. En otras carreras, tales como Procesos Químicos y Metalúrgicos, Mantenimiento de Maquinaria de Planta o Electrotecnia Industrial sucede algo similar.

La necesidad de contar con un ambiente que incluya todo lo anterior y en especial en una aplicación real, es cubierta entonces por la planta piloto.

Es así entonces que en la planta se desarrollan una serie de tareas que complementan aquellas y entre las que se pueden citar en forma general:

- Programación y configuración de sistemas de control.
- Aplicación de estrategias de control automático.
- Desarrollo de estrategias de seguridad instrumentada.
- Comisionamiento de instrumentos de campo y panel.
- Supervisión en tiempo real de los procesos de una planta.
- Estudio de cada unidad de la planta desde el punto de vista metalúrgico.
- Evaluación de la calidad del producto a la salida de cada unidad operativa.
- Aplicación de conceptos de mantenimiento predictivo en maquinarias industriales.
- Estudio de las funciones de los componentes de un centro de control de motores.
- Análisis de variables eléctricas y consumo energético en una planta industrial.

En lo que respecta a capacitación continua de profesionales, existen cursos y programas de extensión que se ofrecen a profesionales de empresas industriales que incluyen el uso de las instalaciones de la planta. Es así como es que hacen uso de las mismas, ingenieros de especialidades tales como: electrónica, electricidad, de minas, mecánica, industrial, química, por citar algunas. Las actividades en este caso son similares a las listadas previamente.

## **Investigación Aplicada**

La forma como ha sido concebida la planta permite realizar una serie de actividades de investigación aplicada en las diferentes especialidades involucradas, especialmente en aquellas que están principalmente enfocadas en sistemas de automatización y en procesos minero-metalúrgicos.

El primero de los casos mencionados supone la posibilidad de diseñar diversas estrategias de control, probar las mismas y evaluar los resultados sin tener necesariamente que trabajar sobre el proceso real. Esto es posible porque se cuenta con un software de simulación (ya mencionado anteriormente en el capítulo 5) que permite simular el control y probar el mismo sin utilizar el equipo que controla la planta y por lo tanto sin poner en riesgo la misma. De este modo, se puede estudiar otros procesos (no necesariamente relacionados al procesamiento de minerales) y encontrar el control óptimo que posteriormente puede ser implementado en el proceso real con los ajustes posteriores, los cuales serían en todo caso mínimos.

En cuanto al procesamiento de minerales, la planta permite también realizar diversas pruebas muestras de mineral de diversa procedencia, analizar los resultados y finalmente definir los ajustes en los equipos que permitan lograr los mejores índices de recuperación del metal valioso.

Es particularmente interesante señalar aquí el uso regular de la planta piloto en el estudio de muestras de mineral, a solicitud de empresas del rubro minero-metalúrgico. Esto desde luego supone un ingreso económico por este servicio, además de incrementar el conocimiento en este campo por parte de aquellos encargados por la Institución en realizar los mismos.

Se debe mencionar también que se realizan otras actividades tales como las que permiten hacer estudios sobre la disponibilidad de los equipos de planta para determinar el diseño de planes de gestión del mantenimiento o aquellas que permiten hacer un análisis de las tendencias de las variables eléctricas obtenidas de los motores con el fin de optimizar el control de los mismos.

Resulta oportuno comentar que los paquetes de software, instalados en las computadoras de la sala de control, constituyen importantes herramientas para desarrollar las actividades de investigación aplicada anteriormente descritas.

## 7.2 Logros Obtenidos

A lo largo de los años en que se ha utilizado la planta piloto, se ha logrado contribuir en la formación de jóvenes estudiantes en carreras de tecnología, en la capacitación de profesionales de la industria y en el desarrollo de empresas del sector minero a través de servicios de ingeniería.

Dentro del Programa de Formación Regular, equivalente a pre-grado en una universidad, estudiantes de distintas carreras han podido hacer uso de las instalaciones de la planta piloto para realizar una serie de actividades ya mencionadas anteriormente y dentro de cursos correspondientes a cada plan curricular.

En particular en dos de estas carreras es mayor el uso de este ambiente:

- Electrónica y Automatización Industrial, alrededor de 400 estudiantes pertenecientes a 13 promociones desde el año 2004.
- Operaciones Químicas y Metalúrgicas, alrededor de 180 estudiantes pertenecientes a 6 promociones, desde el año 2004.

Los cursos en los cuales se dan mayormente las actividades señaladas son:

- Instrumentación Industrial I (tercer ciclo de estudios del plan curricular) y Supervisión y Control de Procesos Industriales (sexto ciclo) para la primera de las carreras antes mencionadas.
- Procesamiento de Minerales I (tercer ciclo), para la segunda de dichas carreras.

Es necesario señalar que la experiencia del manejo de sistemas reales por parte de los estudiantes a través del trabajo en un entorno muy similar a uno real y utilizando equipos de tecnología actual, ha significado también un aporte muy importante para que estos estudiantes, ya como egresados, se adapten rápidamente al entorno industrial y demuestren sus conocimientos y capacidades desde el inicio de su vida profesional contando con la confianza necesaria en sus propias posibilidades.

En el caso de cursos y programas dirigidos a capacitar a profesionales de la industria y egresados de ingeniería de otras instituciones, mencionamos para el área de Automatización Industrial los siguientes cursos:

- Sistemas de Control Distribuido y de Parada de Emergencia (perteneciente al Programa Integral de Sistemas Industriales de Control): alrededor de 120 participantes a través de 10 veces en que se ha dictado dicho curso.
- Sistemas y Redes Industriales (perteneciente al Programa de Especialización en Instrumentación y Control Industrial): 280 participantes a través de 18 veces en que se ha dictado dicho curso.
- Proyecto II (perteneciente al Programa de Especialización en Instrumentación y Control Industrial): 280 participantes a través de 18 veces en que se ha realizado dicha actividad.

En lo que corresponde al área de Química y Metalurgia:

- Programa Integral de Concentración de Minerales: unos 72 participantes a través de 6 veces en que se ha desarrollado dicho programa.
- Programa Integral de Procesamiento de Minerales e Hidrometalurgia: unos 85 participantes a través de 8 veces en que se ha desarrollado dicho programa.
- Programa de Especialización en Mineralurgia y Metalurgia Extractiva: unos 35 participantes a través de las 3 veces en que se ha desarrollado dicho programa.

Dentro de los numerosos servicios a empresas mineras que realiza el Departamento de Química y Metalurgia, algunos se han desarrollado en la planta piloto, siendo fundamentalmente dirigidos a estudios de flotación de minerales en celda-columna o molienda de los mismos para 2 empresas del sector minero desde el año 2006.

Se han ejecutado unos 8 a 10 servicios para las mismas, los cuales han representado un ingreso de aproximadamente \$40 mil. Se prevé incrementar el número de servicios anuales en respuesta a la solicitud de otras empresas, conecedoras ahora en la calidad de los servicios mencionados.

### **7.3 Perspectivas de la Planta Piloto**

La ampliación de la oferta de cursos y servicios mencionados en los acápite anteriores es desde luego importante para la Institución por representar evidentemente mayores ingresos. Sin embargo, un aspecto que influye en el interés del público en este sentido pasa

por mantener la planta actualizada tanto en los equipos de medición y control como en el software que complementa lo anterior.

Propuestas que van en esta dirección y que se pueden ser tomadas en cuenta son las siguientes:

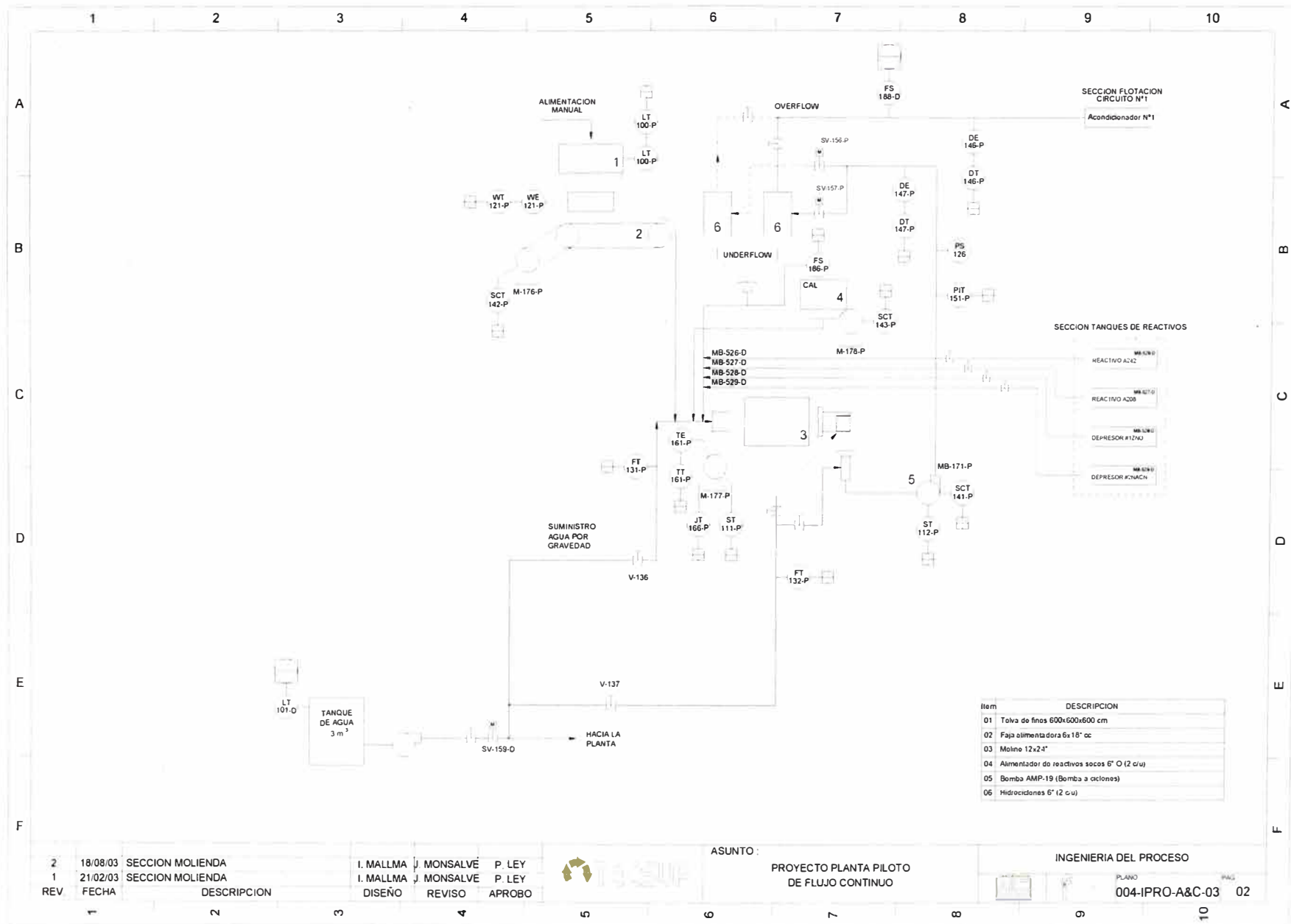
- Inclusión de un sistema de medición de tamaño de partícula en la zona de molienda utilizando los instrumentos disponibles actualmente para medir presión, flujo y densidad y con la instalación de un software de estimación de tamaño de partícula (PSE por sus siglas en inglés) en lugar de un medidor de tamaño de partícula (PSM), el cual es un equipo muy costoso.
- Automatización del sistema de alimentación de mineral chancado a la tolva de finos a través de una faja transportadora (aspecto no considerado en el proyecto inicial por cuestiones de presupuesto).
- Inclusión de software inteligente (en las computadoras de la sala de control), basado en sistemas expertos tal como se usa en algunas plantas mineras, para optimizar la molienda de mineral.
- Actualización del paquete de software de supervisión con que actualmente se cuenta, de modo tal que incluya herramientas que hoy en día están siendo muy utilizadas tales como la de manejo de activos, algo que va de la mano con la necesidad actual de una planta industrial de integrar el sistema de control de procesos de la planta con el administrativo.
- Inclusión de algunos instrumentos de campo con comunicación inalámbrica, de acuerdo al uso creciente de éstos en procesos de producción.
- Supervisión a través de la web de las operaciones de planta con la posibilidad de variación de ciertos parámetros.

## CONCLUSIONES

- La inclusión de prácticas de laboratorio como complemento de las sesiones de teoría en cursos de carreras profesionales de tecnología o de ingeniería es muy importante para la adecuada asimilación de los diversos temas que forman parte de un determinado plan curricular; más aún si se brinda las facilidades para trabajar en un ambiente que cuenta con elementos, equipos o sistemas similares a los que el graduado va a encontrar durante su etapa profesional.
- Una planta piloto como la que se describe en el presente informe, no solamente da la oportunidad de trabajar en ella a estudiantes o profesionales de diversas especialidades, sino también permite que cada uno de ellos se familiarice con diferentes operaciones industriales y eventualmente realice tareas multidisciplinarias.
- Un ambiente de estas características debe replicar en la medida de lo posible las situaciones que se encuentran en ámbitos reales. Es por ello que la infraestructura y equipos deben ser planeados contando con la participación de especialistas y en el tiempo asegurar que refleje el estado del arte de la tecnología, en especial en equipos electrónicos de control, dispositivos de comunicación y software. El conseguir para este propósito, el apoyo financiero institucional, así como el soporte de empresas proveedoras de las herramientas de hardware y software, es por lo tanto fundamental.
- Nuestras empresas de producción necesitan profesionales con gran conocimiento de la tecnología actual y que puedan proponer y desarrollar soluciones para mejorar el control de los procesos productivos. La oportunidad de realizar cursos de entrenamiento en facilidades como la planta piloto automatizada les permite el logro de las capacidades que hoy se requieren de un tecnólogo o ingeniero que va a estar a cargo de sistemas a menudo complejos y que han generado una inversión considerable en tiempo y dinero.

**ANEXO A**  
**P&ID de la Unidad de Molienda**





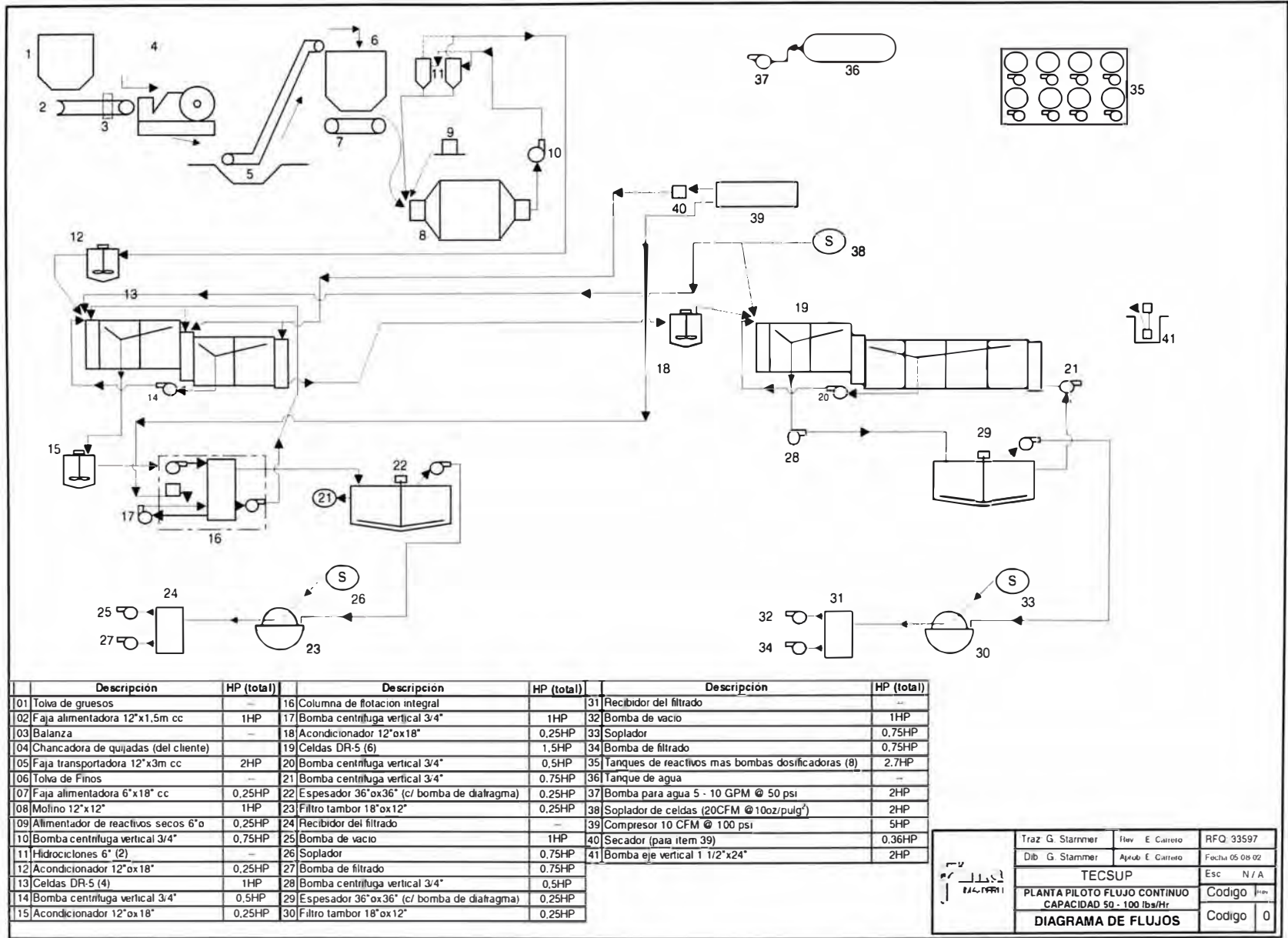
Item	DESCRIPCION
01	Tolva de finos 600x600x600 cm
02	Faja alimentadora 6x18" cc
03	Molino 12x24"
04	Alimentador de reactivos socos 6" O (2 c/u)
05	Bomba AMP-19 (Bomba a ciclones)
06	Hidroclones 6" (2 c/u)

2	18/08/03	SECCION MOLIENDA	I. MALLMA	J. MONSALVÉ	P. LEY
1	21/02/03	SECCION MOLIENDA	I. MALLMA	J. MONSALVÉ	P. LEY
REV	FECHA	DESCRIPCION	DISÑO	REVISO	APROBO

ASUNTO: **PROYECTO PLANTA PILOTO DE FLUJO CONTINUO**

INGENIERIA DEL PROCESO  
PLANO: **004-IPRO-A&C-03** PAG: **02**

**ANEXO B**  
**Diagrama de Flujos de la Planta**

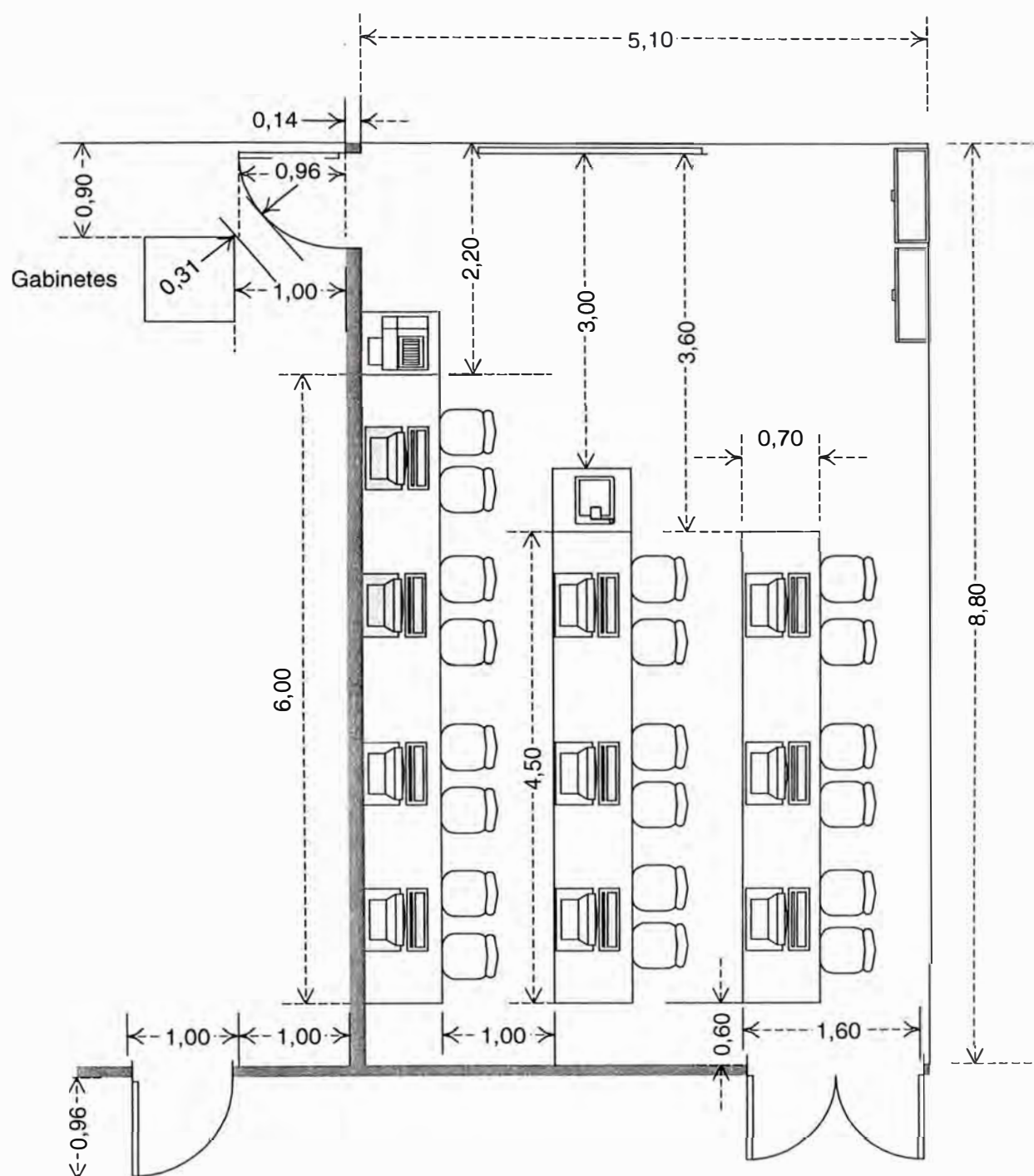


	Traz G. Stammer	Ilav E. Carroza	RFO 33597
	Dib. G. Stammer	Aprob. E. Carroza	Fecha 05.08.02
	TECSUP		Esc. N/A
	PLANTA PILOTO FLUJO CONTINUO CAPACIDAD 50 - 100 lbs/Hr		Codigo
<b>DIAGRAMA DE FLUJOS</b>			Codigo 0

**ANEXO C**  
**Formato de Estudio de HAZOP**



**ANEXO D**  
**Distribución de la Sala de Control**



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABZ Ingenieros. “Planta Piloto Automatizada – Propuesta Técnica”, 2002.
- [2] Siemens Moore Process Automation, Inc. “APACS+ Architecture – Product Information”, PI39-1, Rev 3, Agosto 2000.
- [3] Moore Process Automation Solutions. “APACS+ Process Suite 4-mation Configuration”, Agosto 2000.
- [4] Moore Process Automation Solutions. “QUADLOG, The Safety PLC”, Overview – Product Information, PIQL-1, Issue 3, Julio 1996.
- [5] ABZ Ingenieros. “Planta Piloto Automatizada – Propuesta Económica”, 2002.
- [6] Fima. Proyecto Planta Piloto de Flujo Continuo, Tomo 1: “Sistema de Automatización y Control”, Binders N° 4 y 5. Febrero 2003.
- [7] ABZ Ingenieros. Proyecto Planta Piloto de Flujo Continuo, DVD, Febrero 2002.
- [8] TECSUP. “Fundamentos de Control Automático”, Febrero 2002.
- [9] Bastante, J., Marchese, A. “Primera Planta Piloto en Procesamiento de Minerales”, Agosto 2003.
- [10] Bastante, J., Marchese, A. “Entrenamiento y Capacitación en Automatización de Procesos Metalúrgicos”. IV Simposium Internacional de la Información Aplicada a la Minería – Infomina, Septiembre 2004.