

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA UN PROCESO
DE MOLIENDA EN LA INDUSTRIA MINERA**

TESIS

*PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRONICO*

JUAN ULISES MENESES ATOCHE

PROMOCION 1991-II

**LIMA-PERU
1997**

SUMARIO

El presente trabajo de Tesis tiene por objetivo presentar el diseño del sistema de control para un proceso de molienda en la industria minera que permita maximizar la producción de mineral con una granulometría deseada, con bajos costos de mantenimiento y operación.

Para el diseño del sistema de control, que permita lograr los objetivos mencionados, en primer término se tuvo que conocer en detalle el comportamiento del proceso de molienda, con la finalidad de identificar adecuadamente las variables a controlar, las perturbaciones y las variables manipuladas, para determinar las estrategias de control más adecuadas.

Una vez determinado las estrategias de control se planteó la instrumentación del proceso, para lo cual se empleó elementos de medición, elementos de control final y controladores, siendo estos equipos de naturaleza electrónica analógica/digital que permiten por su gran flexibilidad, versatilidad, confiabilidad y fácil instalación, operación y mantenimiento, un excelente tratamiento de las variables del proceso. En definitiva un eficaz rendimiento y alta productividad de la planta.

***DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL
PARA UN PROCESO DE MOLIENDA
EN LA INDUSTRIA MINERA***

TITULO : DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA UN PROCESO DE MOLIENDA EN LA INDUSTRIA MINERA
AUTOR : Juan Ulises Meneses Atoche
GRADO : Título Profesional de Ingeniero Electrónico
FACULTAD : Ingeniería Eléctrica y Electrónica
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CIUDAD : Lima - Perú
AÑO : 1997

EXTRACTO

Para el desarrollo del presente trabajo de Tesis referente al Proyecto: "Diseño del Sistema de Control para un Proceso de Molienda en la Industria Minera", se ha considerado cinco capítulos que a continuación se describen:

En el Capítulo I se hace una descripción operativa del Sistema de Molienda, con la finalidad de conocer el proceso a controlar.

En el Capítulo II se propone el Sistema de Control adecuado al proceso, en el que se analiza la problemática de los sistemas de control tradicionales, las estrategias de control y reconocimiento de las diferentes variables del proceso.

En el capítulo III se presenta la sintonización del Controlador PID, analizándose los modelos matemáticos de los diferentes lazos de control del proceso, técnica de

sintonización y ajuste de parámetros del controlador.

En el Capítulo IV se describe la Instrumentación del Proceso, se conocen las especificaciones y características técnicas de los elementos de medición, elementos de control final y controlador, asimismo se analiza los sistemas electrónicos de transmisión de señales, interferencias en los dispositivos de control y técnicas de alambrado.

En el Capítulo V se hace una estimación de Costos por Suministros de Equipos y Servicios de Ingeniería y Mano de Obra Calificada que demandarían para implementar el Sistema de Control propuesto.

Finalmente se presentan las Conclusiones, Bibliografía y Anexos sobre especificaciones técnicas de los instrumentos de medición, actuación y control utilizados para implementar el Sistema de Control.

INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO I DESCRIPCION OPERATIVA DEL SISTEMA DE MOLIENDA	3
1.1 Generalidades	3
1.2 Configuración del circuito de molienda	6
1.3 Descripción del circuito de molienda	9
1.3.1 Alimentación de mineral al sistema de molino	9
1.3.2 Molino de bolas	10
1.3.3 Bomba y clasificador	13
CAPITULO II SISTEMA DE CONTROL INDUSTRIAL PROPUESTO	17
2.1 Problemática de los sistemas de control tradicional en los circuitos de molienda.	17
2.2 Comportamiento dinámico del circuito de molienda por vía húmeda.	18
2.2.1 Molino de bolas por rebose-hidrociclón; respuesta al cambio en el caudal de alimentación de mineral.	20
2.2.2 Molino de bolas por rebose-hidrociclón; respuesta al cambio en el caudal de adición de agua.	20
2.3 Sistema de control	25
2.3.1 Objetivos de control	25

2.3.2	Criterio de control	25
2.3.3	Estrategias de control	26
2.3.4	Otras estructuras de control, adicionales a la feedback, a emplearse	28
2.3.5	Funcionamiento del sistema de control	36
2.4	Configuración del sistema de control propuesto	37
2.5	Identificación de variables del proceso	42
2.6	Selección del controlador de lazo	43
CAPITULO III		
SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID		47
3.1	Modelo matemático del proceso	47
3.1.1	Alimentación de mineral al molino	47
3.1.2	Alimentación de agua al molino	55
3.1.3	Control del nivel de pulpa en el tanque sumidero	58
3.2	Método de sintonización	67
3.2.1	Método de la curva de reacción del proceso	68
3.3	Parámetros del controlador PID	70
CAPITULO IV		
INSTRUMENTACION DEL PROCESO		76
4.1	Generalidades	76
4.2	Especificaciones y características de sensores y actuadores	77
4.2.1	Sensores y transmisores	77
4.2.2	Elementos de control final	92

4.3	Especificaciones y características del controlador de lazo	103
4.3.1	Generalidades	103
4.3.2	Principio de operación de EXACT	109
4.3.3	Función de auto-sintonía (STUN, SELF-TUNE)	111
4.3.4	Función de pre-sintonía (PTUN, PRE-TUNE)	112
4.4	Sistema de transmisión de señales analógicas	119
4.4.1	Métodos electrónicos de transmisión analógica	119
4.4.2	Interferencia en la transmisión eléctrica	123
4.4.3	Técnicas de alambrado	127
CAPITULO V COSTOS		129
CONCLUSIONES		134
ANEXO A. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE UN MEDIDOR MAGNETICO DE FLUJO Y TABLA DE SELECCION DE FLOWMETER		139
ANEXO B. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MEDIDOR DE NIVEL		150
ANEXO C. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL SISTEMA DE PESAJE DINAMICO DE MATERIAL EN FAJA TRANSPORTADA		158
ANEXO D. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MEDIDOR DE DENSIDAD		164
ANEXO E. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MEDIDOR DE PRESION		167

ANEXO F. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE UNA VALVULA DE CONTROL	172
ANEXO G. ESPECIFICACIONES TECNICAS Y GUIA DE SELECCION DEL VARIADOR DE VELOCIDAD 1336 PLUS ALLEN BRADLEY	188
ANEXO H. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CONTROLADOR SINGLE STATION MICRO MODELO 760	200
BIBLIOGRAFIA	209

INTRODUCCION

En la actualidad la Industria Minera en el Perú ocupa un espacio importante en nuestra economía, teniendo sus condiciones restrictivas en los márgenes de los procesos y operaciones, tanto en los costos como en la calidad exigidos de los productos en el Mercado Internacional.

En forma similar a otros procesos industriales, la operación de un proceso de molienda dentro de la industria minero-metalúrgica se ha llevado acabo con instrumentación de control obsoleta y que desempeñan la función de indicadores en su mayoría, realizándose las acciones de control totalmente manual con la intervención permanente del operador(es) para mantener los regímenes de trabajo de las variables de proceso. Este sistema conlleva a situaciones imprecisas e ineficientes de control, reflejándose en una falta de mejoras de la producción y calidad del producto.

Dentro de este contexto el presente trabajo de tesis pretende cubrir un aspecto de ésta problemática al incorporar equipamiento con tecnología electrónica de punta y diseñar un sistema de control para el tratamiento de las variables analógicas del Proceso, el cual está conformado por las Estrategias de Control tales como el control

feedback, control cascada, control de razón y la utilización de un procedimiento de sintonización para el ajuste o sintonía de los parámetros del controlador.

La arquitectura que presenta el sistema, establece una coherente integración de los elementos de medición, mando y control, haciendo centralizar las variables del proceso que se consideran importantes en estaciones inteligentes que permiten manejar la información y la optimización de los sistemas como por ejemplo lograr un buen control y regulación de la carga circulante.

La utilización de los Controladores Digitales de Proceso en la implementación del Sistema de Control se justifica por su gran funcionalidad, flexibilidad, versatilidad, seguridad y fácil instalación y operación, además concediendo al sistema la capacidad de enlace con otros sistemas inteligentes. Todas estas cualidades del controlador aunadas a las que presentan los equipos y dispositivos de proceso, prestan valiosas ventajas de carácter técnico, económico y práctico frente a las alternativas clásicas.

Finalmente la implantación del Sistema de Control al circuito de molienda de minerales, logra alcanzar los objetivos del proceso, maximizar los índices de eficiencia y rentabilidad y mejorar la calidad del producto a un bajo costo de producción.

CAPITULO I

DESCRIPCION OPERATIVA DEL SISTEMA DE MOLIENDA

1.1 Generalidades

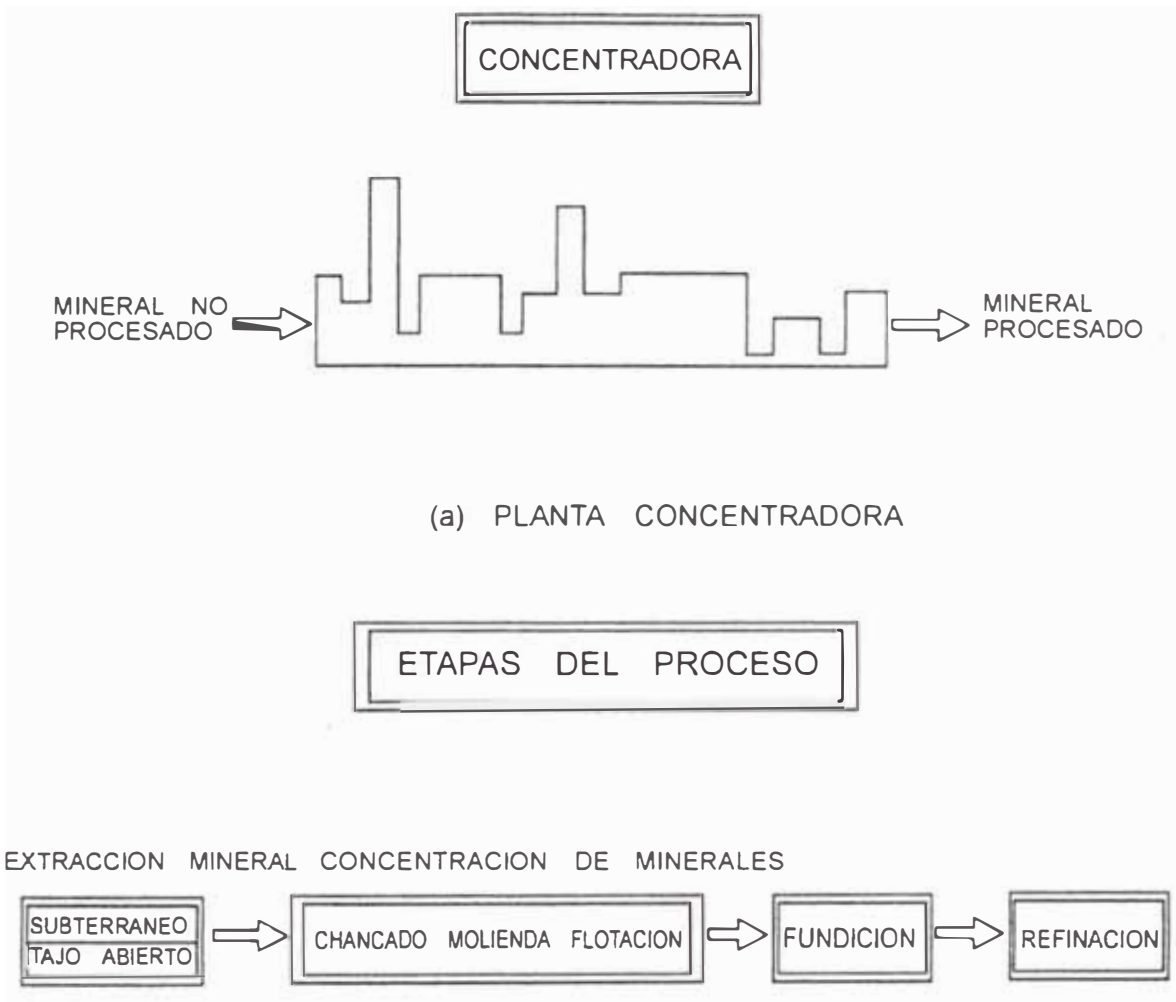
La Industria Minero-Metalúrgica, básicamente es un proceso de reducción dimensional (tamaño) de los minerales obtenidos de las minas. La finalidad es obtener mediante un procesamiento metalúrgico el producto final (metal) con una alta pureza contenido en la roca metalífera no procesada.

Los procesos minero-metalúrgicos de reducción dimensional generalmente conllevan varias etapas en serie, como de muestra en la figura 1.

Considerando el área ó circuito de molienda se puede decir que su función en una planta de proceso es preparar el mineral, bien su concentración por liberación de las menas aprovechables de la ganga, o para su reacción química exponiendo las superficies de los minerales aprovechables.

La molienda de minerales representa el limitante de la capacidad de una planta concentradora y la actividad de más alto costo e ineficiente en el proceso de una planta concentradora.

El mayor costo se deriva por el alto consumo de energía y de medios de molienda, abriendo un tema de estudio e investigación orientado a la mejora del control de las



(b) ETAPAS DE UNA CONCENTRADORA DE MINERALES

Figura1. Proceso Minero Metalúrgico

variables y optimización del proceso de molienda de minerales. Lo que se busca es elevar la productividad y la eficiencia de las operaciones involucradas, para lograr esto se requiere tener un control sobre cada una de las variables que intervienen en el proceso esto se consigue a través de una estrategia de control orientada a conseguir los objetivos trazados por el circuito.

Si un circuito debe ser controlado automáticamente tiene que ser posible detectar los cambios que se producen dentro del circuito o en las características del producto que sale del mismo, y de ser posible compensar esos cambios con variaciones adecuadas en las variables controlables.

En la actualidad se cuenta con tecnología capaz de brindar una solución integral a los diferentes problemas que se presentan en el proceso de tratamiento de minerales.

Por consiguiente, en este acápite se pretende mostrar la configuración y descripción del proceso de molienda, siendo una de las áreas importantes de la Industria Minera-Metalúrgica; con el propósito de obtener una información clara y precisa de las funciones de los diferentes componentes o equipos integrantes, variables de proceso y secuencia de funcionamiento integral del proceso a controlar.

Luego, en base a esta información previa que constituye la "personalidad del proceso", saber utilizar y seleccionar adecuadamente la tecnología de control y automatización, es decir, configurar la arquitectura más usual para disponer

de un sistema de control inteligente haciendo uso de los controladores digitales de lazo que permitan cumplir con los objetivos principales de control en un circuito de molienda.

1.2 Configuración del circuito de molienda

El flowsheet que se presenta en la figura 2 muestra el circuito típico de un proceso de molienda con las variables más importantes que se utilizan en las distintas estrategias de control.

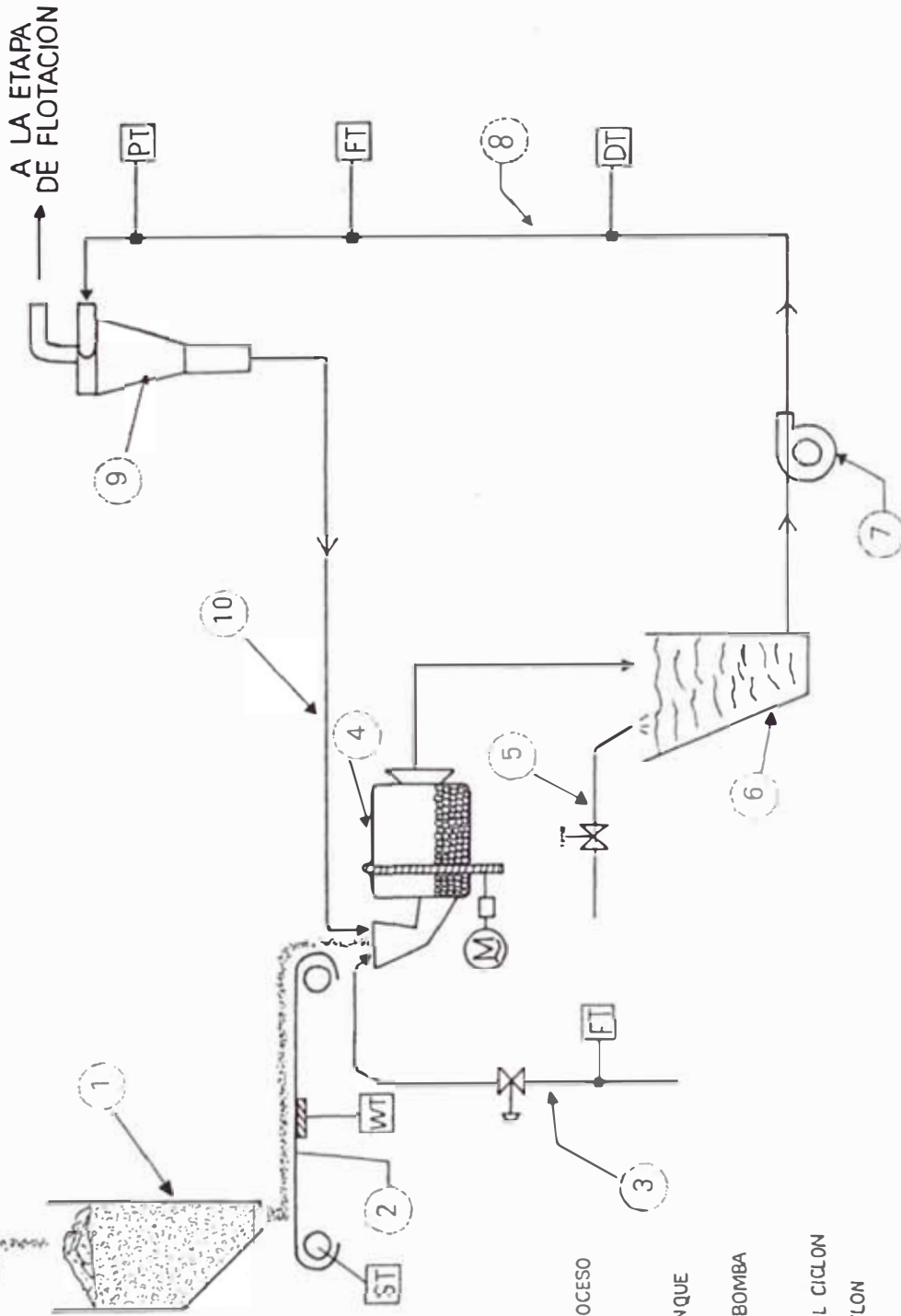
Este flowsheet del proceso constituye la base o punto de partida para el diseño del sistema de control del circuito.

Un circuito de molienda básico está constituido por los siguientes componentes:

- a) Sistema de transporte continuo de alimentación de mineral al molino.
- b) Molino, sistema para fragmentación y reducción de tamaño del mineral.
- c) Tanque sumidero, para recepcionar la pulpa de salida del molino.
- d) Bomba de succión, para impulsar la pulpa hacia el hidrociclón.
- e) Hidrociclón, unidad de clasificación de finos.
- f) Tuberías con válvulas para alimentación de agua de proceso al molino y tanque sumidero.

A continuación, se presenta en la figura 3 dos vistas principales de un circuito de molienda real, en ellas se puede apreciar en detalle la estructura, forma y

VIENE DE
CHANCADORA



LEYENDA

- ① TOLVA DE GRUESOS
- ② FAJA DE TRANSPORTE
- ③ SUMINISTRO DE AGUA DE PROCESO AL MOLINO
- ④ MOLINO
- ⑤ SUMINISTRO DE AGUA AL TANQUE DE BOMBA
- ⑥ TANQUE DE SUCCION DE LA BOMBA
- ⑦ BOMBA
- ⑧ TUBERIA DE ALIMENTACION AL CICLON
- ⑨ CLASIFICADOR TIPO HIDROCICLON
- ⑩ TUBERIA DE RECHAZO
- (FT) TRANSMISOR DE FLUJO
- (DT) TRANSMISOR DE DENSIDAD
- (PT) TRANSMISOR DE PRESION
- (ST) TRANSMISOR DE VELOCIDAD
- (WT) TRANSMISOR DE PESO

Figura 2. Flowsheet del Circuito de Molienda

distribución de los diferentes componentes que integran el proceso.

1.3 Descripción del circuito de molienda

En este acápite se presenta una descripción básica del funcionamiento del proceso tomando como base el flowsheet de la figura 2, el propósito es conocer el proceso y posteriormente establecer la adecuada estrategia de control para cumplir con los objetivos trazados.

1.3.1 Alimentación de mineral al sistema de molino

Se inicia con la descarga de la tolva de gruesos que produce un flujo de tipo continuo sobre la faja de transporte, siendo ésta accionada por un motor DC, con regulación de velocidad. Esta faja a su vez descarga el mineral al chute de entrada del molino. En la faja se mide la tasa de alimentación (Ton./hora) de mineral al molino.

El transportador se controla normalmente desde el Panel de molienda. Lleva un switch de parada de emergencia montado localmente (cable de tiro), que al ser activado detienen al transportador y da la alarma respectiva al Panel. También cuentan con conmutadores local/remotos en el Panel, switches de arranque/parada montados localmente. El conmutador local/remoto determinará que switch de arranque controlará al transportador.

En las descargas de las tolvas de gruesos se han instalado switches de flujo que dan alarma en el panel cuando cesa la alimentación.

El transportador está enclavado de tal manera que no

puede entregar mineral si el molino está parado.

El sistema de control tendrá como objetivo mantener una operación normal en el funcionamiento de la faja para mantener un flujo de alimentación de material uniforme y constante al molino.

1.3.2 Molino de bolas

El molino de bolas es un tambor cilíndrico rotativo que utiliza un medio de molienda que se pierde en la misma, al elevarse con la rotación del tambor, se rompe el mineral por combinación de los efectos de impacto, atrición y abrasión, hasta producir el producto especificado. Ver Figura 4.

El medio de molienda es un medio metálico (bolas de acero)

El molino de bolas siendo una unidad de fragmentación de mineral es controlado desde el panel de Molienda. En su entrada recibe tres tipos de alimentación, siendo:

- 1) Flujo de material proveniente de la faja de alimentación.
- 2) Flujo controlado de agua de proceso para formar una lechada de materiales molidos.
- 3) Flujo recirculante de gruesos denominado pulpa (mezcla de agua y mineral) proveniente de la salida del clasificador.

La propulsión del molino de bolas se realiza mediante un motor de corriente alterna AC de velocidad fija acoplado con el piñón de engranaje del Molino mediante un piñón más

pequeño fijado en el eje de una volante que acciona el motor. Ver Figura 5.

El motor debe ser arrancado desde el panel, pero las paradas pueden hacerse bien sea, desde el panel o desde el campo.

La demanda de potencia del accionamiento del molino es totalizada y registrada.

El material que se muele en el interior del molino, posteriormente es descargado por su salida, presentando la pulpa una densidad determinada. Luego, esta mezcla es vertida en el tanque de succión de la bomba en donde también se alimenta un flujo controlado de agua de proceso, para acondicionar la densidad de pulpa al valor deseado, permitiendo así una mejor clasificación en el clasificador.

1.3.2.1 Características de un molino de bolas

Un molino de Bolas se caracteriza por los siguientes parámetros:

- Tamaño: Diámetro, en m
Longitud, en m
- N° Cámaras
- Tipo de descarga
- Material de Placas
- Velocidad, en RPM
- % Veloc. crítica, en %
- Work Index, W_i , Kw/Tc
- Kw necesarios para operación
- Potencia del motor, en Kw

- Medio Moledor
- Volumen de cargas de bolas, en m^3
- Producción o capacidad, en Tm/h
- Trabajo: Circuito cerrado
- Tamaño de la alimentación, en mm
- % de -325m en descarga
- Gravedad específica del mineral
- Densidad de pulpa, m Kgr/ m^3

1.3.3 Bomba y clasificador

La pulpa de salida del tanque sumidero es impulsada hacia el clasificador por medio de una bomba del tipo centrífuga, accionada por un motor AC de velocidad variable, que se arranca y detiene en forma local o remota.

El proceso de clasificación del mineral según su tamaño o granulometría contenido en la pulpa, se da mediante el clasificador de tipo Hidrociclón, siendo un dispositivo mecánico. La figura 6 muestra una vista seccionada de un Hidrociclón típico.

La pulpa de alimentación, bien bombeada, entra tangencialmente y bajo presión a una cámara cilíndrica. Las partículas mayores o gruesas que las deseadas en el rebose (vortex finder u overflow), idealmente, permanecen cerca de la pared y bajan hacia abajo siguiendo el curso de una espiral saliendo fuera del hundido (apex ó underflow) retornando este flujo al molino para su remolienda. Normalmente ambas corrientes, rebose y hundido descargan a la presión atmosférica. En la figura 7, se muestra las

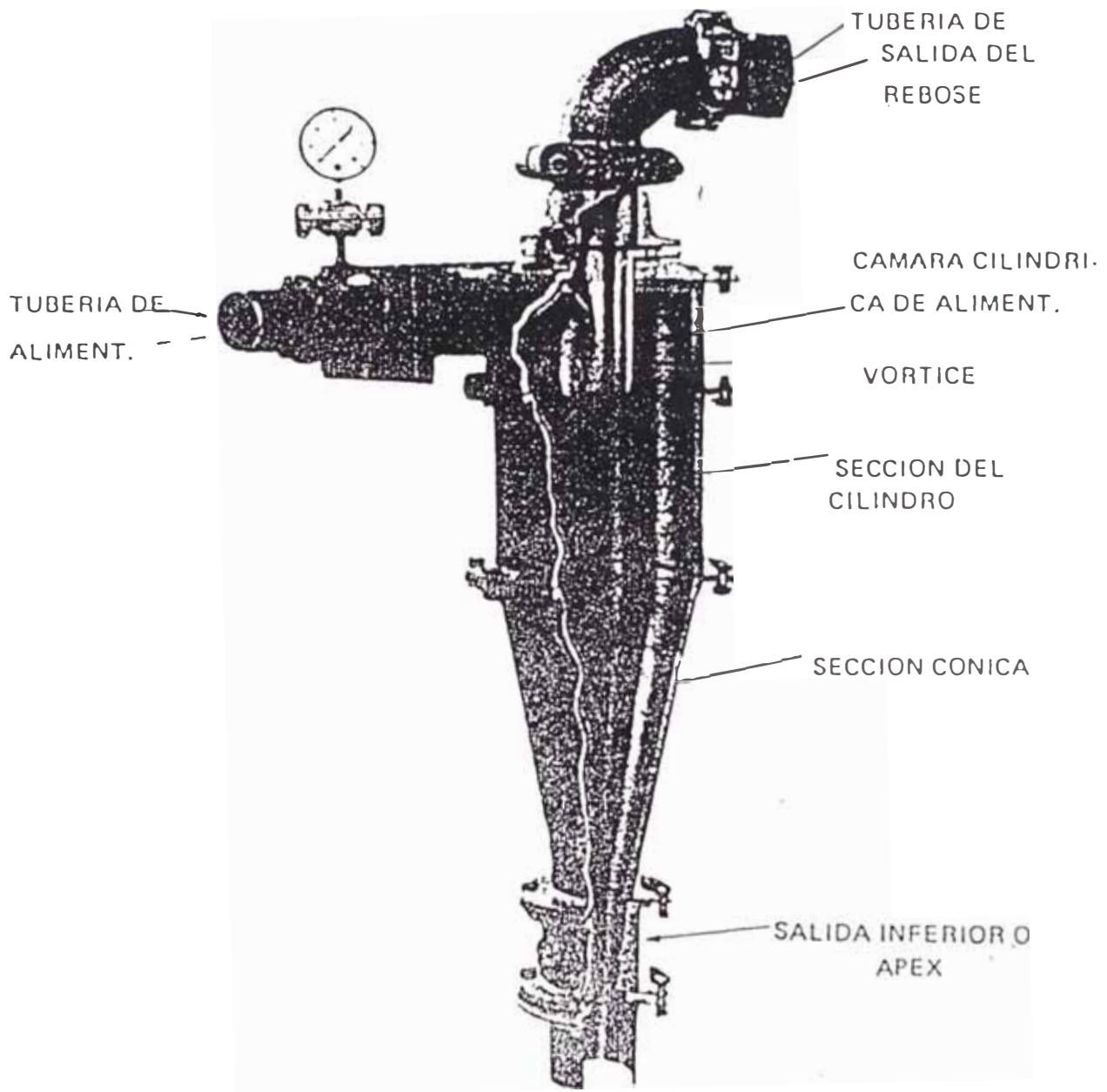


Figura 6. Vista Seccionada de un Hidrociclón

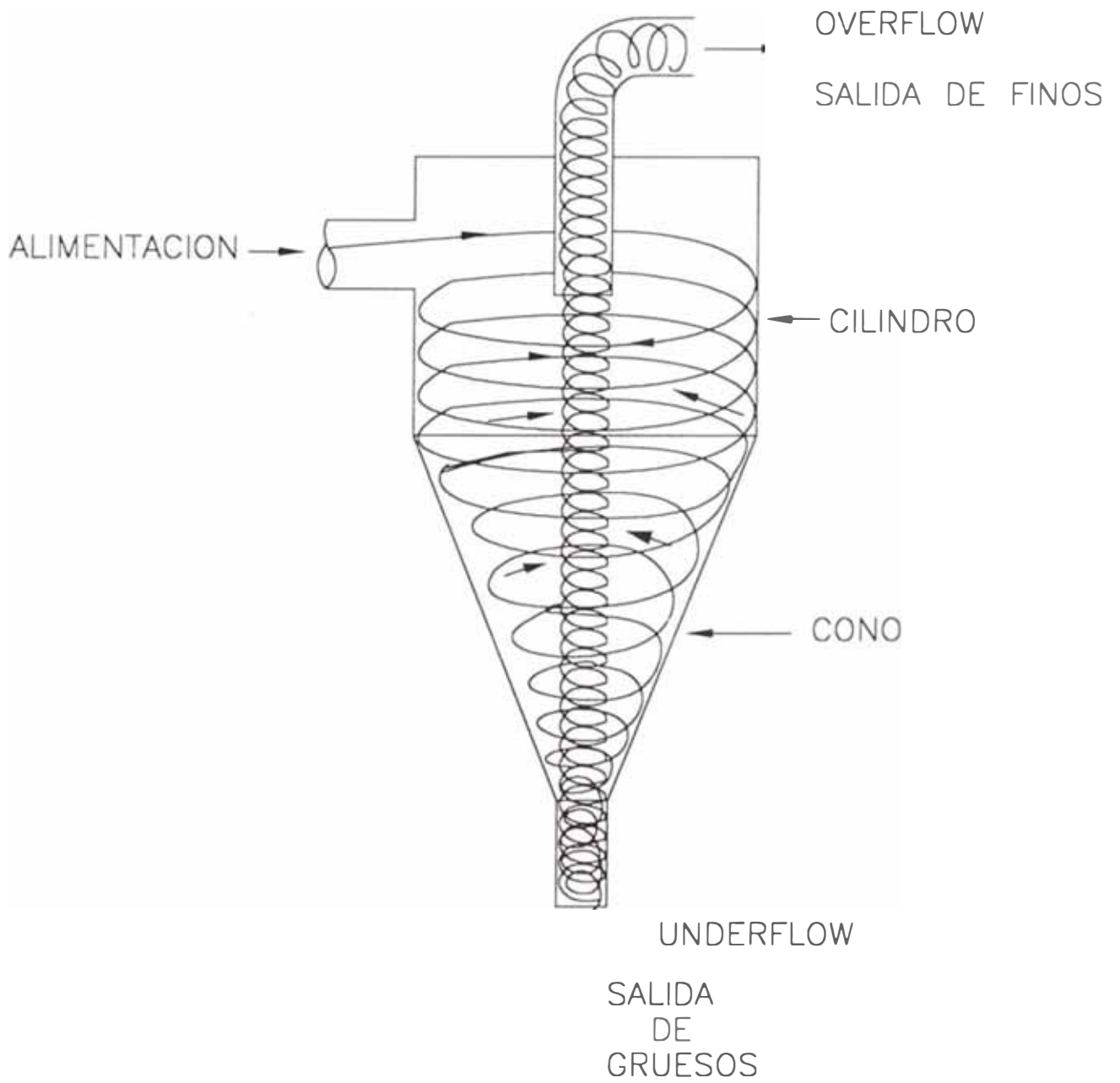


Figura 7. Flujos Internos en un Hidrociclón

corrientes de flujo de grueso y fino que ocurren en el interior del ciclón.

El flujo de pulpa de finos obtenida por la salida overflow del clasificador constituye la salida del circuito de molienda y se dirige hacia la siguiente etapa de flotación.

De la pulpa que es impulsada por la bomba hacia el hidrociclón se mide las variables flujo y densidad (contenido de mineral por unidad de volumen de pulpa) enviándose la señal del sensor/ transmisor al panel de molienda para indicación, registro y control.

CAPITULO II SISTEMA DE CONTROL INDUSTRIAL PROPUESTO

2.1 Problemática de los sistemas de control tradicional en los circuitos de molienda

La realidad actual de los sistemas de control en circuitos de molienda en diversas plantas concentradoras de minerales de medianas a pequeñas son casi totalmente manuales y los dispositivos de accionamiento y regulación en su mayoría se encuentran en estado de obsolescencia. Esto trae como consecuencia, una deficiente acción de control y supervisión sobre los estados de las variables involucradas en el proceso, por consiguiente, la calidad del producto final y la productividad de la planta no son los adecuados para cumplir con las **exigencias** técnicas-económicas impuestas por el mercado nacional e internacional, reflejándose los efectos en una rentabilidad baja de la empresa.

En estos sistemas de control, no se implanta lazos de control con realimentación mas bien lazos abiertos que carecen de regulación de una variable frente a perturbaciones del proceso. El ajuste y/o regulación es realizada por el operador, estando este pendiente de las variaciones de las variables controladas. De esta forma el sistema es mas operaciones manuales que automáticas

perdiendo rapidez, precisión y estabilidad.

A continuación, se cita los casos más saltantes de un proceso de molienda que son medidos y controlados manualmente y que deberían ser controlados automáticamente su funcionamiento y operación:

- Carencia de equipo sensor/transmisor para medir peso de material en fajas en movimiento.

Esto significa que el flujo de material que entrega la faja al molino sea estimado aproximadamente, no contándose con un registro exacto del flujo por día que permite obtener los índices de productividad de la planta. Además, se carece de acción de control sobre el motor que acciona las fajas cuando se presenta alguna perturbación en la densidad de pulpa o dureza del material.

- Carencia de equipo para medir la densidad de pulpa de alimentación al clasificador.

Debido a la falta de un equipo o instrumento en línea que mida la densidad del material a la salida de la bomba, la medición es hecha manualmente.

El operador toma una muestra de 1 litro de pulpa y esta es pesada, obteniéndose aproximadamente la densidad (Kg/m^3). La falta de la medición de esta variable imposibilita el control de las fajas de alimentación de material.

2.2 Comportamiento dinámico del circuito de molienda por vía húmeda

En un circuito en funcionamiento, las variables importantes que afectan al rendimiento del mismo son:

- Caudal de alimentación del mineral;
- Promedio de adición de agua en todos los puntos de aporte;
- Dureza del mineral de alimentación; y
- Análisis granulométrico del mineral de alimentación.

Estas cuatro variables constituyen dos clases a saber:

- 1) Los caudales de alimentación del mineral y de la adición de agua son variables que pueden ser deliberadamente manipuladas con objeto de controlar el proceso.
- 2) La dureza de alimentación y el análisis granulométrico de la misma son alteraciones variables, esto es, variables que no son normalmente controladas, y pueden ser considerados como las responsables de alteraciones fortuitas en la alimentación al proceso.

Para la instrumentación de un sistema de control adecuado, las variables anteriores pueden ser considerados como las más importantes, ya que las mismas se encuentran disponibles para su manipulación, mediante el sistema de control. Cualquier esquema de control tiene que asentarse sobre la manipulación de estas variables para considerar las alteraciones que se producen como consecuencia del cambio en las variables de la última categoría. Es importante tener un conocimiento preciso de la forma en que los ajustes de estas variables afectan al funcionamiento del proceso, tanto a corto plazo (funcionamiento dinámico)

como a largo plazo (funcionamiento estable).

2.2.1 Molino de bolas por rebose-hidrociclón; respuesta al cambio en el caudal de alimentación de mineral

En la figura 8 se muestra el comportamiento dinámico del circuito de molienda que responde a una variación del caudal de alimentación de mineral.

Puede verse que en todos los puntos del circuito hay una transición gradual desde una condición operativa a otra, y que el máximo efecto se consigue en las condiciones de estado estable. Esto está en contraposición al efecto obtenido con agua, que será mostrado en la siguiente subsección.

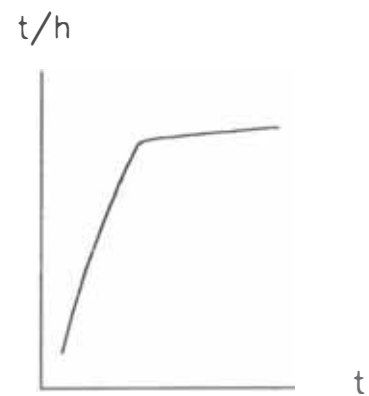
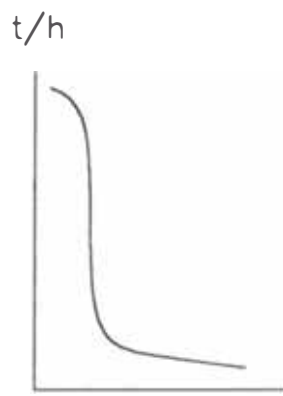
2.2.2 Molino de bolas por rebose-hidrociclón; respuesta al cambio en el caudal de adición de agua

Los resultados de los cambios graduales en la adición de agua se muestran en la figura 9.

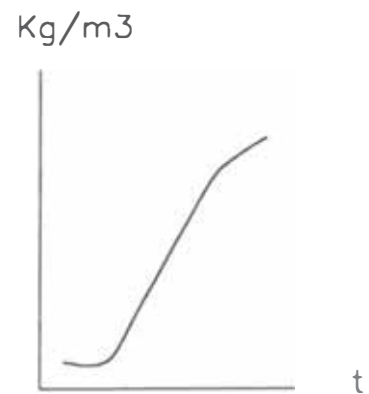
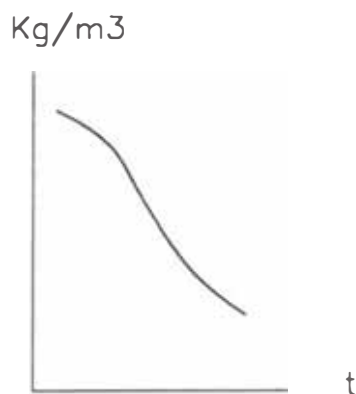
En la figura se puede observar que con la adición gradual de agua existe una inmediata respuesta tanto en la densidad de alimentación al ciclón como en el análisis granulométrico del rebose. Esto es seguido por un lento retorno a la densidad de la carga circulante hasta un punto entre el valor del estado estable y el valor después de la respuesta inicial.

La respuesta inicial al cambio gradual representa una variación en el rendimiento del clasificador con cambio en la densidad de alimentación y volumen de flujo adicional. La respuesta continuada representa por tanto los efectos

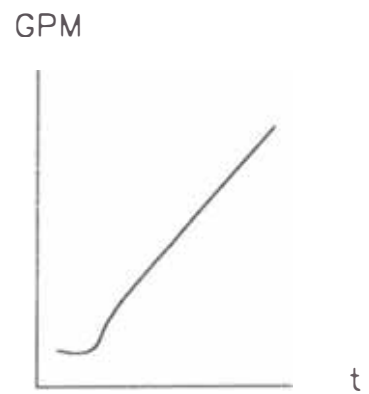
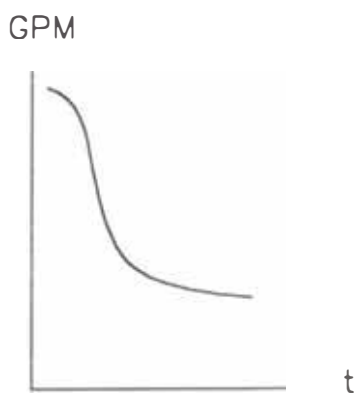
CANAL DE ALIMENTACION DE MINERAL (t/h)



HIDROCICLON DENSIDAD DE ALIMENTACION



HIDROCICLON, CAUDAL DE ALIMENTACION(9 PM)



HIDROCICLON REBOSE % PASANTE 147 um

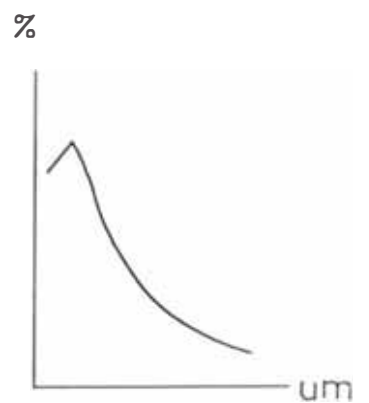
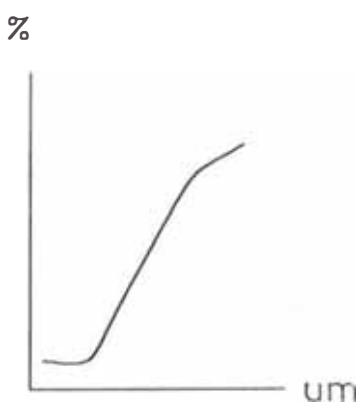


Figura 8. Respuesta del Circuito de Molienda al Cambio del Caudal de Alimentación de Mineral

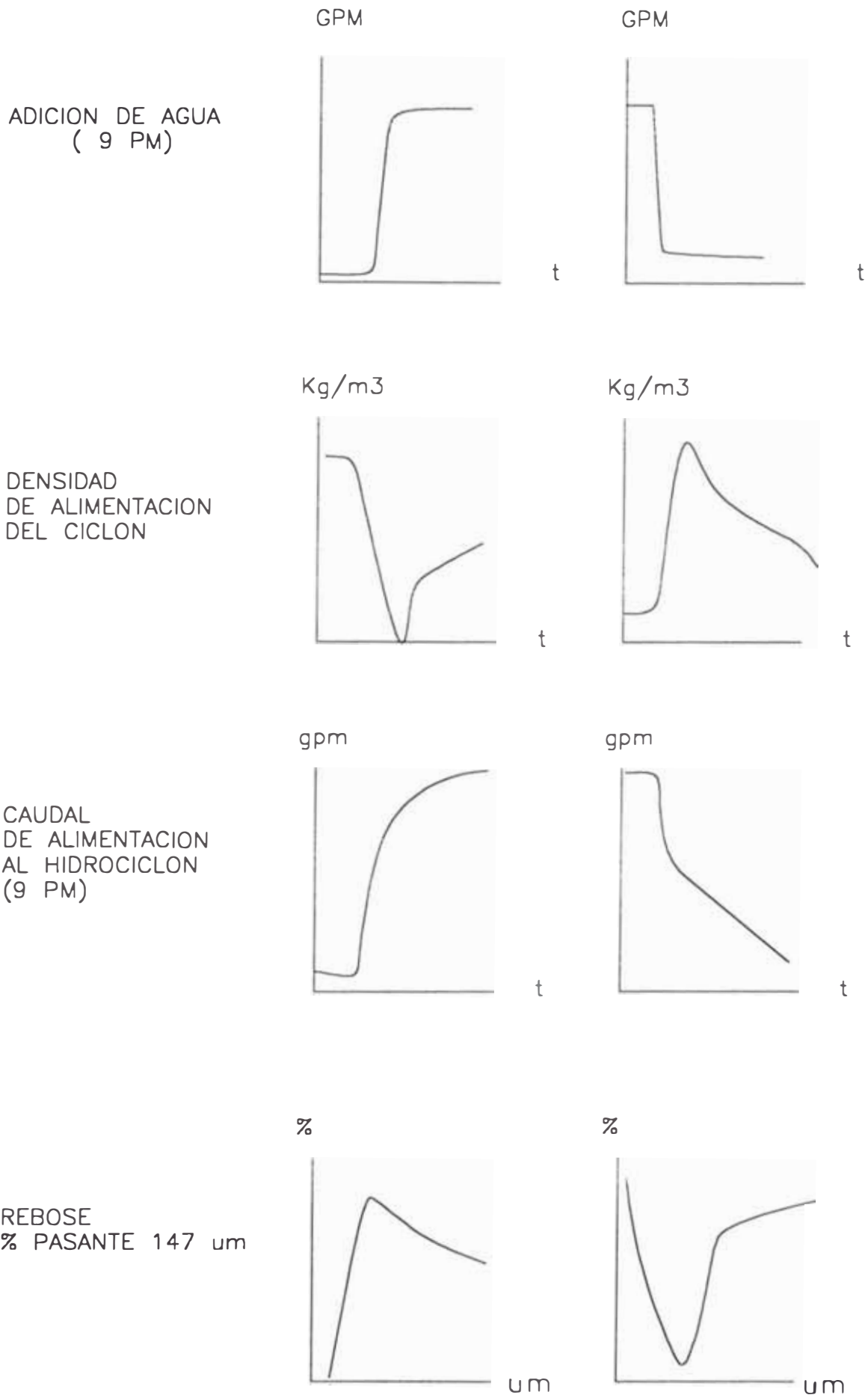


Figura 9. Respuesta del Circuito de Molienda a los Cambios en la Adición de Agua en el Tanque de Succión

combinados de la variación en el rendimiento del molino y el clasificador a medida que cambia la carga circulante.

La relativamente grande respuesta inicial del ciclonado para una unidad de cambio en la adición de agua es muy importante para el aspecto del control del circuito. La necesidad de mantener un cuidadoso control del caudal de alimentación al circuito y la densidad está claramente demostrado. Un cambio en el volumen de la descarga del molino de bolas tendrá un doble efecto. Primeramente, el rendimiento se verá afectado por cualquier cambio en el caudal de alimentación y, en segundo lugar, a condición de que la adición de agua al circuito permanezca constante, el promedio neto de dilución en la bomba de alimentación al clasificador variará con los cambios en el flujo de descarga del molino. El efecto de esto es variar tanto la densidad de alimentación al clasificador como el caudal medio, con la consiguiente variación del rendimiento del ciclón.

Los resultados muestran que el molino de bolas proporciona muy pocos cambios en la caída del caudal del circuito. Este efecto es porque la pulpa tiene una distribución granulométrica mucho más gruesa y una densidad más alta, lo que no permite al caudal fluir tan prontamente. El hecho de que el molino no arroje cambios del flujo indica que el efecto de la variación en la alimentación tiende a ser amplificadas en la carga circulante. Una unidad con bomba de velocidad fija tiene un

efecto similar a grandes variaciones en el promedio de alimentación.

Estos resultados confirman la importancia de: (1) la utilización de una bomba de velocidad variable, y (2) la utilización de un sistema de control de nivel en el cual el nivel en la tolva proporcione un punto de regulación remoto para el elemento de control del caudal medio de alimentación al clasificador.

Este sistema de control de velocidad de la bomba permite variar el nivel de la tolva en una considerable gama de alturas manteniendo al mismo tiempo relativamente constante el caudal de alimentación al clasificador. Esto efectivamente elimina las variaciones a corto plazo en el caudal medio por el uso de la capacidad de la gran tolva de la bomba.

El estudio sobre la dinámica del circuito pone de manifiesto una importante diferencia entre la respuesta del circuito a los cambios de caudal de alimentación de mineral y la correspondiente a cambios en la adición de agua. Las variaciones en el promedio de alimentación de mineral inician un lento cambio progresivo en el cual el estado de equilibrio final, representa la respuesta máxima del producto. Por contraste, el cambio en el adición de agua al clasificador proporciona la máxima respuesta instantánea, mientras que la respuesta de equilibrio del producto es relativamente pequeña.

2.3 Sistema de control

Habiéndose, conocido el comportamiento dinámico del proceso o "personalidad" del mismo siendo esta la base para la correcta implementación del sistema de control, que se adapte a las condiciones ó características inherentes y operativas del proceso, dando por resultado una funcionalidad de control eficiente y deseado. Por lo tanto, esta subsección se desarrolla como sigue.

2.3.1 Objetivos de control

Los principales objetivos de un proceso de molienda operando en circuito cerrado con hidrociclones son usualmente:

- Obtención de una distribución granulométrica del material producido, que se encuentre en un rango adecuado para la siguiente etapa de flotación.
- Estabilizar y maximizar la capacidad de procesamiento de mineral.

2.3.2 Criterio de control

Para obtener un fluido de finos en el rebose del overflow del clasificador que cumpla con los valores deseados de producción y granulometría, permitiendo así un mejor procesamiento en la siguiente etapa, se utilizará un criterio típico en la instrumentación y control del circuito:

- Manteniendo una carga circulante constante a una densidad determinada y usando para el efecto una bomba con accionamiento de velocidad variable, para

alimentación de pulpa al hidrociclón.

En consecuencia, se controla el tamaño de partícula en forma indirecta, controlando el nivel del tanque sumidero y controlando la densidad de pulpa alimentada al hidrociclón a través del flujo de mineral alimentado.

2.3.3 Estrategias de control

1. Control de la alimentación de mineral al molino

Parámetros de regulación:

- Variable peso instantáneo del mineral en la faja de alimentación (TM/H)
- Velocidad de la faja de Transporte (4 a 20m Λ).
- Regulación del variador de velocidad de acuerdo al peso instantáneo para gobernar la velocidad del motor de la faja de transporte.

Este lazo de control trata de mantener todo el tiempo un ingreso constante de material al molino. Ver Figura 10.

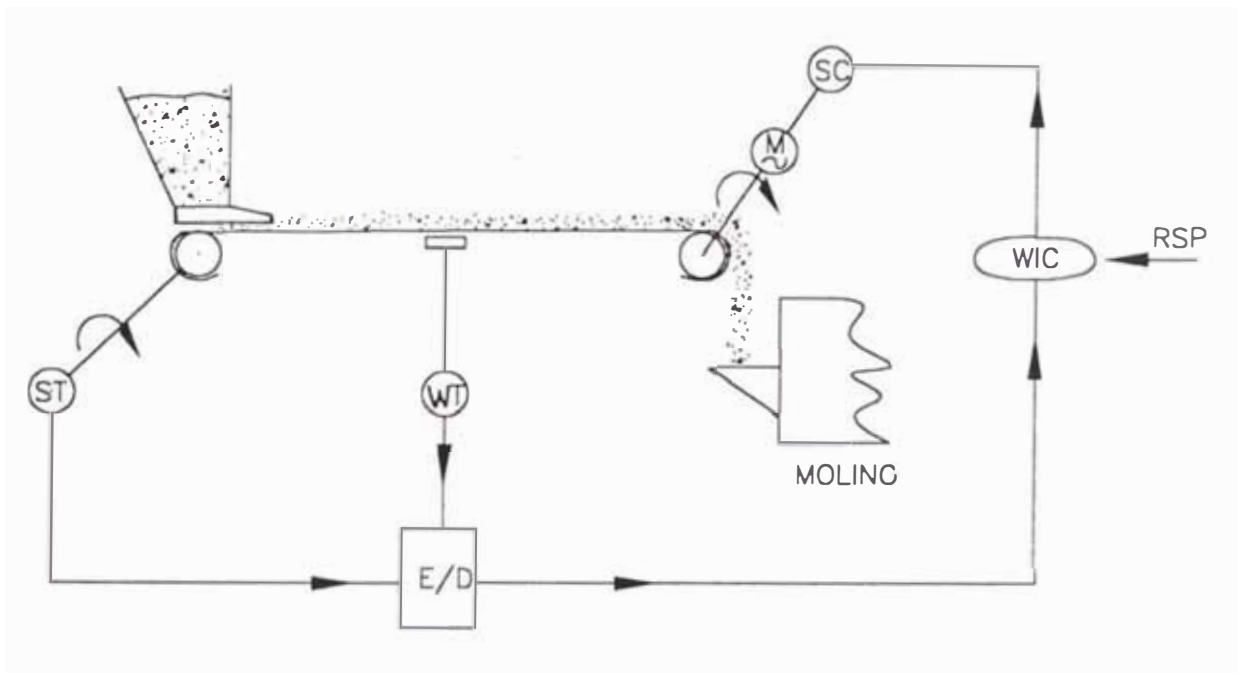
La estrategia o modo de control utilizada en el controlador es el P (PROPORCIONAL).

2. Control de ingreso de agua al Molino

Parámetros de regulación:

- Flujo de ingreso de agua (TM/H)
- Control de posición de la válvula moduladora de flujo de agua.
- Regulación de posición de acuerdo al flujo de material ingresando.

Este lazo de control trata de mantener una relación constante de proporcionalidad entre el ingreso de material



DONDE:

ST Transmisor de velocidad

WT : Transmisor de Peso

SC : Variador de Velocidad

WIC : Controlador Indicador de Flujo de Materia

E/D · Cuadrante Encoder/ Decoder

RSP : Set Point Remoto

Figura. 10. Configuración del lazo de control del flujo de material en la faja.

e ingreso de agua. En este caso el control del ingreso de agua es para mantener una densidad constante en el molino. Ver Figura 11.

El controlador del lazo de flujo de agua al molino estará configurado por el modo de control PI (Proporcional-Integral), ya que, la variable flujo es un proceso muy rápido y se requiere de precisión.

3. Control del nivel de pulpa en el tanque de succión de la bomba.

Parámetros de regulación:

- Nivel de pulpa en el tanque sumidero.
- Control de la velocidad de la bomba de alimentación al ciclón separador de material. Proveyéndose un flujo y presión adecuados para una eficiente clasificación del ciclón. Ver Figura 12.

El modo de control a implementarse en el controlador de nivel de pulpa es el tipo P (Proporcional).

2.3.4 Otras estructuras de control, adicionales a la feedback, a emplearse

Las estructuras de control vienen a constituir técnicas adicionales que al implementarlas mejoran las características estáticas, dinámicas y de operación de los simples lazos de realimentación (feedback loop). Las estructuras a utilizarse en el sistema de control del proceso son: control en CASCADA y control de RAZÓN (RATIO).

2.3.4.1 Control en cascada

Por definición, un sistema de control en cascada (ver

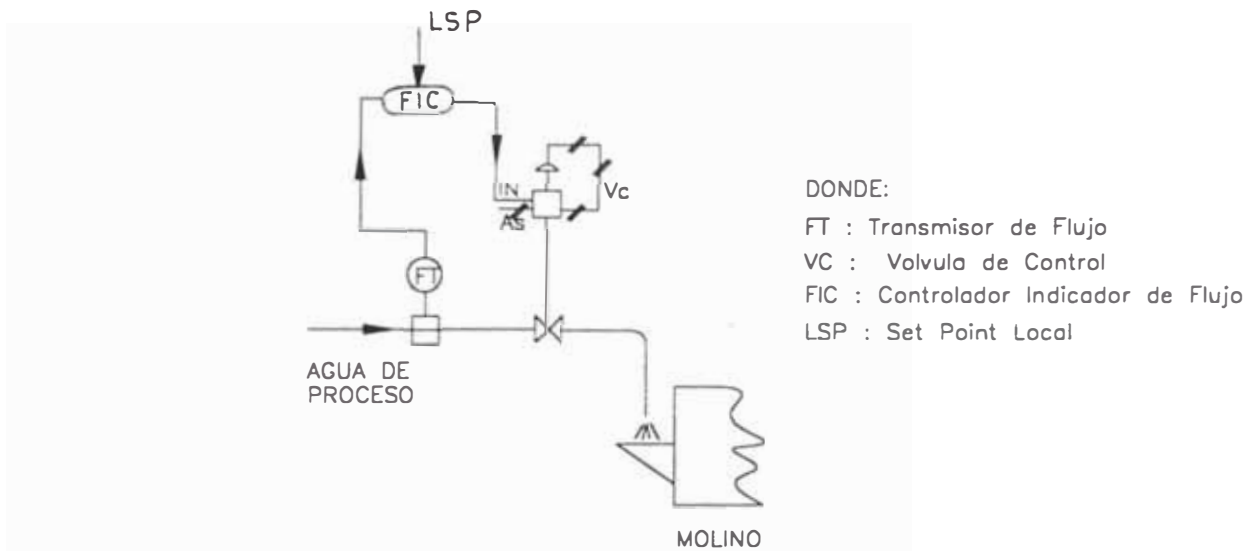


Figura. 11. Configuración del lazo de control del ingreso de agua al molino

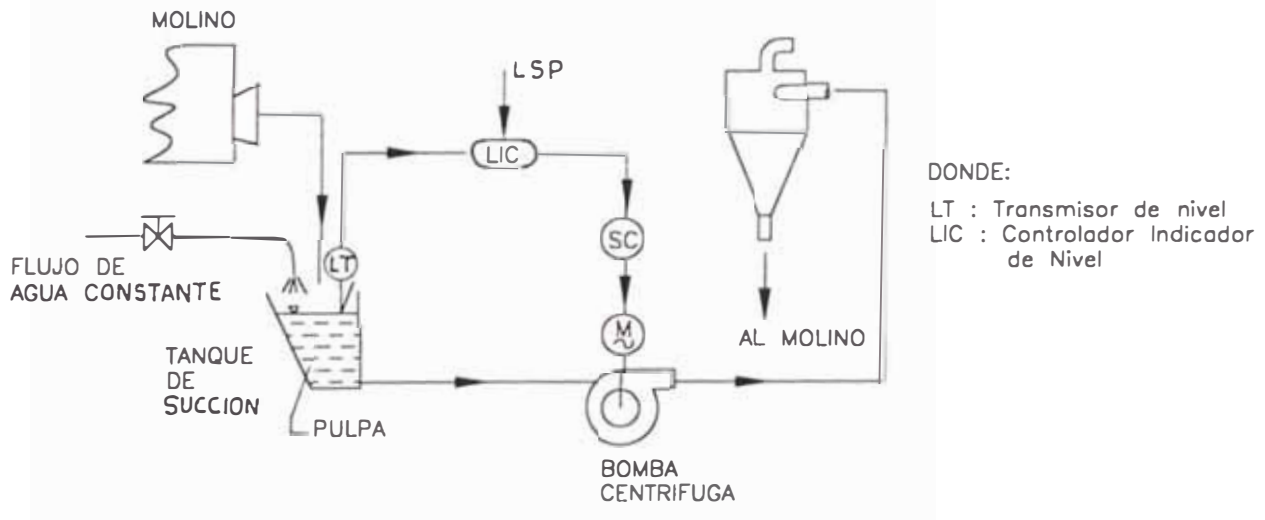


Figura 12. Configuración del Lazo de Control del Nivel en el Tanque de Succión de la Bomba

Figura 13) emplea un controlador (primario o maestro) instalado sobre la variable la cual es regulada a un valor constante, y un segundo controlador (secundario o esclavo), instalado sobre alguna variable que pueda ocasionar fluctuaciones en la primera o variable primaria. El controlador primario posiciona el punto de ajuste o de consigna del secundario y éste a su vez opera al elemento de control final.

Su función es simplemente mantener una variable, la primaria, a un valor constante. El controlador secundario es introducido sólo para hacer este trabajo más fácil y por lo tanto más eficaz.

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un lazo de control complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones en alguna condición del proceso.

Para la realización de un control en cascada, hemos de tener en cuenta en primer lugar que sólo es posible eliminar, total o parcialmente, el efecto de aquellas perturbaciones que afectan a la planta si son medibles, controlables y actúan sobre una parte secundaria del proceso. Si estas perturbaciones pueden controlarse mediante el uso de un lazo de realimentación interna, evitaremos así que se transmitan a la salida del lazo de

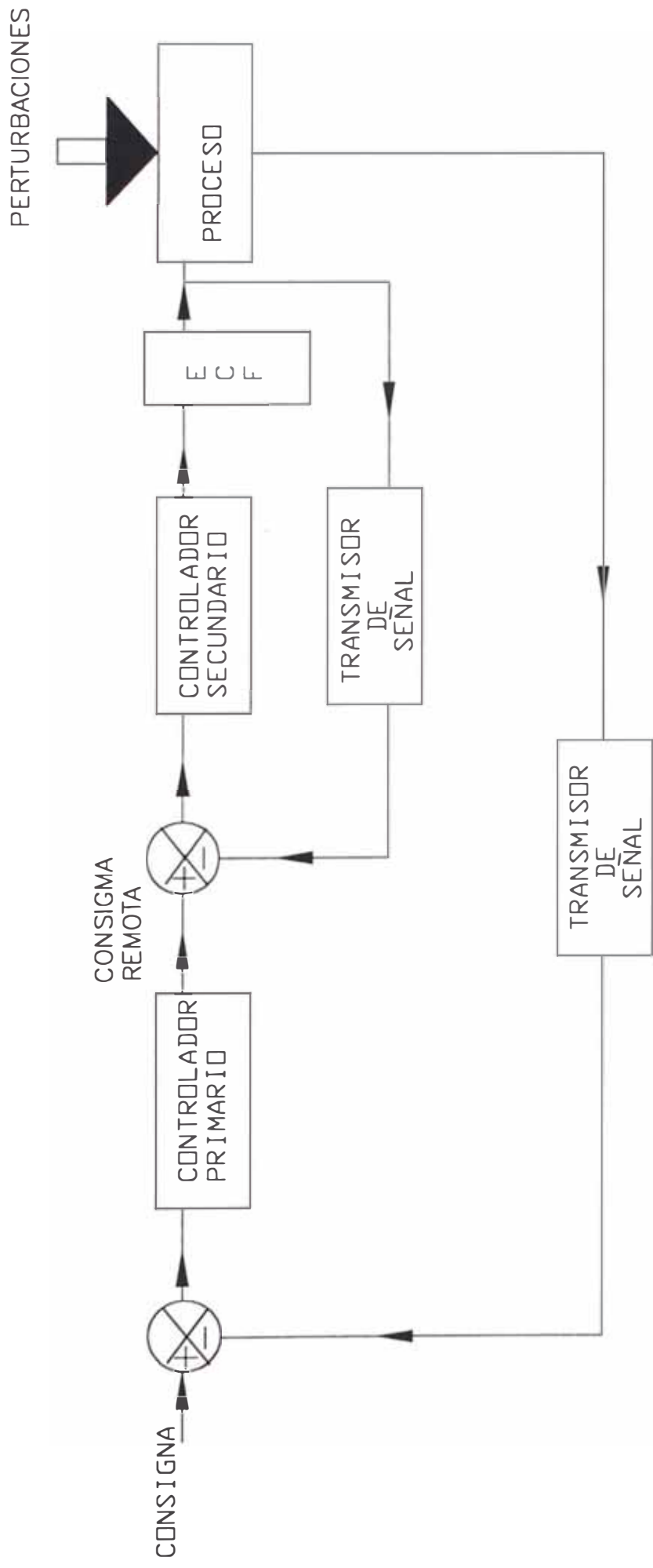


Figura. 13. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA

control principal.

En segundo lugar, hemos de ser conscientes que los esquemas de control en cascada son útiles sólo si la dinámica del lazo principal de realimentación es lenta si se compara con la del lazo interno. En estos casos, sin la estructura en cascada las perturbaciones se transmitirían a la salida y tardarían mucho tiempo en observarse y corregirse.

Algunos aspectos o reglas prácticas para el diseño de control en cascada podrían ser:

a) Determinar aquellas perturbaciones que sean:

Medibles y controlables.

Su dinámica es rápida en comparación con el proceso principal bajo control.

b) Dividir el proceso en subprocesos para establecer los lazos primarios y secundarios atendiendo a:

La eliminación por los lazos internos del mayor número de perturbaciones, o bien, los más importantes o frecuentes.

La seguridad de la instalación.

El rechazo de otras perturbaciones que actúen sobre la planta.

c) Establecer los lazos de acuerdo a las variables intermedias seleccionadas.

d) Sintonizar los reguladores.

■ Aplicación en el Proceso

La técnica en cascada dentro del sistema de control del

circuito de molienda es utilizada para mantener constante en el valor deseado a la densidad de la pulpa de alimentación al ciclón, esto se consigue controlando el flujo de carga de material de alimentación al molino.

La configuración de los lazos primario y secundario de esta técnica es como sigue:

■ **Lazo secundario**

- Controlador del flujo de material en faja.
- Transmisor de peso/velocidad en faja.
- Elemento de control final, el variador de velocidad del motor de la faja.
- Set point remoto.
- Modo de control tipo P (ver tabla 3.4).

■ **Lazo primario**

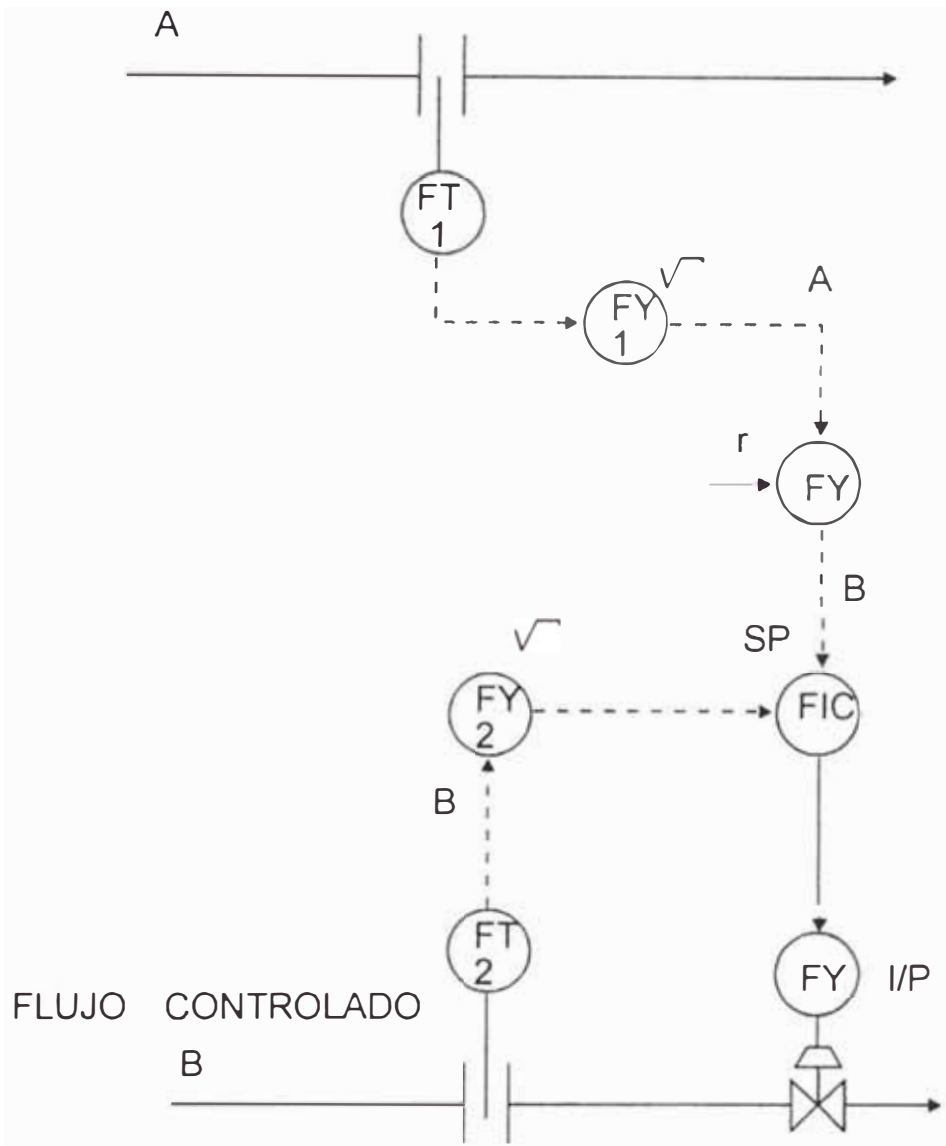
- Controlador de flujo másico de pulpa hacia el ciclón.
- Transmisores de densidad y flujo volumétrico.
- Señal de salida como set point del controlador secundario.
- Set point local.
- Modo de control tipo PID (ver tabla 3.4).

2.3.4.2 Control de razón

El control de razón o relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Este tipo de control satisface el control de la relación entre dos cantidades.

Estas cantidades suelen ser caudales de fluidos ó sólidos tal como puede verse en la Figura 14. La señal del

FLUJO VARIABLE



FLUJO CONTROLADO

ESTACION DE RAZON

$$\frac{B}{A}$$

DONDE:

$\frac{B}{A} = r$ =razón ó relación que guardan los flujos A y B

$$B = Ar$$

FY : relé de relación

figura 14 a. Control de Razón.

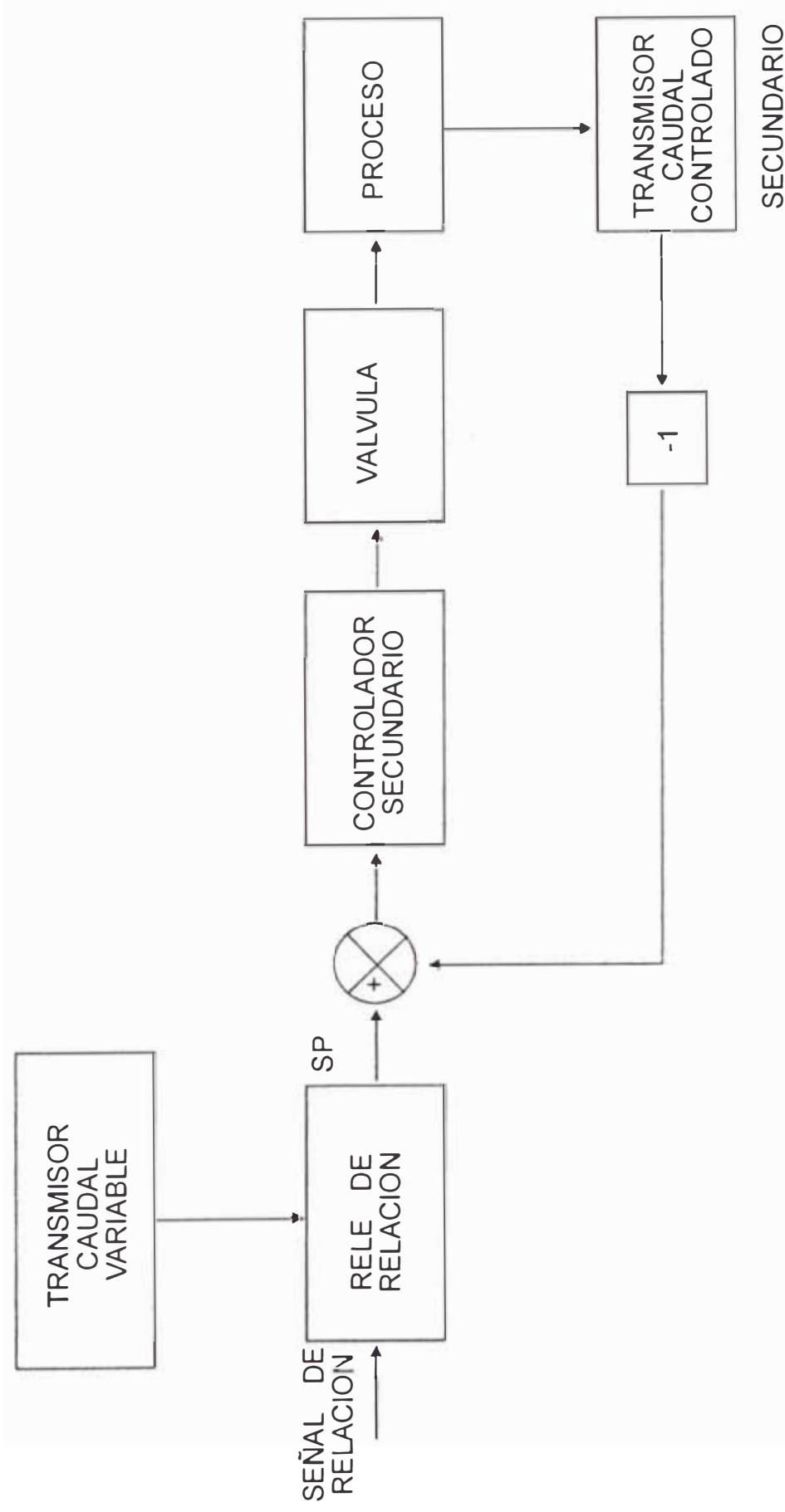


Figura.14(b): CONTROL DE RAZON

transmisor de caudal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente.

La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal actúa directamente sobre el elemento de control final.

Una aplicación típica del controlador de relación dentro del circuito de molienda se encuentra en la relación entre el caudal de alimentación de mineral y el caudal de agua que ingresan al molino. Existe una expresión que relaciona el porcentaje de agua ingresada al molino y el porcentaje de alimentación de mineral, siendo:

$$D = \frac{L}{S}$$

P.ejm: $L = 34 \%$ agua y $S = 66\%$ Sólidos, entonces

$$D = \frac{34}{66} = \frac{1}{2} \rightarrow \text{relación entre flujos.}$$

Esto quiere significar que el flujo o caudal de alimentación de mineral es el doble del flujo de agua.

Por lo tanto, el conjunto de estos lazos de regulación y las estructuras de control constituyen el sistema de control del circuito de molienda; sistema que responde en forma precisa, rápida y estable frente a cualquier perturbación o cambio en las variables controladas.

2.3.5 Funcionamiento del sistema de control

El funcionamiento del sistema es como sigue: Ante

cualquier cambio en las características del mineral de alimentación así como, si se incrementa la dureza del mineral y permaneciendo constante el agua añadida al tanque sumidero, la carga circulante, la densidad de alimentación al ciclón y la proporción de producto grueso en el rebose del ciclón, se incrementarán firmemente. El control del retorno al caudal promedió de mineral de alimentación para compensar los cambios tendrá un resultado aceptable y firme en el comportamiento del circuito, aunque durante un corto período de tiempo se producirá un incremento en la granulometría.

El sistema de control responde bien a intervalos cortos, presentando características estáticas y dinámicas aceptables. En la figura 15 se muestra la naturaleza de la respuesta para el sistema de control basado en la utilización de una bomba de velocidad variable.

■ Flowsheet del proceso

En la Figura 16 se muestra el flowsheet general del proceso-instrumentación-sistema de control del circuito de molienda.

2.4. Configuración del sistema de control propuesto

El sistema de control que se propone, con la finalidad de obtener en tiempo real, información de los diferentes sensores y actuar sobre los elementos de control final a fin de establecer el control y automatismo del proceso de molienda, comprende básicamente de los siguientes subsistemas:

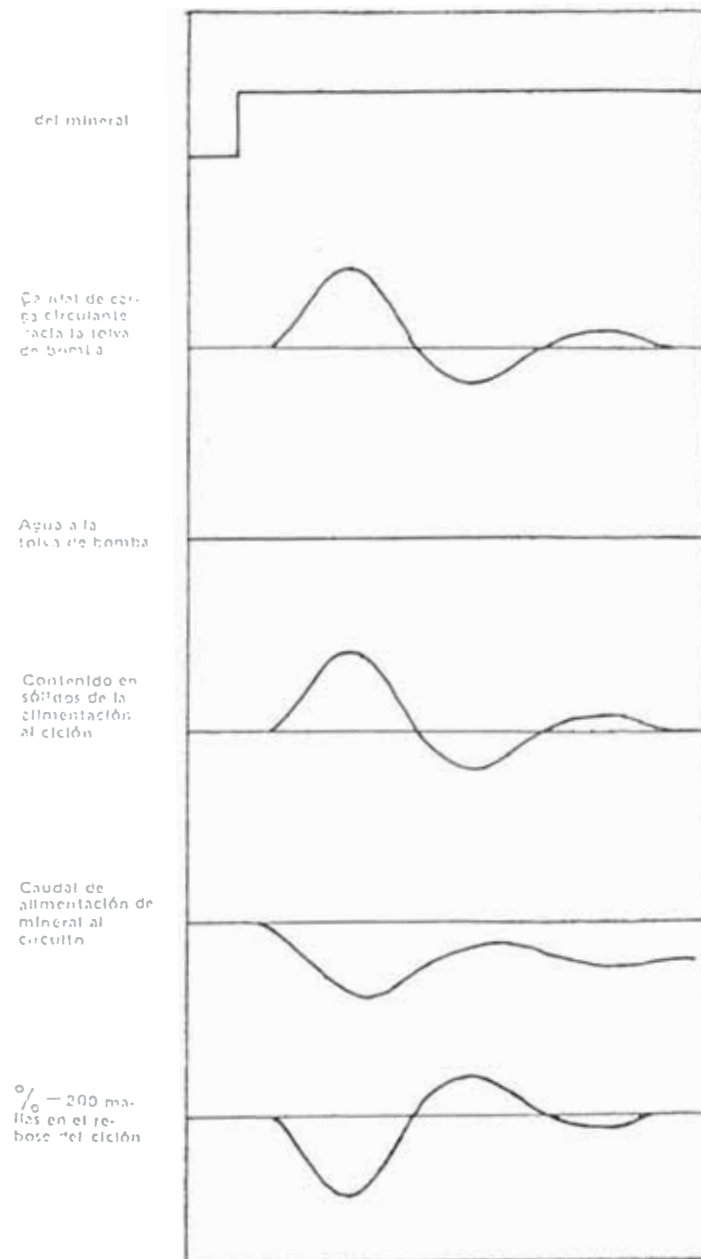


Figura 15. Comportamiento Dinámico del Sistema de Control Basado en Bomba de Velocidad Variable

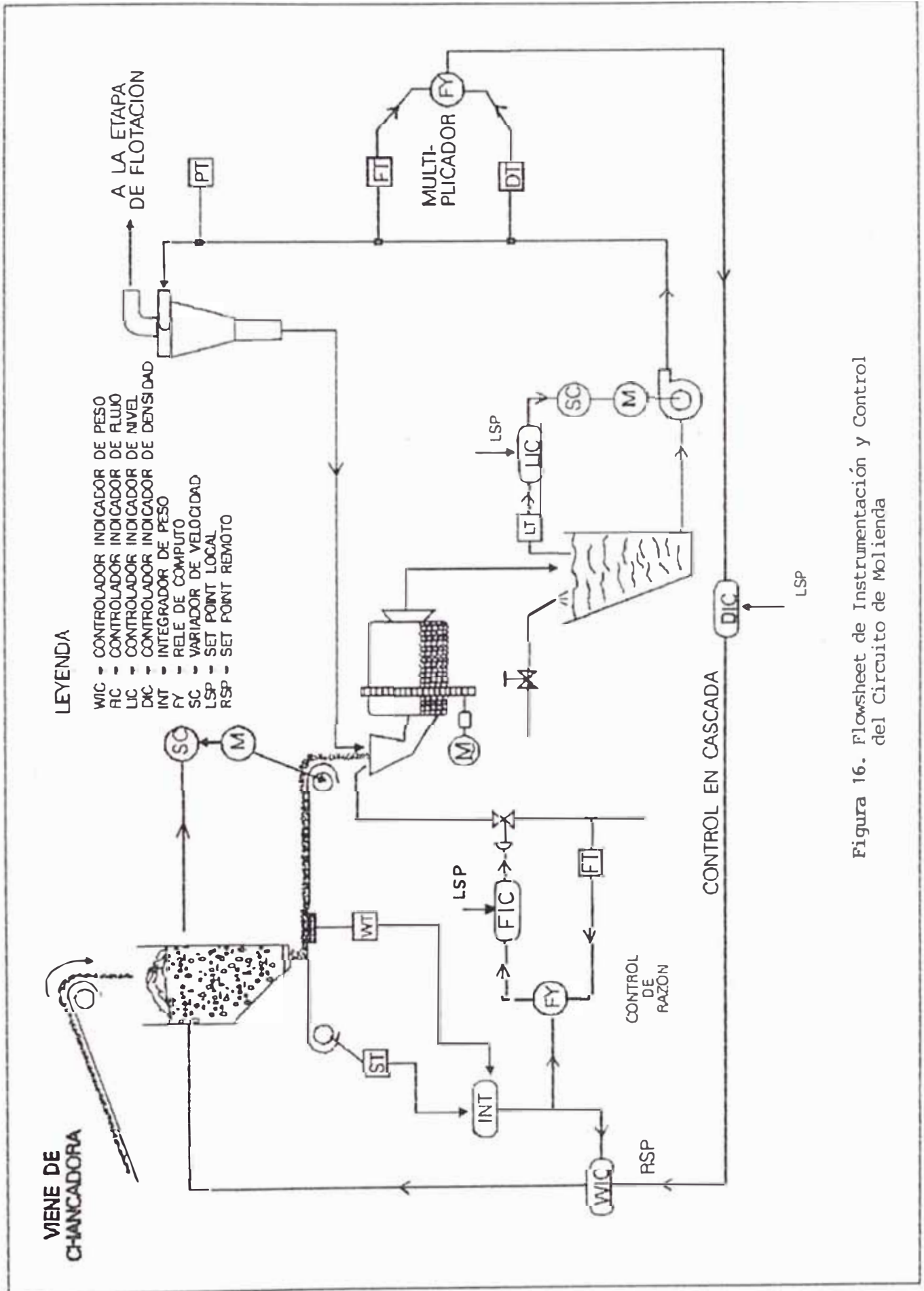


Figura 16. Flowsheet de Instrumentación y Control del Circuito de Molienda

I) Subsistema de campo. En la Figura 16 se muestra el diagrama de instrumentación en el que se presentan todos los instrumentos y equipos de terreno considerados en la implementación. Se reconocen los componentes:

a) Subsistema de medición, compuesto de sensores transmisores:

- Densímetro nuclear, para medir la densidad de pulpa.
- Flujómetro magnético, para agua de alimentación al molino.
- Flujómetro magnético, para pulpa de alimentación al ciclón.
- Pesómetro, para mineral en fajas.
- Medidor de nivel ultrasónico, para pulpa en tanque sumidero.

Medidor de presión de pulpa a la entrada del ciclón.

b) Subsistema de acción, compuesto de actuadores:

Válvula de control de 3" para agua de alimentación al molino.

- Variador de velocidad de estado sólido para regular la velocidad del motor de continua de la faja de transporte.
- Variador de velocidad de estado sólido para regular la velocidad del motor de alterna de la bomba.

c) Subsistema de transmisión de señales: cables, caja de conexionado y canalización.

II) Subsistema Central de Control

Subsistema digital, se ha considerado utilizar para el

control, CONTROLADORES DIGITALES DE LAZO marca FOXBORO modelo 760, el cual provee muy buena integridad de lazo y seguridad a las operaciones. Este controlador es de tipo monolazo, es decir, implementa un lazo de regulación PID. Maneja señales analógicas de tipo T/C, RTD, mV y 4 a 20mA y discretas (ON/OFF).

Presenta un display digital para mostrar los valores del Set point, variable de medición y variable manipulada. La configuración y operación del controlador se realiza a través de un teclado digital frontal incorporado en el mismo equipo.

Para implementar el sistema de control se requiere de 4 controladores que se instalan en un papel de mando.

Estos equipos ofrecen una opción de comunicación serial RS-485 que mediante un par de cables trenzado con apantallamiento se puede interconectar de forma tipo BUS 32 controladores 760 a un sistema inteligente de control y supervisión (p.eje. una PC-compatible, previamente instalado el software de control). Desde este sistema es posible configurar y operar a los controladores. Además, ofrece las funciones de monitorear las variables del proceso a través de pantallas mímicas en PC, muestreo de alarmas, trending, reportes estadísticos, impresión, etc.

En este presente trabajo no se tratará sobre la red de comunicación y sistema inteligente. Por lo tanto, los controladores realizarán sus funciones independientemente de acuerdo a la configuración de control diseñada.

2.5 Identificación de variables del proceso

De la figura 16 se deducen las siguientes variables analógicas distribuidas de la siguiente forma:

IDENTIFICACIÓN VARIABLE	E/S	TIPO VARIABLE	INFLUENCIA
Dureza del Mineral	E	Perturbación	-Influye en la carga del molino -En el producto
Granulometría en el mineral de la alimentación	E	Perturbación	-En la obtención del producto, en relación a la carga de Bolas
Flujo másico de mineral alimentado	S	Variable Manipulada	-Producto -Carga de bolas
Flujo de agua entregada al Molino	S	Variable Manipulada	-Producto -Carga de bolas
Nivel de pulpa en el tanque	E	Variable Controlada	-Cabeza de la bomba -Alimentación al hidrociclón
Flujo de pulpa hacia el hidrociclón	S	Variable Manipulada	-Alimentación al hidrociclón -Eficiencia del hidrociclón
Densidad de pulpa de alimentación al hidrociclón	E	Variable Controlada	-Separación del hidrociclón -Producto
Presión de pulpa a la entrada al hidrociclón	E	Variable indicadora de Estado de operación	-Separación del hidrociclón

2.6 Selección del controlador de lazo

Los controladores dedicados o de lazo son sistemas de control de procesos con tecnología digital, es decir, basados en un microordenador, con un funcionamiento autónomo y ajustable in situ, cerca del proceso.

Ellos calculan la señal de mando (variable manipulable) sobre el proceso a partir de un tratamiento matemático elemental de la señal de error de regulación, que es la diferencia entre el punto de consigna y la respuesta (variable de salida, medida con un sensor) del proceso.

Generalmente, el tratamiento matemático del controlador consiste en la amplificación del error de regulación (acción proporcional), la integral a lo largo del tiempo (acción integral) y la derivada temporal del mismo (acción Derivativa). Las tres acciones sumadas dan lugar al conocido controlador PID.

Las principales características que condujeron a elegir el uso del controlador de lazo por otro sistema como por ejemplo el PLC. fueron:

- Permiten el control de uno o varios lazos de regulación, la precisión y seguridad en el control de un lazo es mayor que en los PLC.
- Están diseñados para la regulación de una o varias variables analógicas, mientras que los PLC fundamentalmente miden y controlan variables lógicas.
- Los controladores autónomos permiten ajustar fácilmente las acciones de regulación, incluso de

forma automática en muchos modelos, mientras que los PLC suelen necesitar un módulo y un software opcional.

- Permiten programar otras estructuras de control: En cascada, anticipativo, de relación, etc. que no son habituales en los autómatas programables.
- Permiten cálculo de funciones auxiliares: extracción de raíz cuadrada, compensación de las no linealidades del sensor, programación de la consigna por tramos para procesos en batch, etc.
- Posibilidad de realizar un ajuste automático de los parámetros de control antes de operar (auto-sintonía) o en operación (control adaptivo).

1) Aspectos a considerar para la selección de un controlador de lazo

Para la selección de un controlador dedicado es preciso definir de antemano las necesidades funcionales de la aplicación particular, fijando unas especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los posibles equipos seleccionables.

a) Aspectos cualitativos

Entre los aspectos a considerar se encuentran:

- Aplicabilidad.- Campo de aplicación; el controlador Foxboro 760 está preparado para actuar sobre cualquier variable de un proceso, esto es posible por su espectro en el manejo de cualquier tipo de variable de entrada y por las bondades sofisticadas de su sistema operativo.

- **Compatibilidad.**- Similitud con otros equipos, que permite una fácil interconexión y comunicación.
- **Modularidad y extensibilidad.**- Posibilidad de configurar el equipo a la medida de la aplicación.
- **Fiabilidad.**

b) Aspectos técnicos

Entre los cuales se destacan:

- **Números de entradas y salidas analógicas y digitales.**
- **Tipo de señales de entrada-salida.**
- **Estrategia de Regulación.**- Elección del tipo de estrategia de regulación como, regulación todo o nada, proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-integral-derivativa (PID). Para conseguir que el proceso controlado cumpla con las prestaciones deseadas de precisión, rapidez de respuesta y estabilidad.
- **Estructuras de control.**- En la mayoría de los controladores se utilizan básicamente una estructura de control en lazo cerrado o realimentado (feedback). Existen otras estructuras que permiten disminuir eficazmente el efecto de las perturbaciones en el proceso, aumenta la rapidez de respuesta, etc. Algunos de estas estructuras de control son: control en cascada, adelanto, (feedforward), relación (ratio), selectivo (override) o multivariable.
- **Ajuste de parámetros.**- Elección del tipo de ajuste o sintonía de los parámetros del controlador para que el

proceso controlado responda adecuadamente a los cambios de consigna y de carga o perturbación. Entre los tipos de ajuste existen el llamado AUTO-SINTONIA (AUTO-TUNING), el AUTO-ADAPTATIVO (AUTO-ADAPTATIVE), EXACT.

- Período de muestreo (Sampling time).- Selección adecuada del tiempo de muestro para evitar grandes problemas de control. La mayoría de los controladores digitales existentes cumplen prácticamente con la totalidad de los períodos de muestreo recomendadas para las variables muestreadas.
- Tipo de comunicación.- Elección del medio para comunicarse con otros controladores o con un ordenador central que coordine todos los lazos de regulación. Se dispone de un medio de comunicación digital serie, los estándares RS232, RS422 ó RS485.

CAPITULO III SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID

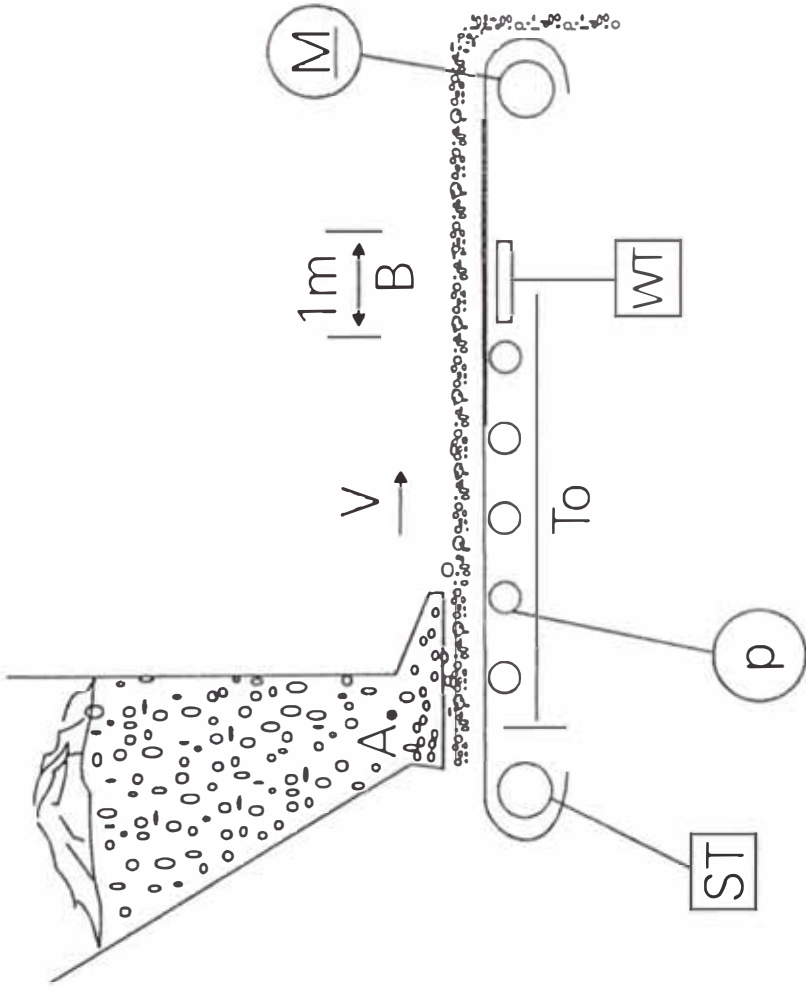
3.1 Modelo matemático del proceso

En esta sección se abordará sobre el conocimiento de las principales características dinámicas y estáticas, diagrama de bloques y ecuación o modelo matemático de las siguientes partes del proceso, que a continuación se describen.

3.1.1 Alimentación de mineral al molino

De la figura 16 se sustrae esta parte del proceso para su análisis y deducción del modelo matemático, empezando por una descripción del funcionamiento como sigue, ver figura 17.

Este proceso se inicia con la descarga continua de material de la tolva sobre la faja de transporte que lleva el material del punto A hacia el punto C para alimentar al molino. El accionamiento de la faja es mediante la utilización de un motor de corriente continua (DC) sobre el cual se realiza una regulación de la velocidad, con el propósito de regular el flujo de material a la salida de la faja. El peso del material se mide a través de una estructura mecánica de polines, que transmiten el peso (fuerza) a una celda de carga, quien transduce esta señal física a una señal electrónica análoga en milivoltios (mv). El sensor de peso, mide el peso de material distribuido a



DONDE:

- WT = Transmisor de peso lineal en faja
- ST = Transmisor de velocidad de faja
- L = Distancia de medición del peso con respecto al punto de alimentación
- To = Tiempo muerto
- P = Polines de sujeción y precisión en la medición del peso.
- A = Punto de alimentación
- B = Punto de medición

Figura.17 Sistema de control de una faja transportadora de material con tiempo muerto (Dead time)

lo largo de 1 m de longitud de faja, es decir, entrega una señal de peso por unidad de longitud (TM/m).

Además, se mide la velocidad lineal de la faja a través de un dispositivo denominado Encoder (unidad tacométrica) que procesa el número de vueltas de uno de los polines principales de accionamiento y los transduce en una cantidad de pulsos eléctricos. La señal de peso por unidad de longitud y la señal de pulsos eléctricos equivalentes a la velocidad de la faja son acondicionadas e ingresadas a un integrador/controlador que las multiplica para obtener la señal equivalente a TM/Hr.

El proceso así descrito, presenta un parámetro inherente que lo caracteriza y este es conocido como el TIEMPO MUERTO (T_{DT}) o RETARDO DE TRANSPORTE, es decir, este viene a ser el intervalo entre el momento en que el disturbio entra al proceso (punto A) y el tiempo en que el medidor de peso (WT) empieza a responder. La figura 18 muestra la respuesta del proceso frente a una excitación de tipo escalón en la alimentación punto A.

De la figura, se distingue que la curva 1 corresponde a una respuesta de la faja tipo acción proporcional con tiempo muerto.

En la curva 2 el tiempo muerto es combinado con un retardo de primer orden.

Para sistemas controlados con tiempo muerto T_{DT} y un retardo de primer orden, estos parámetros permiten realizar una estimación para determinar si el sistema puede ser

controlado. La siguiente relación es mostrada:

$$\frac{\text{Constante de tiempo de retardo}}{\text{Tiempo muerto}} = \frac{\tau}{T_{DT}}$$

Por lo tanto:

Si $\frac{\tau}{T_{DT}} > 5$ el sistema es fácil de ser controlado

La presencia de una cantidad significativa de tiempo muerto en el proceso, es la peor cosa que le puede ocurrir al sistema de control afectando severamente su funcionamiento.

El tiempo muerto se puede calcular a partir de la relación:

$$T_{DT} = \frac{L}{Rw}$$

Donde:

T_{DT} = Tiempo muerto, seg.

L = Longitud de faja, distancia del punto de alimentación al punto de medición, m.

R = Radio del Polin de accionamiento, m

w = Velocidad angular del eje del motor, 1/seg.

De esta expresión, se aprecia que T_{DT} depende de algunas propiedades físicas y características operativas del proceso. Si cambia cualquier condición del proceso, esa variación se puede reflejar en un cambio de T_{DT} .

Un esquema funcional del proceso se muestra en la figura 19.

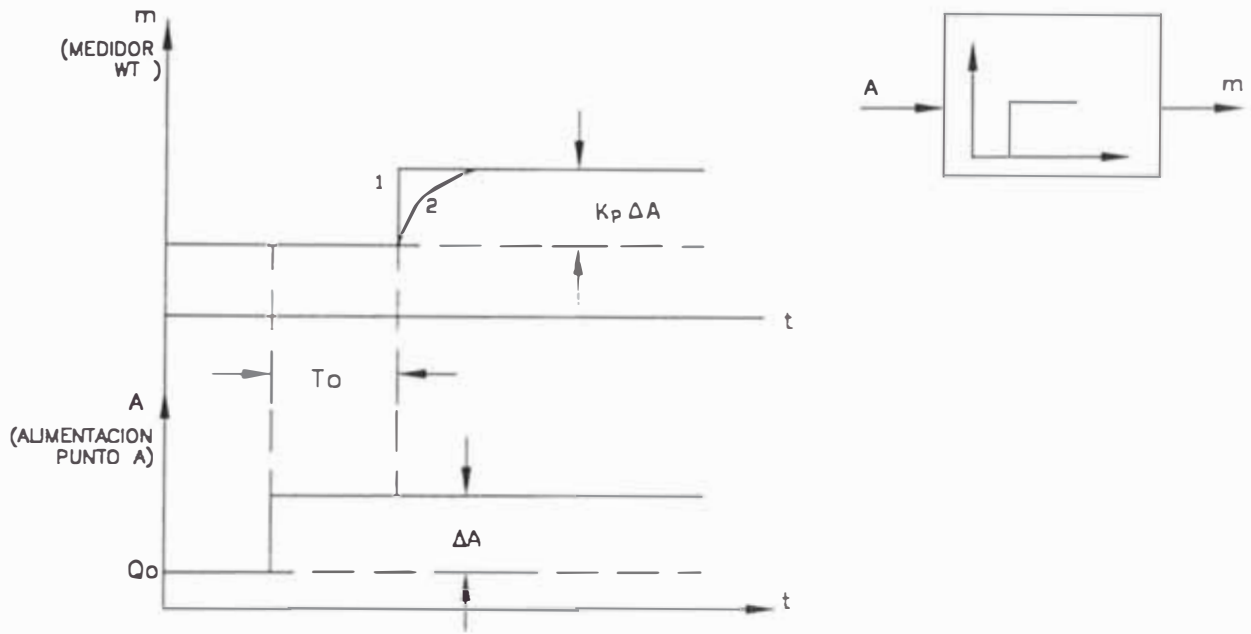


Figura 18. Respuesta del Medidor de Peso y Diagrama de Bloque de un Elemento del Tiempo Muerto

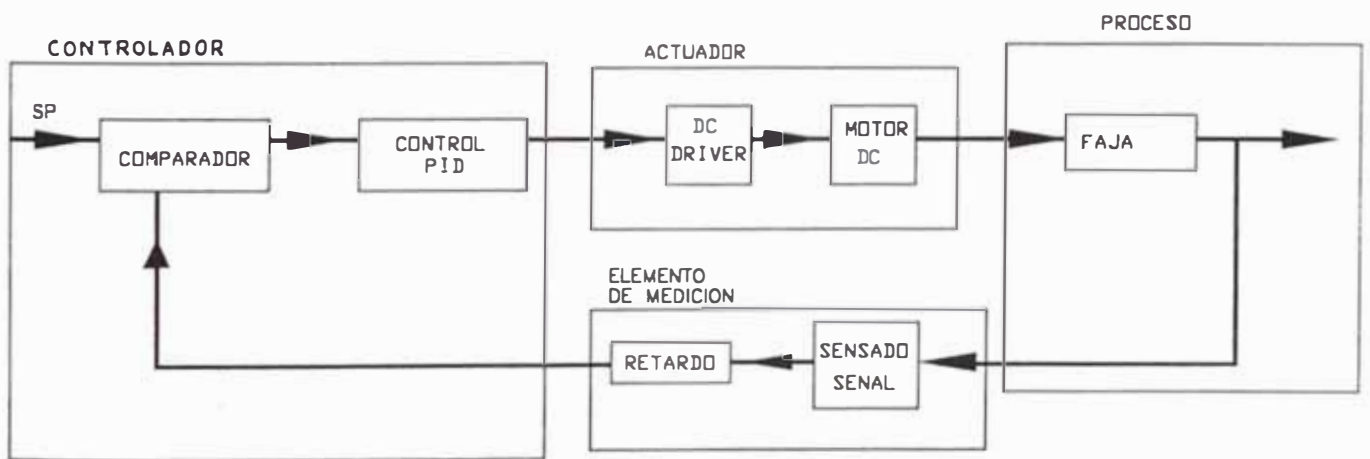


Figura 19. Esquema Funcional del Proceso de Alimentacion de Mineral al Molino.

Del esquema se puede obtener el modelo matemático o diagrama de control del proceso. Este se muestra en la figura 20.

Tomando en cuenta la figura 20, se tiene que las funciones de transferencias de los bloques es:

■ Controlador (Gc);

$$G_c(s) = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Donde: K_p , T_d y T_i los parámetros del controlador que se ajustarán a los valores adecuados para permitir una eficiente acción de control.

■ Driver DC (Gd);

$$G_d(s) = \frac{K_d}{\tau_d s + 1}$$

Esta expresión relaciona la tensión (V) de armadura del motor a la corriente (mA) procedente del controlador.

Con la utilización de este equipo permite manipular una velocidad de faja de hasta 14.7 m/min. que corresponde a una capacidad de 140.0 TM/H.

■ Motor (Gm);

$$G_m(s) = \frac{w(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}$$

El motor DC es controlado por regulación de la tensión en la armadura.

■ Faja (Gf);

$$G_f(s) = \frac{V_f(s)}{W(s)} = K_f$$

La expresión de G_f demuestra que es una constante de faja, es un factor de conversión de velocidad angular (RPM) del motor en velocidad lineal de la faja (m/seg)

■ Densidad de peso (G_{dp});

$$G_{dp}(s) = K_{dp}$$

K_{dp} es un dato del proceso y representa la densidad lineal de peso sobre la faja, está dado en Kg/m o TM/m.

■ Retardo (G_r);

$$G_r = e^{-T_{DT}S}$$

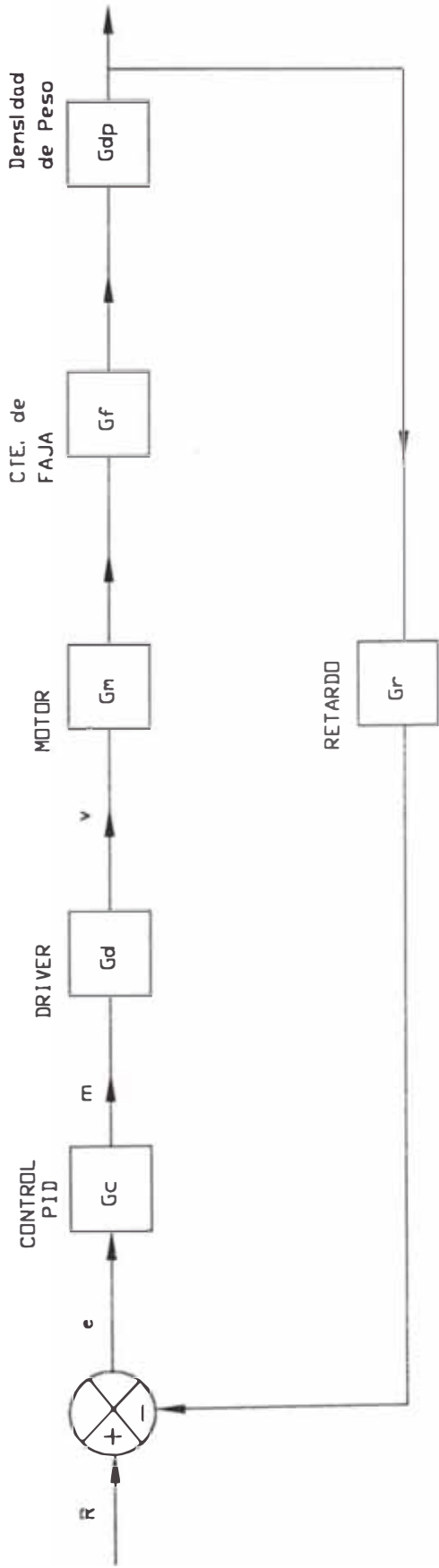
Ahora bien, el diagrama de bloques de la figura 20 queda reducido al siguiente diagrama de la figura 21 que representa el diagrama de control ó modelo matemático del sistema en lazo cerrado. De donde, la función de transferencia del proceso es:

$$G_p = G_m \cdot G_f \cdot G_{dp} \cdot G_r = \frac{K_m \cdot K_f \cdot K_{dp} \cdot e^{-T_{DT}S}}{\tau_s + 1}$$

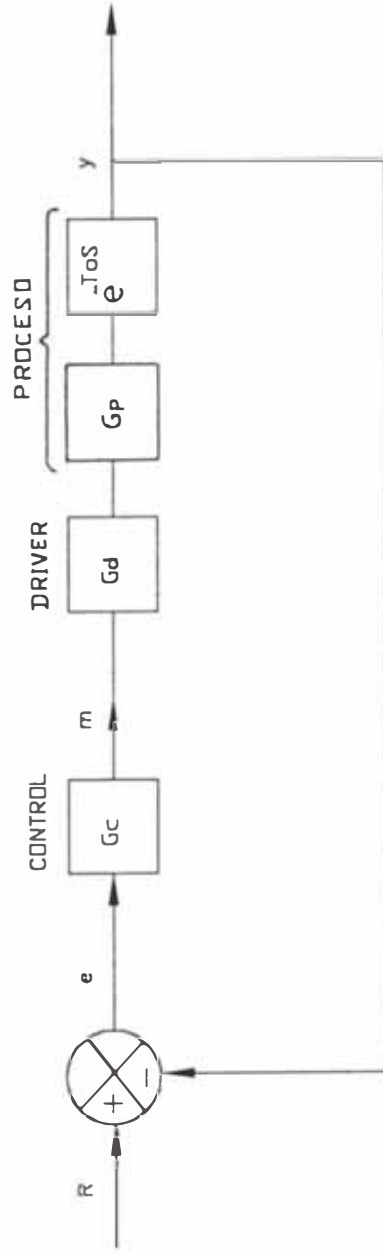
haciendo $K_m \cdot K_f \cdot K_{dp} = K$

Resulta que:

$$G_p = \frac{K_p e^{-T_{DT}S}}{\tau_p S + 1}$$



Figuro 20. Diagramo de Bloques de Proceso



Figuro 21. Diagramo de Control Simplificado del Proceso

Donde los parámetros del proceso son:

$$K_p = 2-20, \text{ típico } 15$$

$$\tau_p = 30-120 \text{ seg. típico } 60 \text{ seg.}$$

$$T_{DT} = 5-20 \text{ seg. típico } 10 \text{ seg.}$$

3.1.2 Alimentación de agua al molino

En esta parte, se analizará el lazo de control del flujo de agua entrante al molino. Para esto se presenta un esquema funcional del lazo, ver figura 22. En donde el proceso está constituido por una Tubería conduciendo agua hacia la entrada del Molino. Los procesos de flujos líquidos son muy RAPIDOS, para el caso de una tubería conduciendo agua, presenta la siguiente función de transferencia:

$$Gp = \frac{K_p}{\tau_p S + 1}$$

Donde los parámetros típicos de proceso son:

$$K_p = 0.886, \tau_p = 0.25 \text{ seg.}, T_{DT} \approx 0 \text{ seg.}$$

Siendo:

$$\tau_p = \frac{LF}{2gA\Delta p}$$

Donde:

L = longitud de tubería, en pie

F = flujo, en pie³/seg.

= densidad, lb/pie³

g = gravedad, pie/seg²

A = sección transversal de la tubería, pie²

Δp= caída de presión, lb/pie²

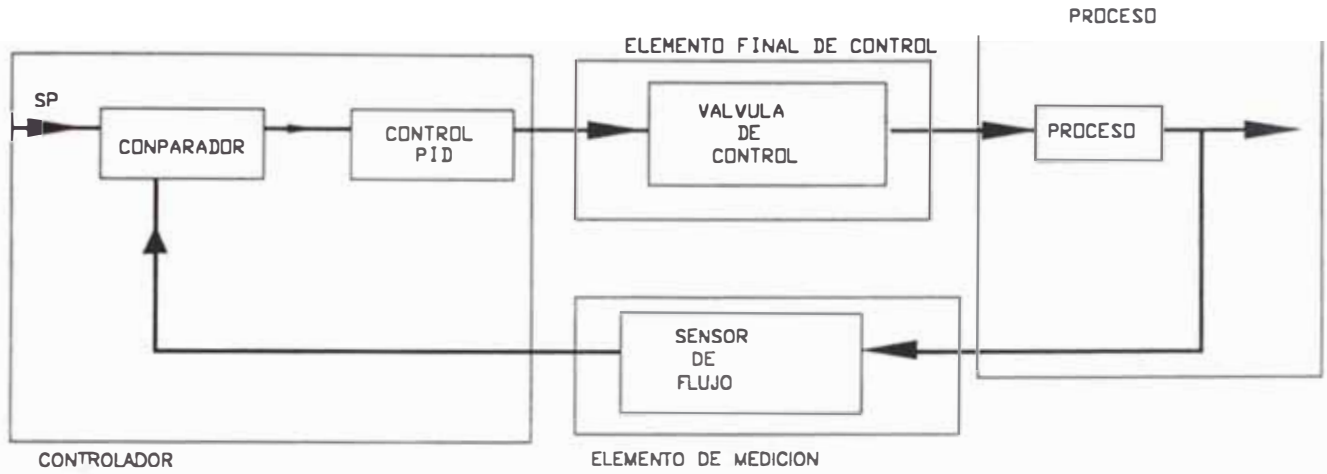


Figura 22. Diagrama Funcional del Lazo de Control de Flujo de Agua

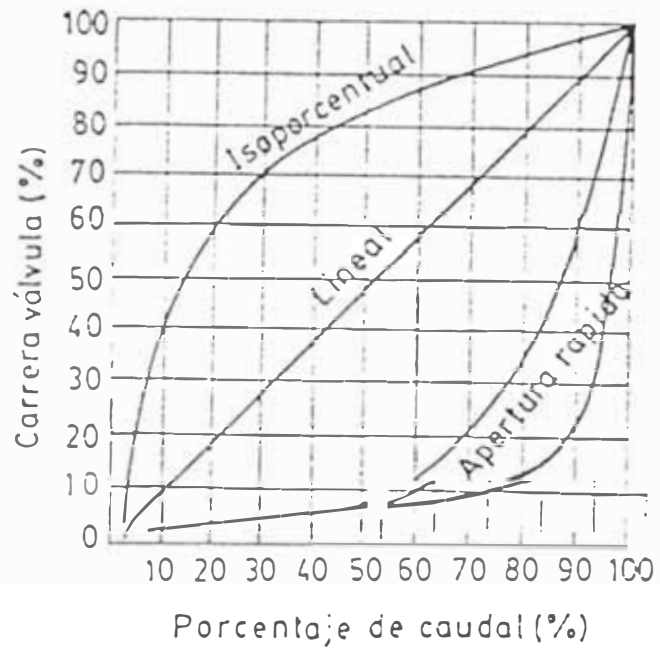


Figura 23. Curva Característica de Flujo de una Válvula de Control

del flujo. Este dispositivo ofrece una medida de CARACTERISTICA LINEAL. Siendo su función de transferencia:

$$G_m = \frac{K_m}{\tau_m S + 1}$$

Esta expresión relaciona la señal de salida (4 a 20 mA) del medidor al flujo a través de éste.

Finalmente, el modo de control a establecerse en el controlador es el tipo PROPORCIONAL + INTEGRAL (PI). Siendo la función de transferencia del controlador:

$$G_c = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Donde K_c y T_i son los parámetros del controlador a determinarse en función de los parámetros del proceso.

En la figura 25 se presenta el diagrama de bloques del lazo de control del flujo de agua.

Por consiguiente, la función de transferencia de lazo cerrado es:

$$G_{cl}(s) = \frac{q(s)}{q_{sp}(s)} \rightarrow G_{cl}(s) = \frac{G_c G_v G_p}{1 + G_c G_v G_m G_p}$$

3.1.3 Control del nivel de pulpa en el tanque sumidero

El objetivo es controlar el nivel de pulpa en el tanque, mediante el accionamiento regulatorio de la velocidad de la bomba.

En la figura 26 se muestra el proceso a controlar; A continuación se deduce el modelo matemático del mismo.

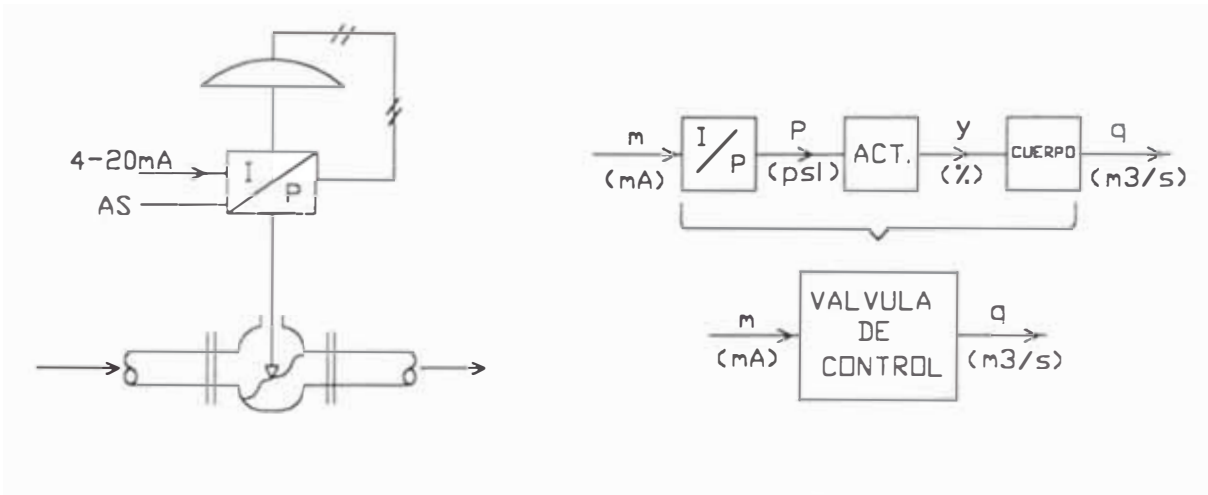


Figura 24. Diagrama de Bloques de una Válvula de Control

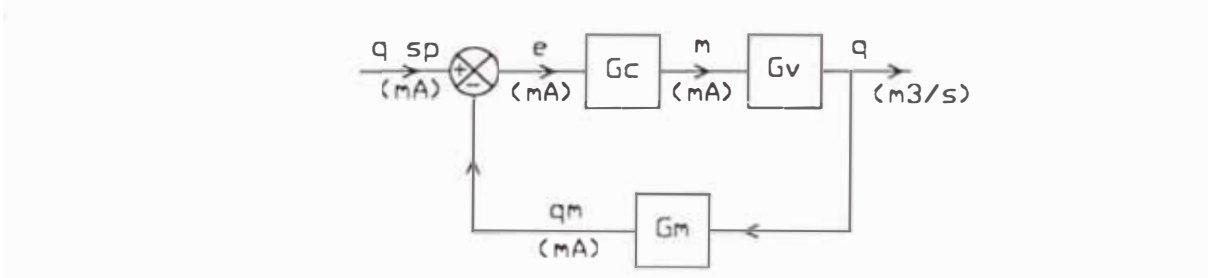


Figura 25. Diagrama de Bloques del Lazo de Control del Flujo de Agua

De la figura anterior se tiene que, el flujo de salida de la bomba es:

$$q_o = \frac{T\eta w}{\Delta P} \quad (3.1)$$

donde :

T = torque aplicado en el eje de la bomba.

η = eficiencia de la bomba

w = velocidad del rodete de la bomba.

ΔP = caída de presión en la bomba.

Sabiendo que: $\Delta P = P_3 - P_2$, pero $P_2 = P_o + \rho gh(t)$

$$\text{quedando} \quad P = P_3 - P_o - \rho gh \quad (3.2)$$

reemplazando ec. (3.2) en (3.1) se tiene que

$$q_o = \frac{T \eta w}{P_3 - P_o - \rho gh} \quad (3.3)$$

Se observa de la expresión (3.3) que el flujo de salida q_o es un función de las variables velocidad de la bomba "w" y altura o nivel "h" de pulpa en el tanque.

Por lo tanto, es una expresión no lineal que requiere una linealización; utilizando la serie de Taylor para linealizar una función de dos variables se obtiene que:

$$q_o(t) \approx \bar{q}_o + C_1 [w(t) - \bar{w}] + C_2 [h(t) - \bar{h}] \quad (3.4)$$

Donde las constantes:

$$C_1 = \frac{T \eta}{P_3 - P_o - \rho g \bar{h}} , \quad C_2 = \frac{T \eta \bar{w} \rho g}{P_3 - P_o - \rho g \bar{h}}$$

Por otro lado, del tanque, por balance de materia en

estado dinámico se encuentra que:

$$q_i(t) - q_o(t) = \frac{A dh(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Reemplazando (3.4) en (3.5), tenemos:

$$\begin{aligned} q_i(t) - \bar{q}_o - C_1 [W(t) - \bar{W}] - C_2 [h(t) - \bar{h}] \\ = \frac{A dh(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\text{En el estado estacionario: } \bar{q}_i - \bar{q}_o = 0 \quad (3.7)$$

Restando miembro a miembro con (3.6):

$$\begin{aligned} (q_i(t) - \bar{q}_i) - C_1 (W(t) - \bar{W}) - C_2 (h(t) - \bar{h}) \\ = \frac{A d(h(t) - \bar{h})}{dt} \end{aligned}$$

Utilizando variables de desviación:

$$q_i(t) - \bar{q}_i = Q_i(t)$$

$$w(t) - \bar{w} = W(t)$$

$$h(t) - \bar{h} = H(t)$$

Luego:

$$Q_i(t) - C_1 W(t) - C_2 H(t) = \frac{A dH(t)}{dt}$$

Reordenando queda:

$$\tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) = K_1 Q_i(t) - K_2 W(t) \quad (3.8)$$

Donde:

$$\tau = A/C_2 \rightarrow (\text{seg})$$

$$K_1 = \frac{1}{C_2} \rightarrow (\text{seg}/\text{m}^2)$$

$$K_2 = \frac{C_1}{C_2} \rightarrow (\text{m}.\text{seg})$$

Aplicando transformada de Laplace a (3.8)

$$\tau sH(s) + H(s) = K_1 Q_i(s) - K_2 W(s)$$

Por consiguiente:

$$H(s) = \frac{K_1}{\tau s + 1} Q_i(s) - \frac{K_2}{\tau s + 1} W(s) \quad (3.9)$$

A partir de la cual se obtienen las dos funciones de transferencia.

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_1}{\tau s + 1} \quad (3.10a)$$

$$\frac{H(s)}{W(s)} = -\frac{K_2}{\tau s + 1} \quad (3.10b)$$

De las expresiones (3.10a) y (3.10b):

K_1 es la ganancia o sensibilidad de $Q_i(t)$, en relación a $H(t)$, lo cual da la cantidad de nivel en el tanque por unidad de cambio de flujo de entrada al tanque; K_2 proporciona la cantidad de cambio de nivel en el tanque por unidad de cambio en la velocidad de la bomba. Notar que el signo de la ganancia es negativo, lo cual indica que,

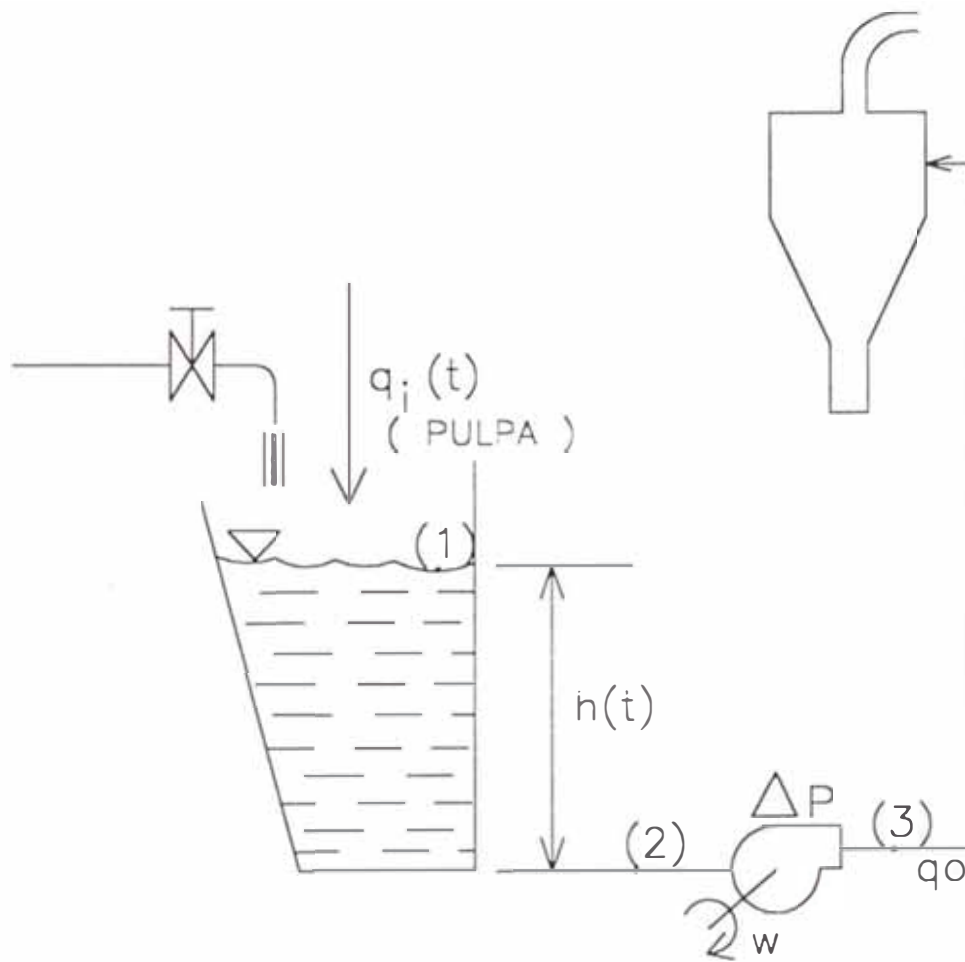


Figura 26. Esquema del Proceso de Nivel de Pulpa en el Tanque

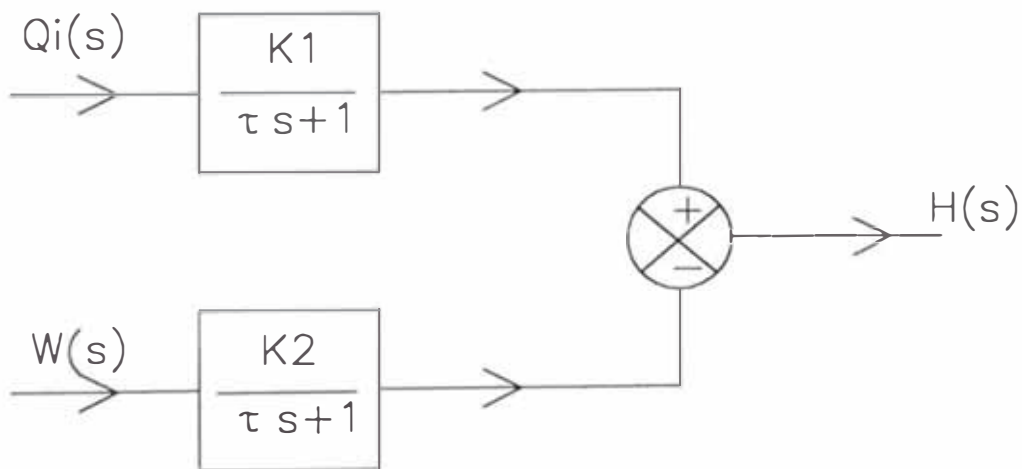


Figura 27. Diagrama de Bloques del Proceso Tanque + Bomba

conforme la velocidad de la bomba cambia positivamente y sube la misma, el nivel cambia negativamente o cae, lo cual tiene sentido físicamente.

En la figura 27 se muestra el diagrama de bloques de la función de transferencia (3.9).

Luego, se elige trabajar con la expresión (3.10b) porque el nivel del tanque se controla mediante la velocidad de la bomba, en base a esto, se establece un diagrama funcional del respectivo lazo de control del nivel en el tanque. Ver figura 28.

Del esquema funcional de la figura 28 se deduce el diagrama de bloques o control que se muestra en la figura 29, donde las funciones de transferencias son las siguientes:

■ Controlador (G_c); $G_c(s) = K_c$

El modo de control es del tipo proporcional (P).

■ Variador de velocidad (G_{sc});

$$G_{sc}(s) = \frac{K_{sc}}{\tau_{sc}S + 1}$$

Esta expresión relaciona la salida del driver (frecuencia del voltaje aplicado al motor) respecto a su entrada (señal de 4 a 20 mA) procedente del controlador.

En la mayoría de los casos, con este equipo se logra que la bomba genere un flujo de pulpa en la tubería (ϕ 4") con velocidades de 0.96-1.54 m/seg. (20-200 GPM).

■ Motor AC (G_m);

$$G_m(s) = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}$$

El motor de inducción se modela con un sólo polo dominante con ganancia K_m y constante mecánica del motor y la carga con τ_m .

Esta función relaciona la velocidad (RPM) de salida en el eje del rotor y la frecuencia (H_z) del voltaje de entrada al motor.

■ Proceso tanque-bomba (G_{tb}); como ya se ha deducido anteriormente, la función del proceso es:

$$G_{tb}(s) = \frac{K_{tb}}{\tau_{tb} s + 1}$$

Siendo los parámetros del proceso:

$$K_2 = 0,1 - 10, \text{ típico } 0.5$$

$$\tau = 0.05 - 2 \text{ seg. típico } 2$$

$$T_{DT} \approx 0 \text{ seg.}$$

Esta expresión relaciona el nivel (m.) en el tanque y la velocidad (RPM) de giro de la bomba.

■ Sensor-transmisor (G_{st});

$$G_{st}(s) = \frac{K_{st}}{\tau_{st} s + 1}$$

El diagrama de bloque de la figura 29 se puede simplificar al mostrado en la figura 30 en donde la

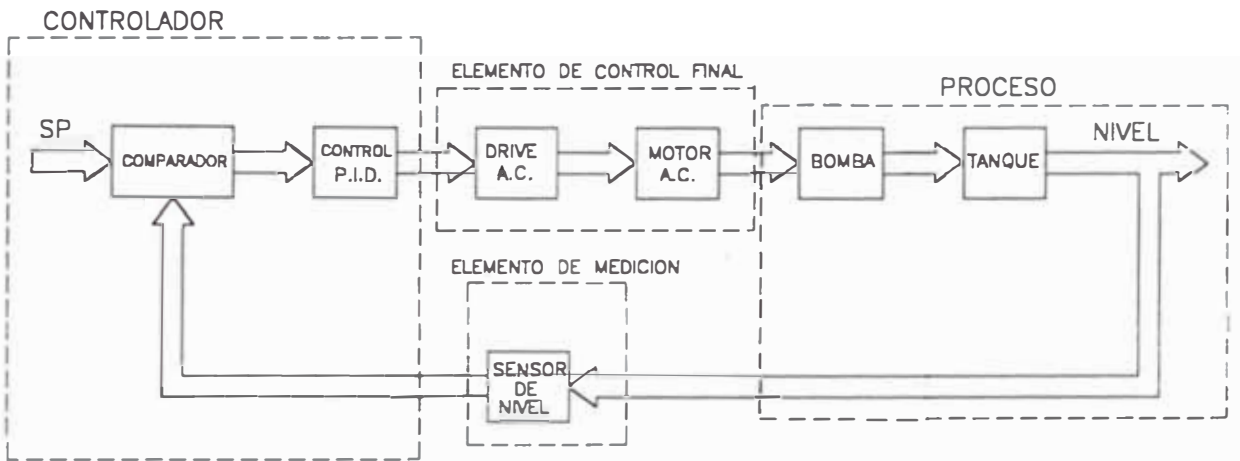


Figura. 28. Diagrama Funcional del Lazo de Control del Nivel en el Tanque

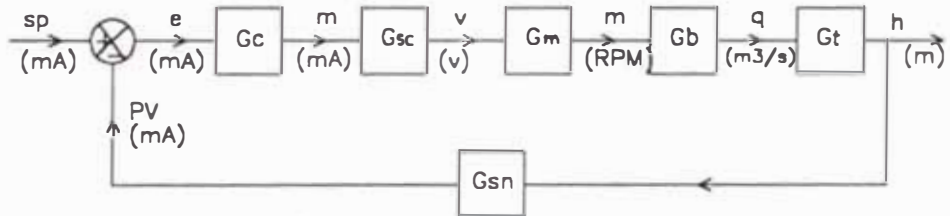


Figura. 29. Diagrama de Bloques

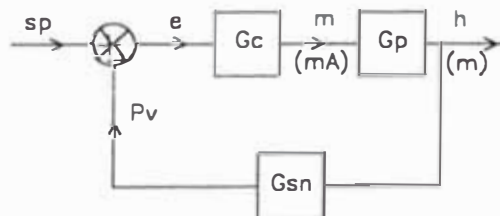


Figura 30. Diagrama de Bloques Simplificado

ganancia del variador de velocidad y la función de transferencia del motor son absorbidas por el proceso (tanque+bomba).

Del diagrama simplificado, se hace:

$$G_p = G_{sc} \cdot G_m \cdot G_{tb}$$

Por lo tanto, la función de transferencia del lazo cerrado del sistema es:

$$G_{cl}(s) = \frac{H(s)}{W(s)} \rightarrow G_{cl}(s) = \frac{G_c G_{sc} G_m G_{tb}}{1 + G_c G_{sc} G_m G_{tb} G_{st}}$$

3.2 Método de sintonización

Para que el acoplamiento de un controlador industrial se adecuadamente factible con el resto de los elementos del lazo de control es decir, proceso + transmisor + elemento de control final, previamente es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámica del sistema controlado, en otras palabras es conocer la "personalidad del proceso".

La adaptación del controlador viene a consistir en el ajuste o sintonía para encontrar los valores de los parámetros P, I y D del controlador que posibiliten una correcta operación de manera eficiente con el propósito que la respuesta del sistema en lazo cerrado posea las características deseadas.

Existen diversos criterios ó métodos para realizar la

Sintonización de los controladores, presentando cada uno de ellos sus ventajas y desventajas. El método de sintonía que se utiliza en el presente trabajo es el método de la curva de reacción del proceso, que a continuación se describe.

3.2.1 Método de la curva de reacción del proceso

Este método fue propuesto por Ziegler-Nichols y permite estimar las características dinámicas del proceso a través de la respuesta a determinada señal. Esta estimación se realiza en lazo abierto, es decir, con el controlador en la posición "manual".

La gran ventaja de este método reside en que sólo una perturbación es introducida en el proceso. En realidad el controlador no está insertado en la malla cuando el proceso es perturbado. El método permite conocer la respuesta de reacción exclusiva del proceso sin la actuación del controlador. A partir de los datos obtenidos para "caracterizar" el proceso, son dados los parámetros para ajustes del controlador. En general se provoca un pulso (escalón unitario) en la salida del controlador y se registra la curva de reacción del proceso. Ver figura 31.

La mayoría de las curvas de reacción del proceso pueden generalmente ser aproximadas por la composición de una curva de sistema de primer orden más un atraso puro. La aproximación por sistema de primer orden en general resulta suficientemente exacta para efectos prácticos

El modelo de primer orden más tiempo muerto es en el que se basan la mayoría de las fórmulas de ajuste de

controladores. La función de transferencia de este modelo es:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ts}}{\tau s + 1}$$

En este modelo el proceso se caracteriza mediante tres parámetros: La ganancia K , el tiempo muerto T y la constante de tiempo τ .

Para determinar la curva de reacción del proceso (ver figura 31) se recomienda los siguientes pasos:

1. Poner el controlador en manual.
2. Ajustar manualmente la salida del controlador al valor al cual estaba operando en automático.
3. Permitir que el control alcance un estado estacionario.
4. Con el controlador aun en manual provocar un cambio instantáneo en la salida del controlador.
5. Registrar la respuesta de la variable controlada (salida del proceso).

La figura 32 muestra la curva de respuesta de reacción del proceso obtenida siguiendo los pasos anteriores.

Para encontrar los parámetros que definen la característica del proceso, en el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una tangente lo más aproximada posible y se miden los valores K , τ y T .

3.3 Parámetros del controlador PID

Para calcular los parámetros del controlador PID se recomienda utilizar las ecuaciones empíricas para ajustes de controladores, propuestos por Ziegler & Nichols. Estas ecuaciones fueron deducidas de los diferentes ensayos experimentales, utilizando el método de la curva de reacción del proceso.

Vienen a constituir relaciones empíricas entre los parámetros del controlador elegido y las características del proceso estimadas en el subcapítulo anterior.

Tomando en consideración la Figura 32, el cálculo de los valores de los parámetros del controlador, se hallan mediante las fórmulas que se presentan en la tabla 3.2.

TABLA 3.2 Fórmulas para ajustar parámetros de un controlador

MODOS DE CONTROL	PARAMETROS		
	K_p	T_i (min)	T_d (min)
P	$\frac{1}{TK}$	máx (∞)	min (0)
PI	$0.9 \frac{1}{TK}$	$3.33 T$	min (0)
PID	$1.2 \frac{1}{TK}$	$2.0 T$	$0.5 T$

El hecho de que el método de sintonía elegido de sólo valores aproximados para los parámetros del controlador hace generalmente necesario un siguiente paso (ajuste fino de los parámetros), mediante observación de la respuesta

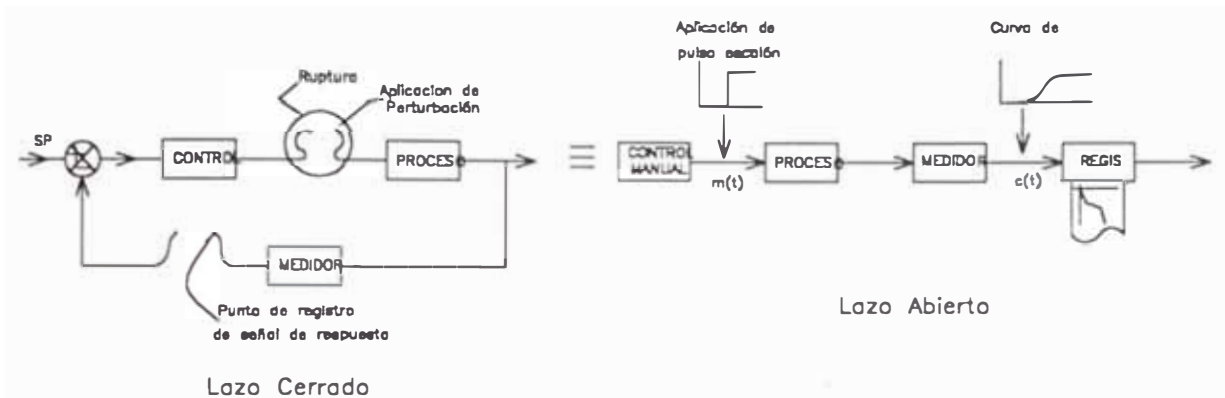
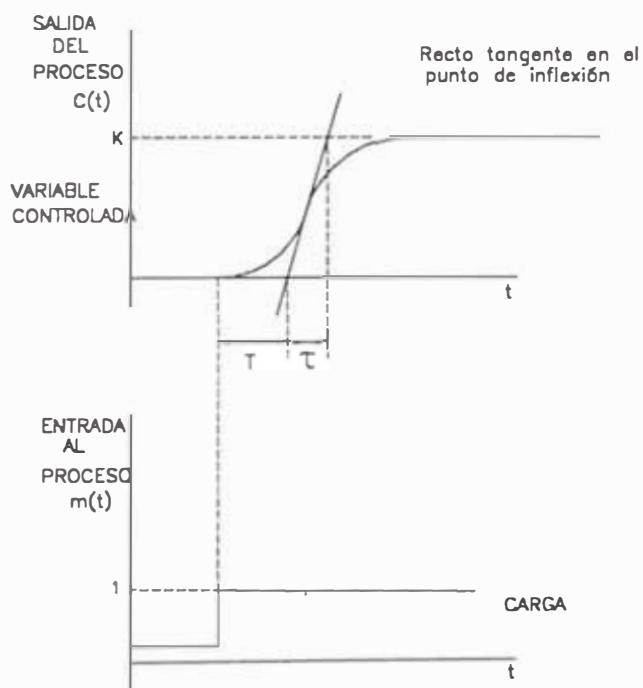


Figura 31. Procedimiento Experimental para determinar la Curva de Respuesta de Reacción del Proceso



Donde:
 K: Ganancia
 T : Tiempo muerto o retardo, es el tiempo en minutos que transcurre entre el instante del cambio del escalón y el punto en que la tangente anterior cruza el valor inicial de la variable controlada
 τ : Constante de tiempo

Figuro 32. Curvo de Reacción

del sistema en lazo cerrado.

■ Selección del Tiempo de Muestreo

La tendencia actual de la industria es hacia la implantación de funciones de control mediante la utilización de controladores digitales con microprocesador para cerrar uno o varios lazos de regulación. La característica común de estos equipos reside en que la información no se recibe y/o manda continuamente a lo largo del tiempo, sino solo a intervalos, normalmente regulares de tiempo T_m , el tiempo de muestreo, más o menos frecuente; Esto contrasta con los instrumentos analógicos (electrónicos y neumáticos) donde las funciones se realizan continuamente en el tiempo.

La operación de discretización o muestreo temporal de una variable continua de proceso que realizan los controladores digitales, implica un retraso en la información contenida en la variable. Al igual que sucede en la regulación continua, un retraso en el lazo tiende a hacer inestable la regulación, llegando a serlo si el retraso es importante respecto a las constantes de tiempo del proceso. Aunque no llegue a este extremo, las oscilaciones de la variable controlada serán mayores cuanto más importante sea el retraso. Un aumento excesivo de la frecuencia de muestreo o reducción del tiempo o periodo de muestreo puede ocasionar varios efectos nocivos.

El tiempo de muestreo debe estar determinado por la importancia del tiempo muerto o retardo y constantes de

tiempo del proceso, del algoritmo PID empleado, espectro de la frecuencia de las variables medidas y cantidad de variables a procesar. La selección incorrecta del mismo puede acarrear graves problemas de control.

Se han hecho varios estudios sobre el tiempo de muestreo (o frecuencia de muestreo) en DDC, habiéndose llegado a ciertas recomendaciones que aunque no son únicas, dan una idea de los márgenes en que debe encontrarse normalmente el muestreo de una aplicación. En la tabla 3.3 pueden verse algunos resultados de estos estudios y los valores empleados en ciertas aplicaciones.

TABLA 3.3 Tiempos de Muestreo Recomendados para Ciertas Variables de Proceso

VARIABLE DE PROCESO	TIEMPO DE MUESTREO (seg)
Caudal	1-3
Presión	1-5
Nivel	5-10
Temperatura	10-45
Composición	20-60

Acerca de los parámetros del controlador, pueden ser obtenidos por la aplicación de las reglas o fórmulas de sintonía (dados en la tabla 3.2) de los controladores continuos si el tiempo muerto corregido (T_c) es utilizado en vez del tiempo original (T). Aquí, $T_m/2$ es una aproximación para el tiempo muerto de los procedimientos de muestreo (sample) y mantenimiento (Hold).

Así tenemos que: $T_c = T + T_m/2$

■ Valores típicos de parámetros PID del controlador

En la siguiente Tabla 3.4 se presenta los valores típicos y rangos adecuados de los parámetros P, I, D de los controladores, utilizados en los lazos de control de las sub-secciones 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3.

TABLA 3.4

PARAMETROS PID	PROCESO			
	FLUJO (1)	NIVEL DE PULPA(2)	PESAJE DINAMICO(3)	DENSIDAD (4)
BANDA PROPORCIONAL B.P.	300 (100-500%)	25 (5-50%)	100 (80-300%)	30 (0.5 -50%)
ACCION INTEGRAL Ti	10 (1-40rep/min)	Rara vez	-	10 rep/min
ACCION DERIVATIVA Td	NO	NO	-	0.2 min

(1), (2), (4) Valores considerados en base a la referencia 6 (Pag. 80) de Bibliografía.

(3) Valores tomados de la referencia 12 de Bibliografía.

■ Especificaciones de funcionamiento del sistema

Las especificaciones de funcionamiento frecuentemente se obtienen en términos de la respuesta transitoria a una entrada escalón unitario. Estas especificaciones permiten conocer el comportamiento del sistema y sirven de punto de partida para el diseño de sistemas de control.

Generalmente un sistema responde a un escalón con oscilaciones amortiguados antes de llegar al estado estacionario.

Especificaciones:

- Tiempo de asentamiento, $T_s = 10$ seg.
- Desviación máx. de estado estacionario, $\delta = 2.5\%$
- Porcentaje de sobre pico, P.O. = 10%
- Factor de amortiguamiento, $\zeta = 0.6$

Los valores indicados arriba, son valores promedios típicos.

Por lo tanto, cuando el sistema es excitado por una variación en el set-point, variable manipulada o carga, el sistema no alcanza en un primer instante los valores dados en las especificaciones. Para alcanzar el establecimiento de ellos es necesario recurrir a los respectivos ajustes en el controlador en base a la observación del comportamiento de la respuesta del sistema en lazo cerrado, hasta obtener los valores deseados de los parámetros de las especificaciones de funcionamiento.

CAPITULO IV INSTRUMENTACION DEL PROCESO

4.1 Generalidades

En este capítulo, el propósito es presentar las características de los diversos Sensores/Transmisores, Elementos de Control Final o Actuadores y Controladores que se utilizan para implementar los diferentes lazos de control del proceso de molienda, con el objetivo necesario de controlar y mantener en los valores deseados las magnitudes físicas tales como el flujo, nivel, densidad, peso, presión, velocidad y control de apertura/cierre de válvula.

Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de éstas constantes en condiciones más idóneas que los que el propio operador podría realizar.

Los instrumentos de medición de las variables de proceso mencionados proveen una señal continua de 4 a 20 mA y constituyen las Entradas Analógicas para los controladores. Asimismo, los instrumentos de control, como válvula de control, variador de velocidad, constituyen los actuadores sobre los cuales el controlador actúa con señal analógica de 4 a 20mA, produciendo de esta manera la regulación de los mismos.

También, se hace mención de la importancia de los sistemas de transmisión de senales (datos) entre los diferentes dispositivos que integran el sistema de control, así como, técnicas para evitar las interferencias en las señales analógicas/digitales, técnicas de alambrado para implementar un sistema industrial de automatización que funcione en condiciones favorables y eficientes que asegure una seguridad frente a condiciones ambientales y de proceso rigurosas que pudieran presentarse.

4.2 Especificaciones y características de sensores y actuadores

4.2.1 Sensores y transmisores

4.2.1.1 Introducción

Estos dispositivos constituyen los instrumentos de MEDICION de las variables de proceso.

SENSOR.— Es el elemento primario de campo que convierte una magnitud física en una pequeña señal de voltaje o corriente equivalente.

TRANSMISOR.— Es el que se encarga de acondicionar la señal procedente del sensor, transduciendola en una señal estandar de regulación (p.ej. 4 a 20 mA), para su transmisión al controlador. Ver figura 33.

En la actualidad, la mayoría de sensores incorporan el transmisor constituyendo un conjunto que se le conoce como transductor, es así que, se hablará de transductor de flujo, nivel, etc.

A continuación, se detalla cada uno de los transmisores

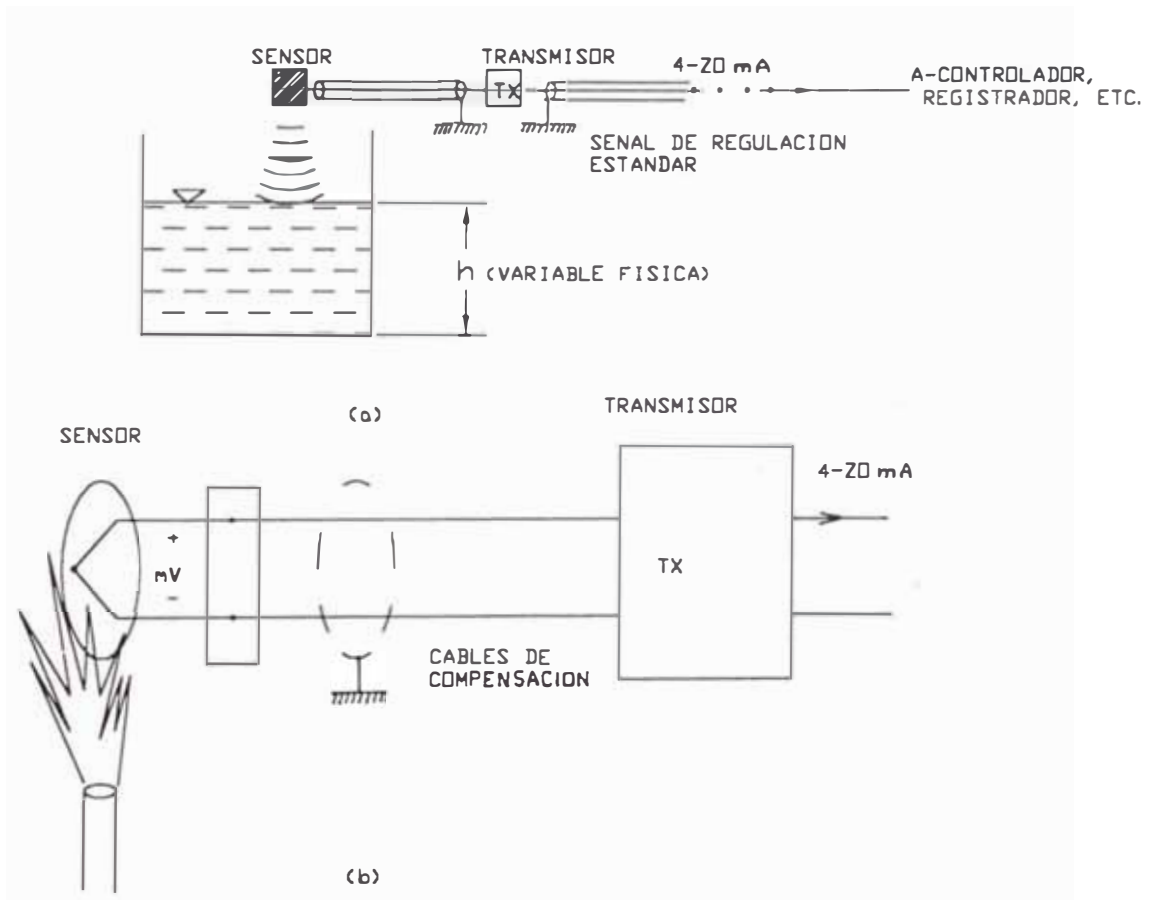


FIG. 33. SISTEMA SENSOR- TRANSMISOR

utilizados en el proceso.

4.2.1.2 Medición de flujo

La variable flujo a medirse en el circuito de molienda se realiza en dos puntos, siendo:

- a) Flujo de alimentación de agua de proceso al molino.
- b) Flujo de alimentación de pulpa al ciclón.

El material pulpa y el agua por su naturaleza son materiales conductivos, por consiguiente, el medidor de flujo o flowmeter adecuado para medir el flujo de líquidos conductivos son los **MEDIDORES ELECTROMAGNETICOS**.

Las ventajas son numerosas de los electromagnéticos, han contribuido a una rápida difusión de su uso a nivel industrial. Son insensibles a condiciones de presión, temperatura o viscosidad no afectando la medición electromagnética. Debido a que es un tubo hueco, no hay restricción alguna al flujo, pues consisten de una aislación (revestimiento), dos electrodos, y el tubo está alineado con la tubería, por lo que no hay pérdida de carga adicional alguna. No hay problema de posibles desgaste de partes mecánicas pues no existen, con lo que se reduce significativamente los costos de mantenimiento y repuestos. El rango de medición es amplio; se pueden medir flujos con velocidades desde 0.3 hasta 12 m/s y es posible medir en forma bidireccional. En la figura 34 se presenta una vista de un medidor de flujo magnético.

■ Principio Físico

Un medidor electromagnético funciona en base a la ley de

9300A SERIES
MAGNETIC FLOWTUBE

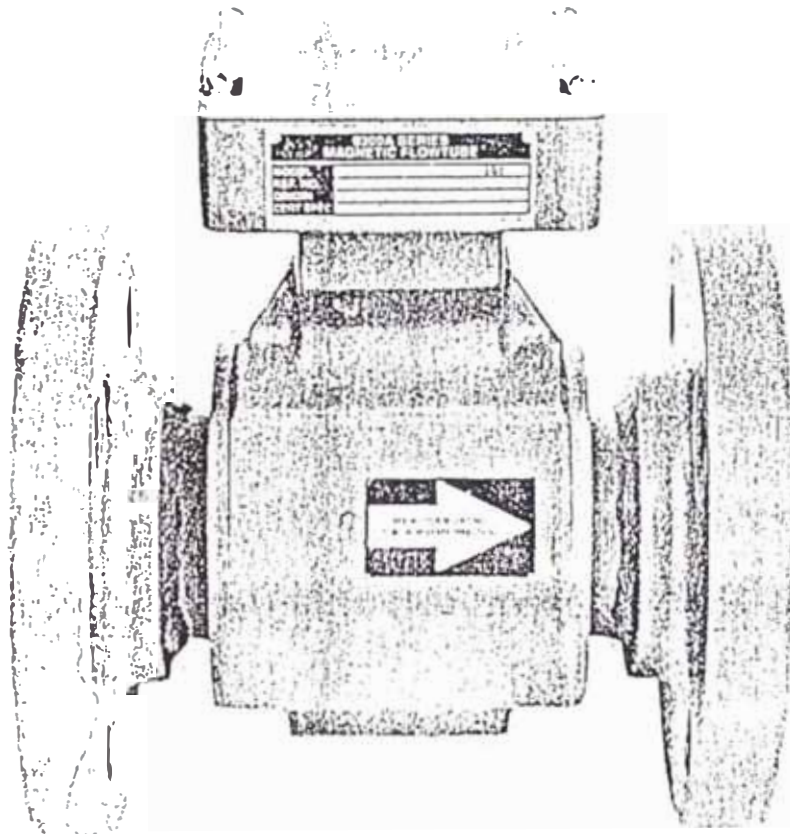


Figura 34. Medidor de Flujo Magnético

FARADAY de Inducción Electromagnética, la que sostiene que se "INDUCE UN VOLTAGE SIEMPRE QUE UN CUERPO CONDUCTOR SE MUEVE ATRAVES DE UN CAMPO MAGNETICO".

En un medidor de flujo electromagnético, el líquido actúa como cuerpo conductor, que al moverse a través del campo magnético generado por el medidor, genera un voltaje directamente proporcional a la velocidad promedio de flujo producida.

Este voltaje es captado por el sensor, y luego del obligado procesamiento electrónico se convierte en la señal de 4 a 20 mA o de pulsos proporcional al flujo en la tubería.

El campo magnético es generado por dos bobinas dentro del medidor. El voltaje se mide mediante dos electrodos aislados y ubicados uno frente al otro. Ver Figura 35.

Los medidores más modernos cuentan con control vía microprocesador inteligentes, con lo que el usuario ya no tienen que calibrar nada, sino que simplemente los programa.

■ Selección

Para la selección del medidor electromagnético se toma en cuenta: Condiciones de instalación, tipo de líquido y dimensiones correctas para los rangos de flujo del proceso. Este tipo de medidores tienen por lo general rangos de precisión de 1% ó menos.

Para lograr una medición precisa y extender la vida útil del medidor, se toma en cuenta que los slurries mineros o

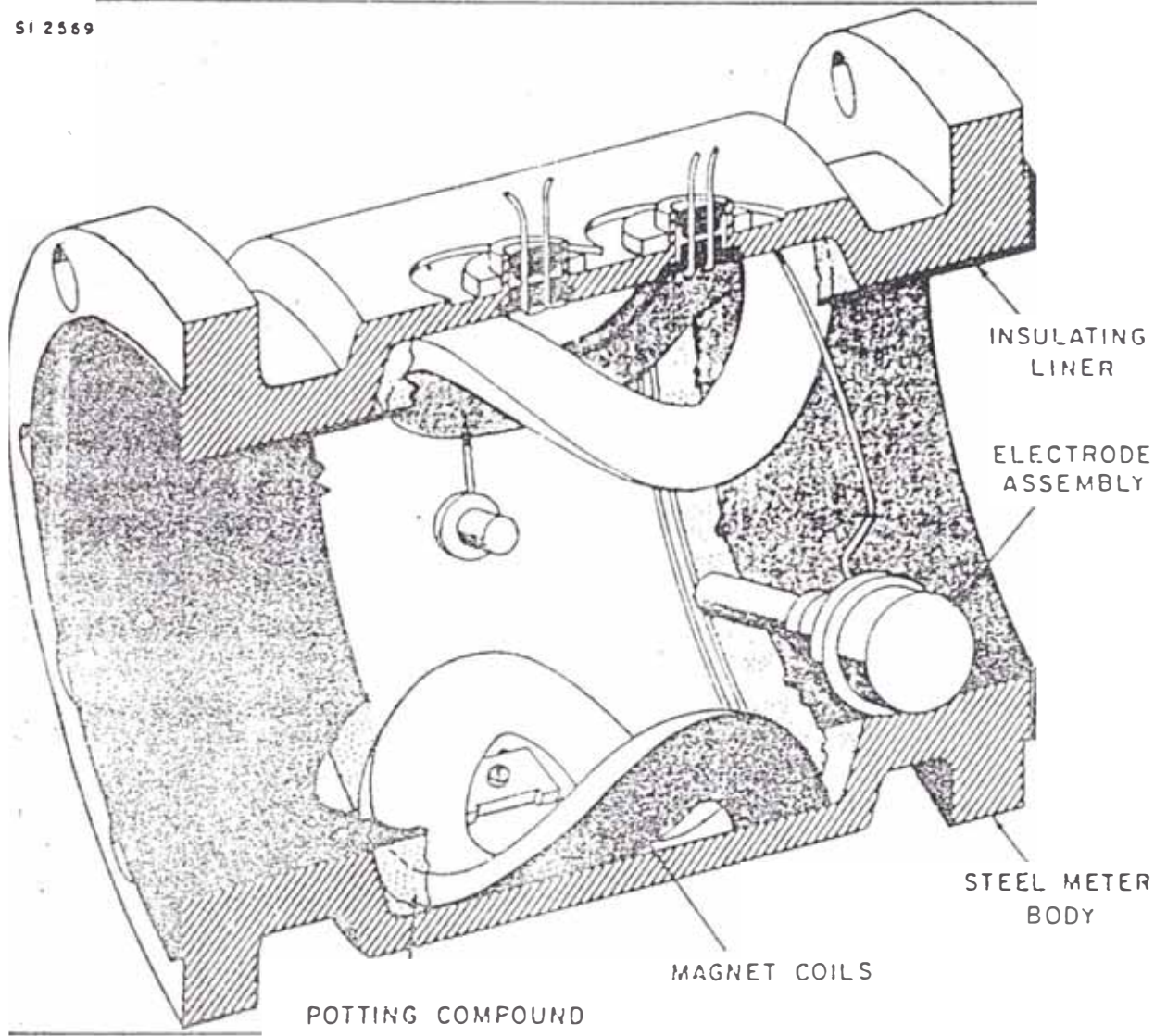


Figura 35. Sección Transversal de un Flujoímetro Magnético

pulpas, son líquidos abrasivos en ellos se debe tratar de lograr una velocidad de flujo menor a 2 m/seg.

En general, si el líquido tiene agua es posible medirlo con un medidor electromagnético. Los sensores existen en diámetros desde 2 mm. hasta 2 metros para aplicaciones de macromedición.

En la Anexo A se puede observar detalladamente los diferentes parámetros que se consideran para seleccionar el adecuado medidor de flujo para una aplicación específica.

4.2.1.3 Medición de nivel

La variable Nivel a medirse es en el tanque de succión de la bomba. El medidor seleccionado y adecuado para esta aplicación, en la medición continua del nivel de la pulpa en el tanque, es el MEDIDOR POR ULTRASONIDO. Ver figura 36.

Los dispositivos de medición a ultrasonidos son una técnica invasiva, es decir, no están en contacto con el producto.

■ Principio de Funcionamiento

En el sistema de medición a ultrasonidos se tiene una membrana que se pone a resonar mediante cristales piezoeléctricos que emiten impulsos de ultrasonidos en un rango de frecuencia de 25 a 45 KHZ. Ver figura 37 que presenta un corte del disco o diafragma vibratorio.

La vibración es transmitida a través del medio ambiente (normalmente aire) y es reflejada por la superficie del producto que queremos medir. Puede ser un líquido o un sólido. La reflexión vuelve al transmisor (que es en

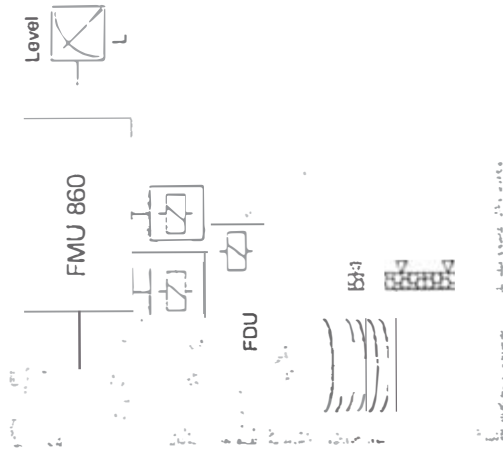
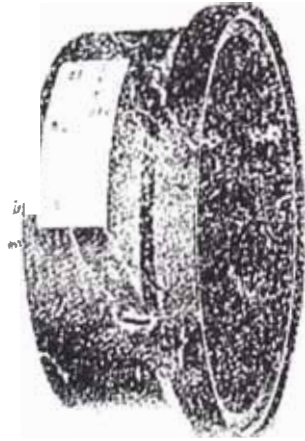
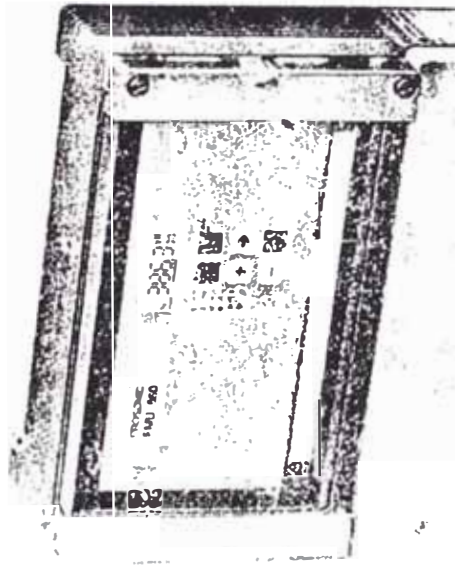


Figura 36. Medidor de Nivel por Ultrasonido

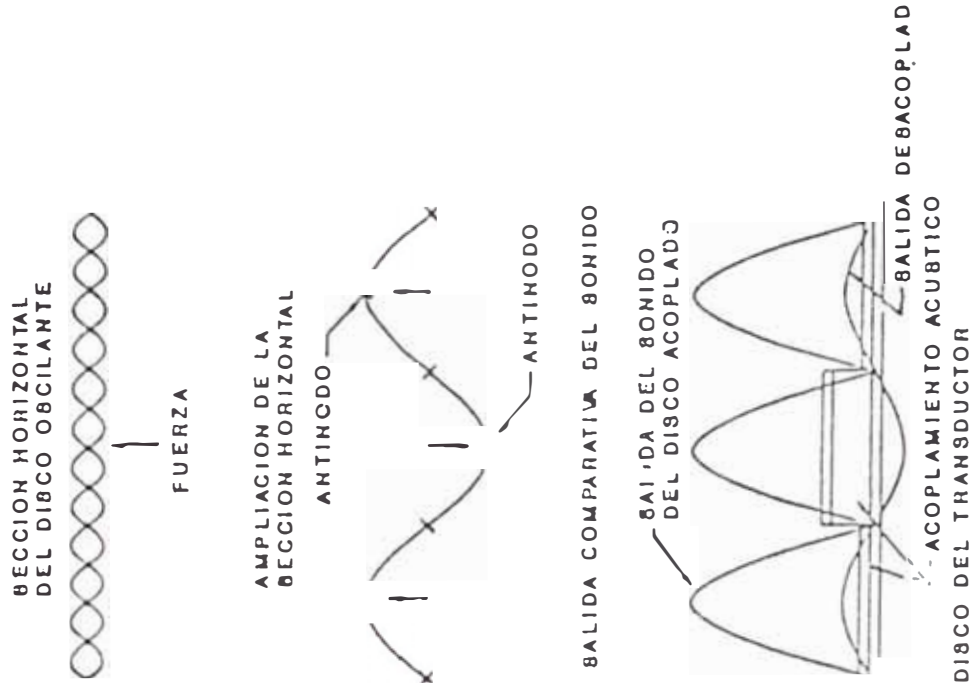


Figura 37. Disco Vibratorio del Sensor

realidad transmisor y receptor o sea un transceptor) y se mide entonces el propio eco. El sistema de medida de nivel mide el tiempo de tránsito de la onda entre su emisión hasta que vuelve al sensor como eco. Ese tiempo es proporcional a la distancia recorrida. El equipo determina la altura o nivel de pulpa, mediante una sustracción entre la altura del tanque, previamente seteado en la memoria del equipo y la distancia recorrida por el eco (distancia desde la superficie del líquido al sensor).

■ Selección

Para la elección del medidor a ultrasonido se consideró los siguientes puntos:

- Rango de medición.
- Características del producto (pulpa) (p.ej. densidad, conductividad, etc).
- No debe haber contacto entre sensor y producto.
- El producto a medir sea agresivo o abrasivo.
- Se producen elevados esfuerzos mecánicos (p.ej. procesos de llenado).
- Atmósfera del medio.
- Temperatura del medio.

Los sensores existen con alcance de hasta 60 m. Los mejores sistemas ultrasónicos tienen una exactitud del orden de 1% del rango total de medición.

En el Anexo B se encuentra mayor información técnica sobre este instrumento.

4.2.1.4 Medición de peso dinámico en faja

Las Balanzas en faja (o pesómetro en cinta) son dispositivos que pesan el material mientras se encuentra en movimiento, proporcionando un pesaje continuo del material transportado en la cinta.

Estas balanzas soportan uno o más rodillos de cinta transportadora y rodillos de pesaje que son "flotantes" con respecto a los otros rodillos de transporte, permitiendo transmitir el peso del material en la cinta directamente a la suspensión de la báscula en cinta. A su vez, la suspensión aplica la fuerza a la célula de carga, generando un señal eléctrica proporcional al peso del material en la cinta. Ver figura 38 que muestra una vista de un sistema de pesaje de material en cinta transportadora.

Puesto que la cantidad de material depende de la velocidad de la cinta, se utiliza un sensor de velocidad (denominado Encoder) para generar una señal proporcional a la velocidad de la cinta. La señal de la celda de carga y del sensor de velocidad se aplica a un Integrador de báscula. La función principal del Integrador es efectuar la multiplicación básica siguiente:

$$\begin{array}{rcc} \text{Peso} & \times & \text{Velocidad} & = & \text{Caudal} \\ (\text{Kg/m}) & & (\text{m/s}) & & (\text{Kg/s}) \end{array}$$

Esta multiplicación se efectúa para:

- a) Visualizar el caudal.
- b) Integrar la señal del caudal para obtener la totalización del producto transportado en la cinta.

- c) Obtener una señal analógica del caudal para visualización remota y/o funciones de control y monitoreo.

Lo mencionado son las funciones básicas del pesaje de balanza en cinta.

■ Componentes de una Balanza en Faja

El suministro estándar de un sistema de pesaje de balanza en faja. (Ver Figura 39), consiste en lo siguiente:

- Suspensión de balanza en faja
- Sensor de velocidad (Encoder)
- Polea de dirección
- Integrador de balanza en faja.

■ Balanza en Faja (Suspensión)

- 2, 3, 4 ó 6 rodillos de suspensión para obtener mayor precisión y/o aplicaciones especiales.
- Los modelos de 2 y 3 rodillos dan precisión de + 0.5 % mientras que los de 4 y 6 rodillos dan una precisión de + 0.25 %.

■ Sensor de Velocidad

- Sensor de velocidad de disco rotatorio con contactos ópticos, para montaje en polea de cola, o en el rodillo de retorno.

■ Integrador

Es una unidad inteligente con microprocesador que ofrece:

- Visualización de caudal, total, peso y velocidad.
- Salida analógica.

- Contactos para totalización remota.

En el Anexo C se encuentra mayores detalles sobre las especificaciones de este sistema.

4.2.1.5 Medición de la densidad de pulpa

La Densidad (Kg/m^3) de la pulpa es una variable medida en línea a la salida de la bomba. La medición se realiza mediante un DENSIMETRO NUCLEAR.

Este dispositivo está compuesto de una fuente y detector, son montados en lados opuestos de la tubería que conduce a la pulpa. La fuente irradia a través de las paredes de la tubería y el material de proceso al detector. El método de radiación se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. Es un sistema invasivo, que no contamina o afecta al producto.

Este sistema de medición es extremadamente preciso hasta 0.001 kg/litro.

Como opción el dispositivo puede incorporar setpoint, capacidad de control, provee una salida analógica para control de drive, válvula u otro elemento de control.

En la figura 40 se presenta un esquema de este medidor radiactivo.

En el Anexo D se muestra las especificaciones técnicas de este instrumento.

4.2.1.6 Medición de presión

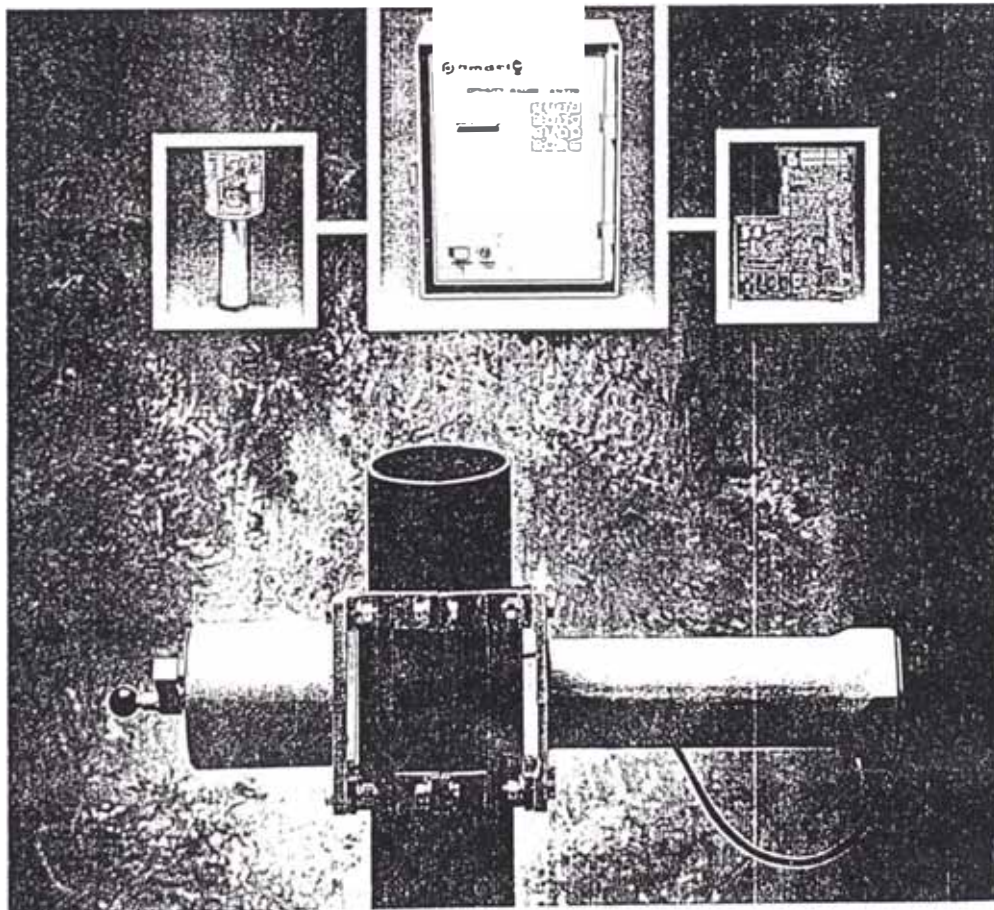
La variable Presión a medir se realiza a la entrada de alimentación al hidrociclón. El tipo de presión es

Amdel AM870 High Performance Density Gauge

Fast, Accurate and Stable
A new generation of Density Gauge setting higher standards in nucleonic measurement of liquids, slurries and bulk solids.

AM870 On-Pipe Transmitter/Transducer Assembly
Intelligent Controller which simplifies the calibration procedure.
Sensitive scintillation detector for stability and long life.

Rugged lead filled steel source housing exceeds shielding requirements of NHMRC Code of Practice.
Suitable for pipes from 10 to 1000 mm diameter



Designed for use with low activity radio-isotopes

Figura 40. Medidor de Densidad

manométrica.

La presión en la entrada del ciclón debe ser de 3-5 PSI para que el ciclón trabaje de forma adecuada

El instrumento de medición e indicación de la presión manométrica o relativa a utilizarse es el tubo BOURDON de diafragma.

El sensor de presión el tubo de Bourdon, consiste básicamente en un tramo de tubo en forma de herradura, con extremo sellado y el otro conectado a la fuente de presión. Debido a que la sección transversal del tubo es elíptica o plana, al aplicar una presión el tubo tiende a enderezarse, y al quitarla, el tubo retorna a su forma original. La cantidad de enderezamiento que sufre el tubo es proporcional a la presión que se aplica, y como el extremo abierto del tubo está fijo, entonces el extremo cerrado se puede conectar a un indicador, para señalar la presión. En la figura 41 puede verse la estructura de un tubo Bourdon.

El material empleado normalmente en el tubo Bourdon es de acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

En el anexo E se presenta las especificaciones de un sensor de presión de tubo Bourdon adecuado para la aplicación.

4.2.2 Elementos de control final

Son dispositivos de campo que interpretan los comandos u orden del controlador y que por otro permite actuar sobre la variable manipulada.

Son usualmente los compuestos más importantes en un circuito de control porque cambian directamente el flujo de material o energía.

4.2.2.1 Válvula de control

Es un elemento de control final más usual y se les encuentra en las plantas de proceso, donde manejan los flujos para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar. En la figura 42 se presenta una vista de una válvula de control.

Las válvulas de control a utilizarse en el circuito de molienda forman parte de los lazos de control del flujo de alimentación de agua al molino y tanque de succión de la bomba, con el propósito principal de mantener una densidad de pulpa en el valor deseado.

Una válvula de control actúa como una resistencia variable en la línea de proceso; mediante el cambio de su apertura se modifica la resistencia al flujo y, en consecuencia, el flujo mismo. Las válvulas de control no son más que reguladores de flujo.

Se compone básicamente del cuerpo y actuador, como se ve en la figura 43. El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y el asiento, está provista de rosca o bridas para conectar la válvula a la tubería del proceso. El obturador realiza la función de control del paso del fluido. Está unido a un vástago que atraviesa la tapa del cuerpo y es accionado por el actuador.

El actuador neumático consiste en un diafragma con

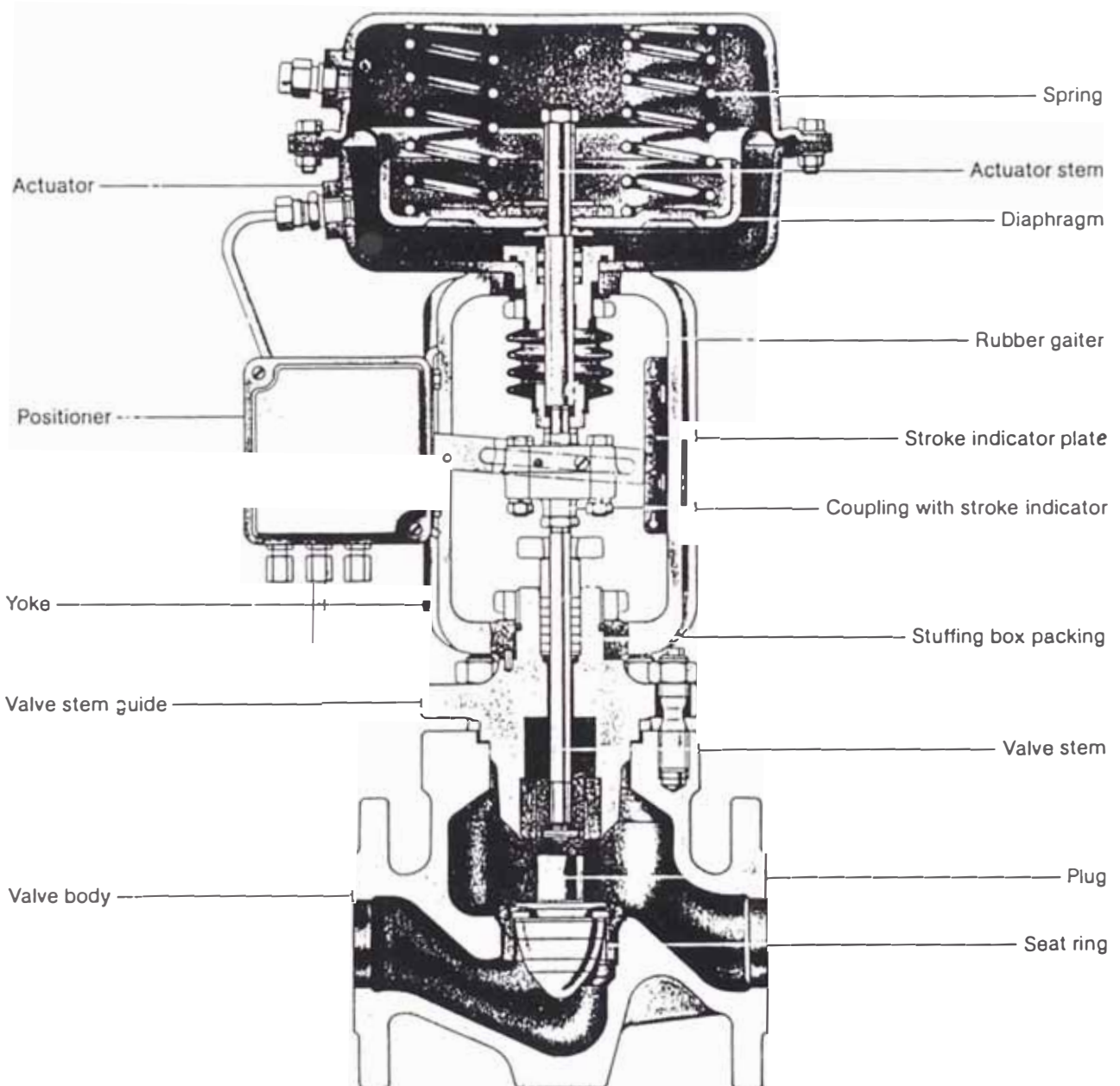


Figura 43. Partes de una Válvula de Control

resorte que trabaja generalmente en un rango entre 3 a 15 psi, es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a una señal neumática de 3 y 15 psi.

Según la acción, los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa, cuando tienen que bajar para cerrar, e inversa cuando tienen que bajar para abrir. Esta misma división se aplica a los actuadores, que son de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba.

Al combinar estas acciones se considera siempre la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma y por tanto la válvula en una de sus posiciones extremas.

Las posiciones extremas de la válvula es muy importante tomar en cuenta, cuando actúa la válvula frente a falla de la energía que la acciona, esto se relaciona con la "posición en falla" de la válvula y el principal factor que se debe tomar en cuenta, debe ser, la seguridad. Si se decide que por razones de seguridad la válvula se debe cerrar, entonces debe especificarse una válvula "cerrada en falla" (CF); la otra posibilidad es la válvula "Abierta en Falla" (AF), es decir, cuando falle el suministro de energía, la válvula debe abrir paso al flujo. La mayoría de las válvulas de control se operan de manera neumática y, consecuentemente, la energía que se les aplica es aire comprimido. Para abrir una válvula cerrada en falla se requiere energía y, por ello, también se les conoce como

válvulas de "Aire para Abrir" (AA). Las válvulas abiertas en falla, en las que requiere energía para cerrarlas, se conocen también como de "Aire para Cerrar" (AC).

Cuando las válvulas operadas neumáticamente son controladas por una señal electrónica se requiere un transductor electroneumático también, conocido como POSICIONADOR. Es un accesorio de la válvula de control.

Este dispositivo recibe como entrada una señal continua de 4 a 20 mA procedente de la salida del controlador, traduciendo en una señal neumática equivalente dentro del rango de 3 a 15 psi, siendo esta señal la que incide en el diafragma del actuador permitiendo accionar el obturador para regular el paso del flujo de material del proceso, Ver figura 44.

■ Consideraciones para el dimensionamiento y selección de una válvula

El dimensionamiento de la válvula de control es el procedimiento mediante el cual se calcula el coeficiente de flujo de la válvula (C_v). Cuando ya se determinó el C_v requerido y se conoce el tipo de válvula que se va a utilizar, se procede a obtener el tamaño de la válvula con base en el catálogo del fabricante.

El coeficiente C_v se define como "La cantidad de agua a 60°F en galones, U.S. que fluye por minuto a través de una válvula completamente abierta, con una caída de presión de 1 psi en la sección transversal de la válvula".

Para el dimensionamiento de una válvula de control se debe

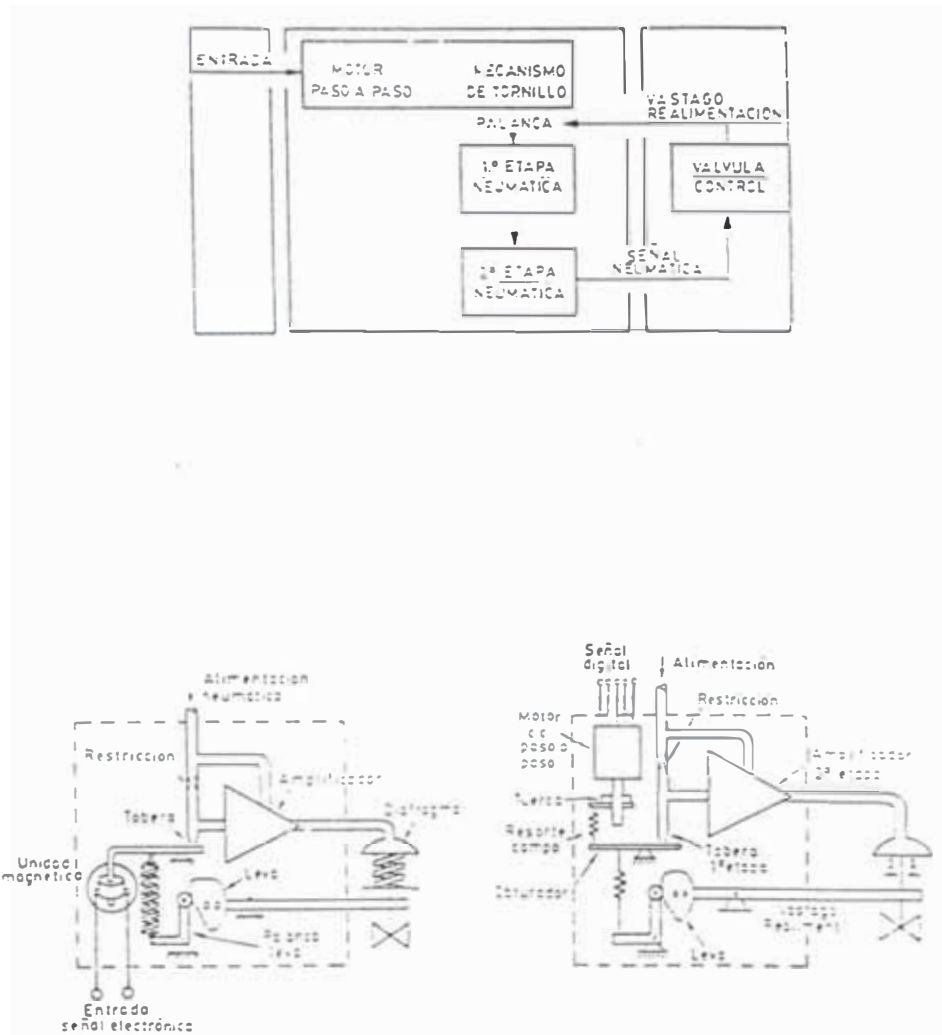


Figura 44a. Posicionador Electroneumático

considerar lo siguiente:

- 1) Cuál es el fluido a ser controlado?
 - Gravedad específica
 - Temperatura
 - Viscosidad
- 2) Cuál es la razón de flujo?
 - Máximo, normal, mínimo
- 3) Cuál es la presión a la entrada de la válvula?
- 4) Cuál es la presión a la salida de la válvula?
- 5) Cuál es la máxima presión de corte (Shutoff)?

Cuando se selecciona el tipo de válvula de control, se considera las siguientes variables:

- 1) Tipo de aplicación.
- 2) Material de la válvula para evitar la corrosión.
- 3) Tipo de conexión o montaje.
- 4) Material del cuerpo de la válvula.
- 5) Servicio de control ON/OFF o modulación.
- 6) Tipo de actuador.

Cuando se utiliza una válvula de control para manipular fluidos líquidos, se cuenta con una ecuación básica para calcular el coeficiente de flujo, C_v ; Esta ecuación es la misma para todos los fabricantes:

$$C_v = q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}}$$

Donde:

- q - flujo de líquido, en gpm U.S.
- ΔP - caída de presión $P_1 - P_2$, en psi en la

sección de la válvula.

P_1 - presión de entrada a la válvula, en psi.

P_2 - presión de salida de la válvula, en psi.

G_f - gravedad específica del líquido a la temperatura en que fluye, para agua - 1 a 60 °F.

4.2.2.2 Variador de velocidad (AC DRIVE)

Para el control de la velocidad del motor de inducción de la bomba se propone el uso del variador de velocidad 1336 PLUS DRIVE AC de frecuencia ajustable de la marca Allen Bradley, basado en un circuito con microprocesador, que ofrece flexibilidad, capacidad de control, facilidad setup y operación, eficiencia de energía y excelente performance, concediendo una excepcional confianza en el funcionamiento del motor.

El principio de funcionamiento de estos sistemas de regulación de velocidad, se basan en los convertidores de frecuencia que utilizan la técnica de sintetizar una onda senoidal por Modulación de la Anchura de Pulsos o técnica PWM (de las siglas inglesas Pulse Width Modulation), para generar corriente alterna con la frecuencia y la tensión necesarias para accionar motores AC a velocidad variable.

Estos sistemas al ser de tecnología digital con microprocesador son programables, presentando dos maneras de programación:

1. Local, mediante un HIM (Human Interface Machine) que es un módulo de interfaz de operador que se instala en el variador de velocidad, estará conectado como

adaptador y será visible desde la parte frontal del variador. El HIM se divide en dos secciones: panel de visualización y panel de control. El panel de visualización proporciona un medio para programar el variador y ver los diversos parámetros de operación; El panel de control permite el control de las diferentes funciones del variador. Ver figura 45.

2. Remoto, mediante una señal analógica de 4 a 20 mA. que es entregada por un controlador de lazo, se consigue hacer la regulación de la velocidad del motor. Con este tipo de control sobre el variador solo se consigue modificar y regular la velocidad quedando inhibidos otros parámetros de operación.

En la figura 46 se presenta el diagrama de bloques de un variador de velocidad.

■ Selección del variador de velocidad

Para elegir un variador de velocidad para un motor AC se requiere conocer: La potencia del motor, tensión de trabajo, condiciones ambientales de operación.

En el anexo G se presenta mas detalles sobre las especificaciones y selección de un variador de velocidad 1336 plus.

4.3 Especificaciones y características del controlador de lazo

4.3.1 Generalidades

En esta sección se presenta las mas importantes características del controlador industrial utilizado para implementar el sistema de control.

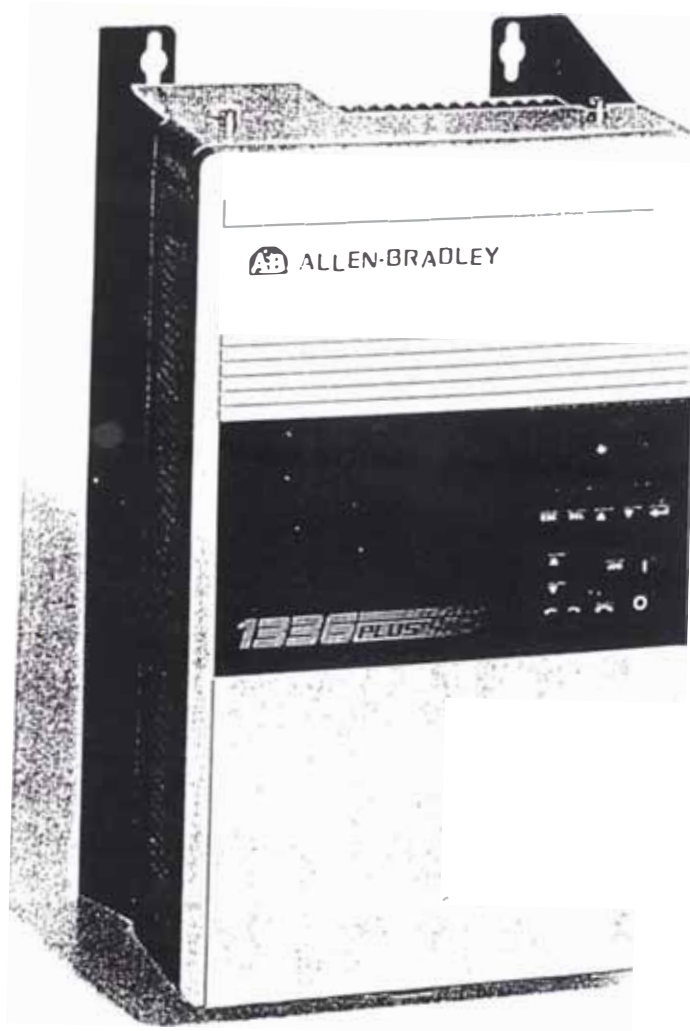


Figura 45. Variador de Velocidad para motor AC

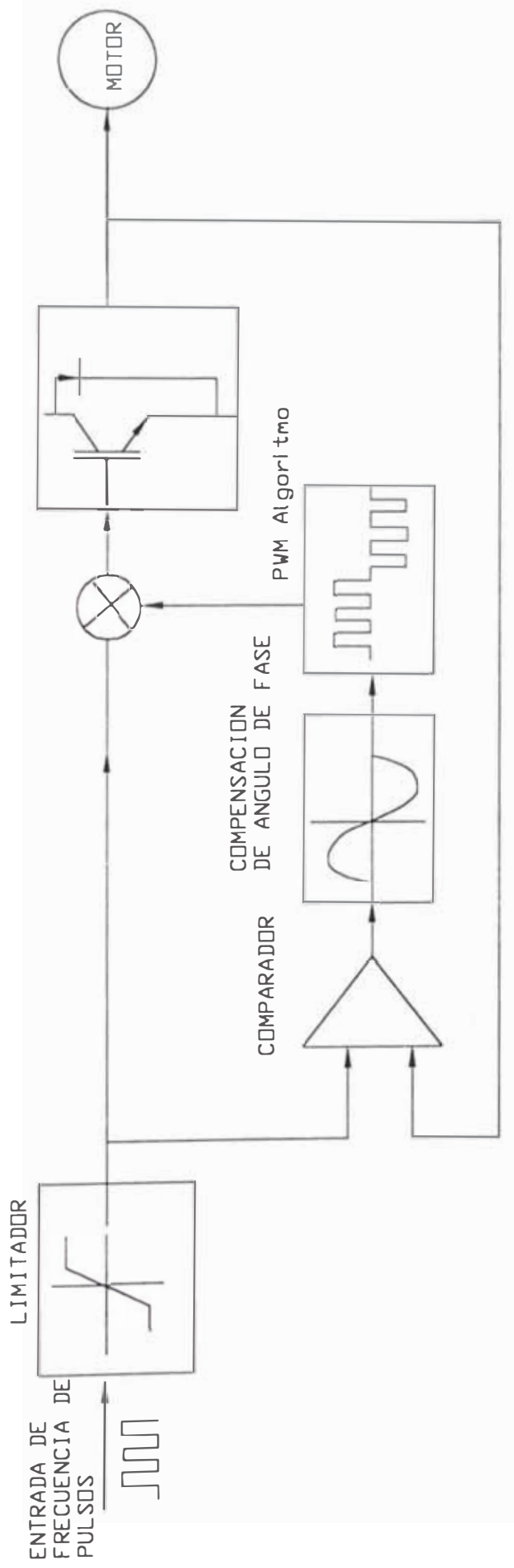


FIG. 46. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL VARIADOR DE VELOCIDAD 1336 PLUS

El controlador viene a constituir el "cerebro" del circuito de control, es el dispositivo que toma la decisión en el sistema de control y, para hacerlo, el controlador:

1. Compara la señal del proceso que llega del transmisor, la variable que se controla, contra el punto de control y
2. Envía la señal apropiada a cualquier elemento de control final, para mantener la variable que se controla en el punto de control.

El controlador digital que se utiliza es el controlador SINGLE STATION MICRO modelo 760 de FOXBORO. Ver anexo H en donde se presenta las especificaciones de este controlador.

Este equipo es un instrumento autónomo basado en tecnología con microprocesador que implementa un solo lazo de control. Monitorea y controla continuamente un proceso en concordancia con su algoritmo de configuración.

Posee un display análogo gráfico donde se muestra el Set-point, Entrada y Salida, y un display digital alfanumérico de estas variables. Adicionalmente, los valores y estados de los parámetros de control seleccionado son fácilmente disponible para el operador.

Todos los ajustes son hechos desde el teclado que se encuentra en la parte inferior del frente del controlador. De este modo, no hay necesidad para el operador retirar el controlador del panel. En la figura 47 se presenta una vista frontal del controlador.

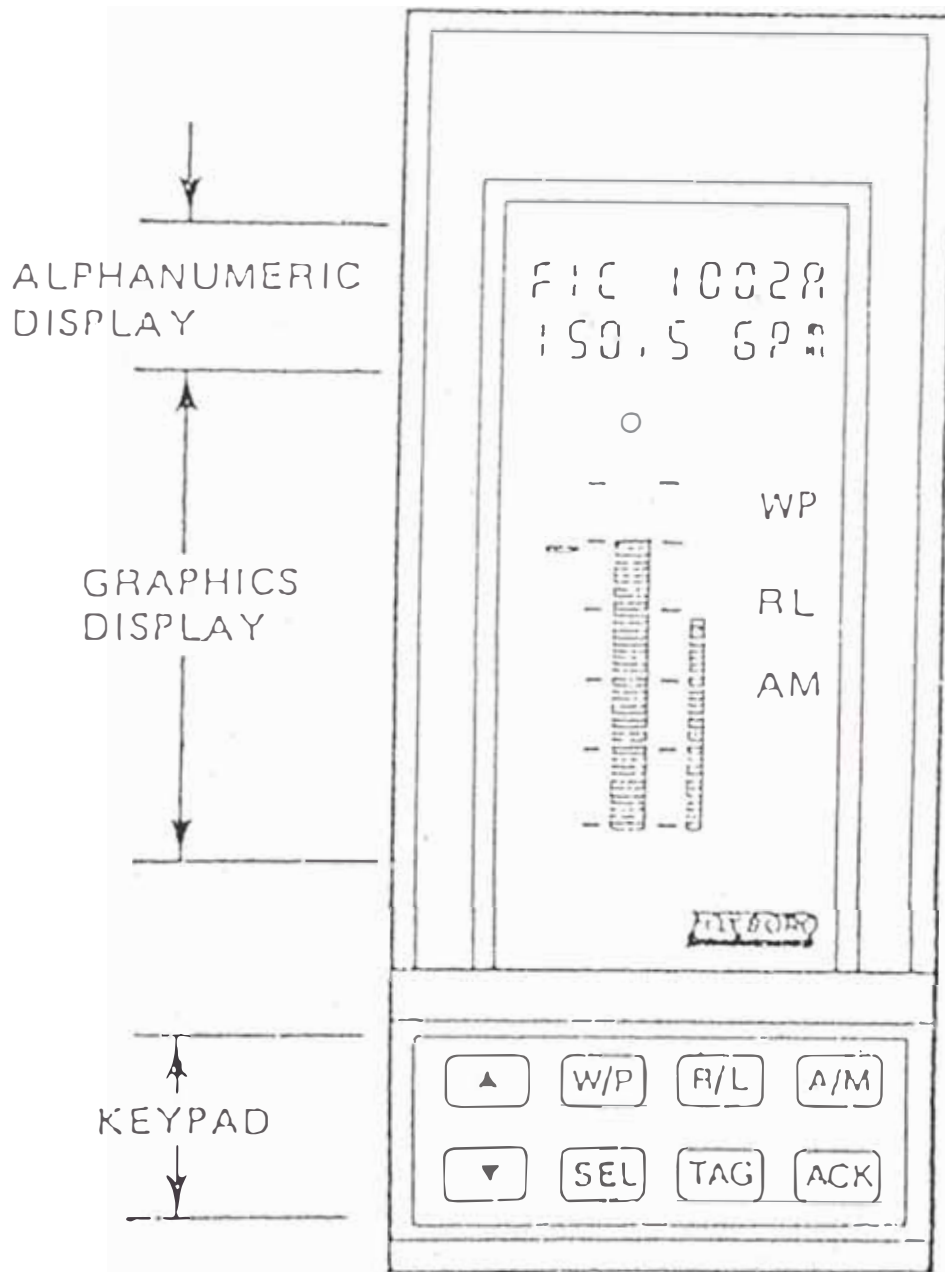


Figura 47b. Panel frontal del controlador

La característica más importante de este controlador es su Sintonización EXACT (Expert Adaptive Controller Tuning) que usa la técnica de reconocimiento de la respuesta del proceso a lazo cerrado, medio que provee un modo de restablecer equilibrio cuando se produce una perturbación en un proceso.

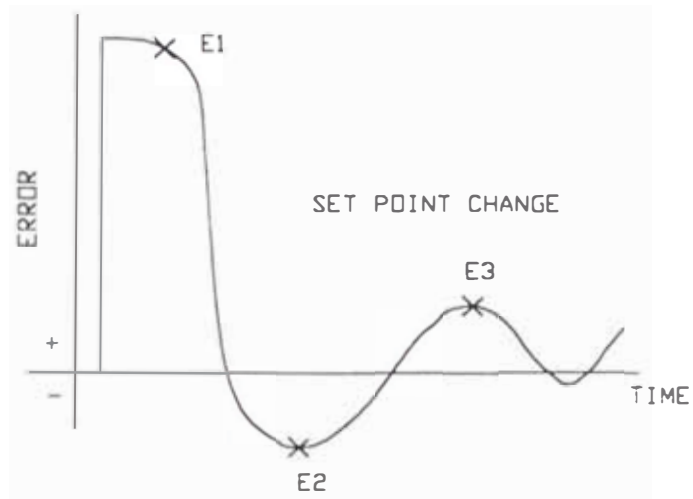
Este restablecimiento de equilibrio es implementado con mayor rapidez y con mayor precisión que lo que se podría lograr manualmente.

Adicionalmente, si las características de control o modelo matemático de un proceso son desconocidas, EXACT tiene una función de Pre-sintonización (Pretune) la cual puede calcular los valores iniciales de seis parámetros claves y automáticamente ingresarlos en la memoria del controlador.

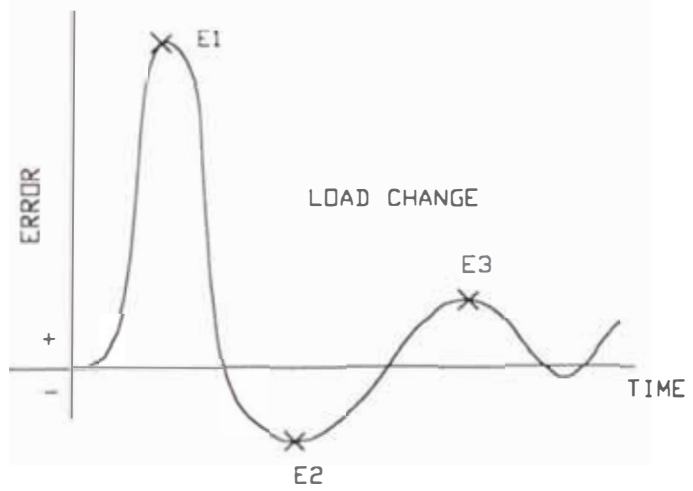
4.3.2 Principio de operación de EXACT

El mecanismo de operación de la sintonización Exact esta basado en el reconocimiento de patrones, usando el mismo procedimiento que emplea un Ingeniero de control experimentado. El reconocimiento de patrones utiliza la gráfica convencional de cambio en la medición versus tiempo que ocurre en un proceso cuando se produce una perturbación. Ver figura 48.

Cuando la diferencia entre la variable media y el punto de ajuste (set-point) excede de una cantidad predeterminado, Exact mide la respuesta resultante y luego alimenta esta información en el algoritmo de Auto-Sintonía



$$\text{OVER SHOOT} = -E2/E1$$



$$\text{DAMPING} = (E3 - E2) / (E1 - E2)$$

FIG. 48. RECONOCIMIENTO DE PATRONES

(self-tune). El algoritmo calcula los mejores valores de Banda Proporcional, Integral y Derivativa para el proceso, consistentes con la data con la que fue previamente configurado el controlador y luego implementa estos cambios.

Esta acción correctiva es monitoreada constantemente, y si se necesita, es actualizada tantas veces como sea necesario. Durante los períodos de equilibrio y de acción correctiva, Exact verifica el proceso 5 veces por segundo para instituir o modificar la acción correctiva.

El algoritmo EXACT contiene 18 parámetros que son configurados, de los cuales 8 pueden ser modificados por el usuario. Los controladores son despachados de fábrica con estos 8 parámetros configurados en forma standard, y pueden ser modificados por el configurador. Los valores de los otros 10 parámetros son determinados por el mismo proceso y constantemente están siendo actualizados. Para los detalles de estos parámetros ver las tablas 4.1 y 4.2. Cualquiera de estas decisiones o de los 8 valores de los parámetros ajustables pueden ser modificados en cualquier momento.

4.3.3 Función de auto-sintonía (STUN, SELF - TUNE)

El auto-ajuste funciona automáticamente cada vez que la variable medida difiere del punto de ajuste (setpoint) por una cantidad mayor que dos veces el valor del parámetro de la banda de ruido (NOISE BAND N.B.) siempre y cuando EXACT haya sido configurado e implementado. En la figura 49 se

presenta el diagrama de estado del algoritmo Self - Tuning.

4.3.4 Función de pre-sintonía (PTUN, PRE - TUNE)

Si las características de control del proceso son desconocidas, la función de Pre-ajuste de EXACT calculará los valores óptimos de arranque para los parámetros claves listados más adelante. Estos valores calculados serán luego automáticamente implementados como los valores iniciales para la función de Auto-ajuste de EXACT. Se recomienda emplear la función de Pre-ajuste aun si las características de control del proceso son conocidas.

Los valores ajustados en fábrica para todos los parámetros ajustados (Ver tabla 4.2) son utilizados como valores iniciales por la función de Preajuste.

PARAMETROS QUE PUEDEN SER AJUSTADOS POR PRE -AJUSTE (PRETUNE - PTUN)	VALOR DE CONFIGURACION PUESTO EN FABRICA
MODO PF (BANDA PROPORCIONAL)	200%
MODO IF (INTEGRAL)	2 MINUTOS
MODO DF (DERIVATIVA)	0 MINUTOS
MAIN NB (BANDA DE RUIDO)	2%
MAIN WMAX (TIEMPO MAX ESPERA P1 Y P2)	5 MINUTOS
MAIN DFCT (FACTOR DERIVATIVO)	1.0

Para poder utilizar la función de (PTUN) Pre-ajuste el controlador deberá encontrarse en manual (MAN). En realidad la función es una prueba de lazo abierto para obtener una curva de reacción de proceso, ver figura 50. Estos datos son luego analizados por EXACT para calcular los seis parámetros claves.

TABLA 4.1
SIGNIFICADO DE LOS PARAMETROS EXACT

PARAMETROS	SIGNIFICADO
MODES PF MODES IF MODES DF	Valores de banda proporcional, integral y derivativa utilizadas por el controlador, durante las acciones de control EXACT no sido configurado o no está implementando. Estos son también los valores iniciales de MAIN P, MAIN I y de MAIN D.
EXACT STATE	Deberá ser implementada la sintonización EXACT si o no (ON o OFF)?
EXACT MAIN	Son los 18 parámetros comprendidos en el Algoritmo EXACT.
MAIN P1 MAIN I1 MAIN D1	Último valor actualizado para las acciones proporcional, integral y derivativa que el controlador está utilizando los valores originales vinieron de MODES PF, IF, y de DF.
MAIN PK1 MAIN PK2 MAIN PK3	Magnitudes de la última serie de picos de error. ERROR es la diferencia entre la medición y el punto de ajuste (set point)
MAIN TPK1 MAIN TPK2 MAIN TPK3	Intervalos de tiempos reales entre la última serie de picos de error. (Perturbación a PICO 1, Pico 1 a PICO 2 y Pico 2 a PICO 3).
MAIN ERROR	ERROR. Diferencia entre la variable medida y el punto de ajuste.
MAIN N.B.	BANDA DE RUIDO. Banda de error (+/-) dentro de la cual el proceso será controlado por los último valores de P, I, y D. Cuando el error exceda 2 x NB, se iniciará la acción correctiva. (EXACT arranca a monitorear picos)
MAIN WMAX	Tiempo máximo de espera entre Pico 1 y Pico 2.
MAIN DMP	Amortiguación (DAMPING). Cantidad de amortiguación deseada en la señal medida.
MAIN OVR	Sobrerrango (over shooting). Cantidad deseada de sobrerrango en la medición.

PARAMETROS	SIGNIFICADO
MAIN CLM	LIMITADO - RETENIDO (CLAMP). Factor por el cual son multiplicados los valores de PF o IF para establecer los valores máximos y mínimos de P y de I en EXACT.
MAIN DFCT	FACTOR DE DERIVATIVA. Factor por el cual se multiplica MAIN D.
MAIN LIM	LIMITE. Si la salida está oscilando por más de 3 minutos, el controlador será desintonizado aumentando el valor de P y disminuyendo el valor de D.
MAIN BUMP	Cantidad de perturbación utilizada en la función de PRETUNE. Expresada como porcentaje de la señal de salida (+/- %)
EXACT STATUS	El estado en que se encuentra los diferentes parámetros afectados durante la acción correctiva.
STATUS ENT	La razón por la cual fue tomada una determinada acción. 18 diferentes mensajes se encuentran disponibles.
STATUS STUN	Auto-ajuste (Self-Tune). Un paso específico acaba de ser completado durante la acción correctiva. Once diferentes pasos se encuentran disponibles.
EXACT PTUN	Función de PRE-AJUSTE (PRETUNE). Método para obtener los valores iniciales de los 6 parámetros claves de EXACT, si es que no se conoce los detalles del Proceso.
PTUN STATE?	Se deberá implementar la función de Pre-Ajuste. Si o No?
PTUN READ	Se acaba de completar un determinado paso de Pretune. Hay nueve mensajes disponibles.
MODES EXACT	EXACT ha sido configurado (no necesariamente implementado)

TABLA 4.2
VALORES DE LOS PARAMETROS DE EXACT

Los parámetros* estan listado en la misma secuencia con la que aparecen en el Display

PARAMETROS	LIMITES DE PARAMETROS	CONFIGURACION STANDARD	CONFIGURACION POR EL USUARIO
MODES PF	1 Y 8000%	200%	-----
MODES IF	0.20 Y 200 MIN	2 MINUTOS	-----
MODES DF	0 Y 100 MIN	0 MINUTOS	-----
MODES EXACT EXACT STATE	ON o OFF	OFF	----ON----
EXACT MAIN MAIN P	1 Y 8000%	**	-----
MAIN I	0.01 Y 200 MIN	**	
MAIN D	0 Y 100 MIN	**	
MAIN PK1	-102 Y +102%		
MAIN PK2	-102 Y +102%		
MAIN PK3	-102 Y +102%		
MAIN TPK1	WMAX		VALORES QUE SON DETERMINADOS POR EL PROCESO
MAIN TPK2	WMAX		
MAIN TPK3	WMAX		
MAIN ERR	-102 Y +102%		
MAIN NB	0.5 Y 30%	2%	-----
MAIN WMAX	0.5 Y 200 MIN	5 MINUTOS	-----
MAIN DMP	0.1 Y 1	0.3	-----
MAIN OVR	0 Y 1	0.5	-----
MAIN CLM	1.25 Y 100	10	-----
MAIN DFCT	0 Y 4	1	-----
MAIN LIM	2 Y 80%	80%	-----
MAIN BUMP	-50 Y +50%	8%	-----
EXACT STATUS STATUS ENT	(10 MENSAJES)	INIT	<u>(Sin entrada)</u>
STATUS STUN	(11 MENSAJES)	MANUAL	<u>(Sin entrada)</u>
EXACT PTUN PTUN STATE	ON o OFF	OFF	OFF ***
PTUN READ	(9 MENSAJES)	OFF	<u>(Sin entrada)</u>

- * Después de que EXACT ha sido configurado (en COFIG.CTLR. Posición 22), los parámetros cuyo listado aparece arriba son especificados. (Posición 19A TUNE MODES). Estos parámetros también pueden ser especificados en la posición 14 OPTUNE MODES, si es que el controlador ha sido configurado en SHOWOP MODES, posición 20.
- ** Los valores iniciales de MAIN, P, I y D son los mismo que los MODES PF, IF y DF. Luego EXACT actualizará continuamente estos valores de MAIN.
- *** PTUN STATE - (Estado de PRE AJUSTE) normalmente sera apagado OFF. Cuando el usuario comienza a usar la función de Pretune, el controlador le pedirá que lo encienda ON. Después que la función de Pre-Tune ha sido completada, automáticamente se apaga OFF.

4.4 Sistema de transmisión de señales analógicas

En general, el sistema de transmisión consta de cinco componentes: un dispositivo de medición, un transmisor que convierte la señal de medición en una señal apropiada para transmitirla y que presenta esta señal al medio de transmisión, una trayectoria de transmisión, un dispositivo receptor que traduce la señal transmitida en una señal que sea aceptable para el dispositivo final o de presentación. Casi todos los sistemas de transmisión asociados con sistemas de control de proceso son de tipo fijo de ubicación a ubicación. Casi todos ellos utilizan conductores fijos eléctricos como medio de transmisión. La distancia de transmisión varía de varios centímetros hasta miles de metros. No obstante, con el uso cada vez mayor de la electrónica de estado sólido y circuitos integrados, estas mediciones se están mejorando, transformando y transmitiendo en otras formas, haciendo más eficientes, flexibles y versátiles a los sistemas de transmisión de señales.

La señal analógica es continuamente variable en una gama específica, y, la magnitud de la señal representa el valor numérico de la variable transmitida. El tipo más común de transmisión analógica de proceso es la electrónica.

4.4.1 Métodos electrónicos de transmisión analógica

Los sistemas eléctricos de transmisión analógica utilizan alguna forma de señal eléctrica para representar el valor transmitido. Los tipos más comunes de

representación emplean corriente, voltaje, cambio de fase o frecuencia. Solo se tratará los dos primeros tipos de representación.

■ **Transmisión de Corriente.** Un sistema de transmisión de corriente eléctrica emplea normalmente una corriente continua proporcional a la variable transmitida. Las gamas de corriente mas comunes para el control de procesos son de 1 a 5, de 4 a 20 y de 10 a 50 mA. La trayectoria de transmisión es un circuito de dos conductores que pueden recorrer una distancia relativamente grande. El dispositivo trasmisor de la corriente puede ser un transmisor de flujo, presión, nivel o temperatura, una computadora analógica o un convertidor digital a analógico. La fuente de energía puede formar parte del transmisor o del receptor, o bien, ser una unidad independiente.

En la figura 51 se presenta la ilustración de dos circuitos de corriente (Two-wire y Four-wire transmitter).

En general, los métodos de transmisión de corriente son muy eficaces, ya que no son afectados por cambios pequeños en la impedancia de la línea y el receptor. La señal de corriente de alto nivel resulta menos afectada aun por los ruidos captados, que algunos de otros sistemas eléctricos.

Características de una fuente de señal de corriente análoga:

- Señal de 4 a 20 mA.
- Cables apantallados.
- Límite de Ancho de banda a 10 Hz

- Precisión 0.5%
- Nivel promedio de ruido industrial

Longitudes de cables que puede ser usado con éxito de 300 a 1500 m.

■ **Transmisión de una señal de voltaje.** En casi todos los sistemas de transmisión analógica de voltaje, la señal se representa mediante un voltaje de c.c. proporcional a la variable transmitida. Puesto que la señal de voltaje se atenúa por medio de la impedancia de la línea de transmisión, no es aconsejable utilizar transmisiones de voltaje en c.c. a largas distancias. En la figura 52 se ilustra un sistema de transmisión de voltaje. Nótese que la alta impedancia de entrada del receptor reduce el efecto de la impedancia de la línea de transmisión, pero incrementa la importancia de la capacitación de corrientes dispersas, ya que el nivel de la corriente de línea es reducido.

Los dispositivos de transmisión de voltaje, se usan para transferir muchos tipos de mediciones de procesos a lugares remotos. Si se tiene el cuidado debido en el blindaje y la conexión a tierra, se llega incluso a transmitir con todo éxito señales de unos cuantos milivots. Por ejemplo, una operación muy común es la medición directa de voltajes de termopar en el centro de control, cuando los termopares están situados a distancias considerables de dicho centro. Características de una fuente de señal de voltaje análoga:

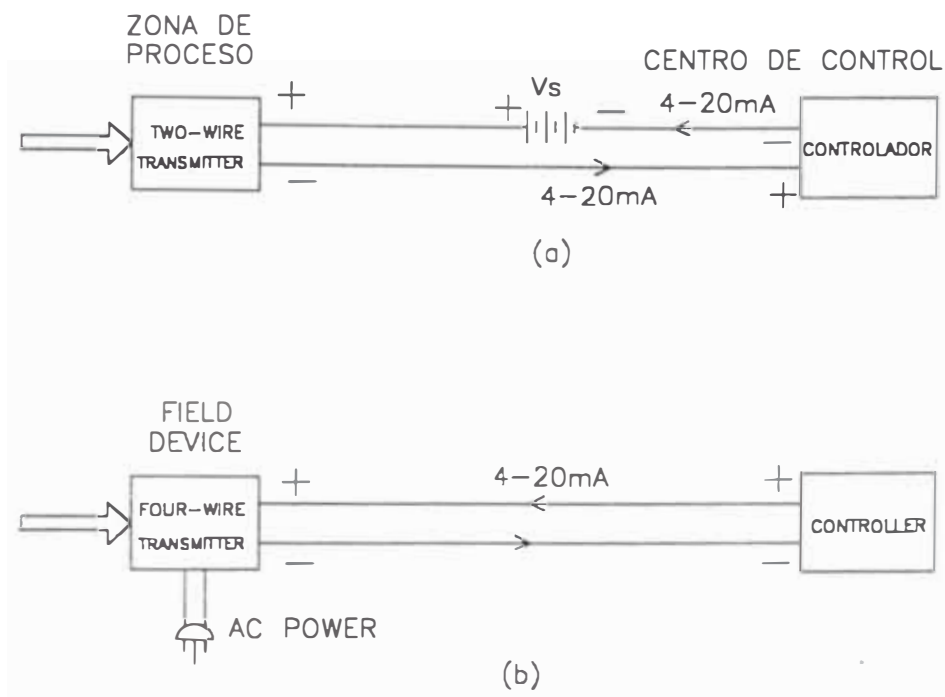
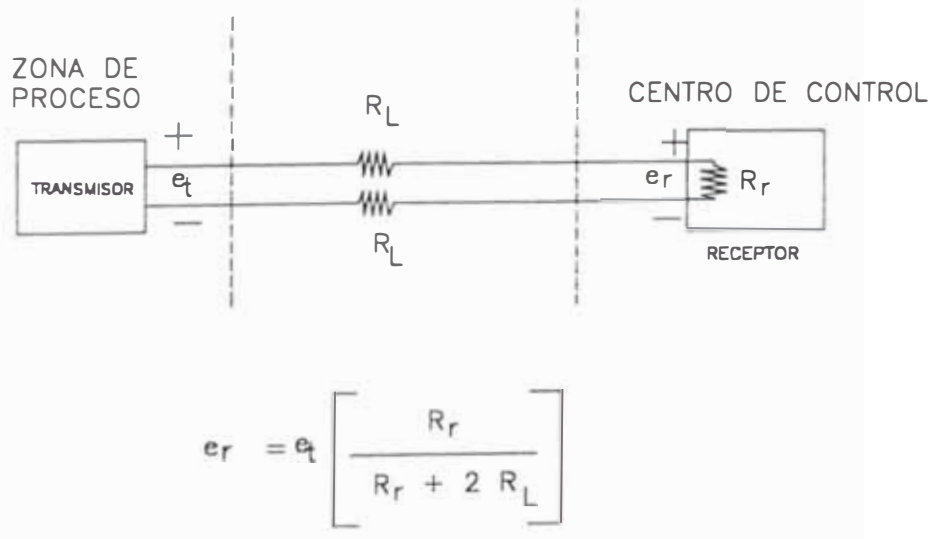


Figura 51. Circuitos Two-Wire, Four - Wire Transmitter



Donde:
 e_t = voltaje transmitido
 e_r = voltaje recibido
 R_L = reververancia de la linea de transmision
 R_r = reververancia de entrada del receptor

Figura 52. Sistema de Transmisión de Señal de Voltaje

Señal +1 a + 10 volt.

Cables apantallados.

Límites de Ancho de Banda a 10Hz.

Presión 0.5%.

Nivel promedio de ruido industrial.

Longitud de cable que puede ser usado con buen resultado de 15 a 90 m.

Características de una fuente de señal de voltaje análogo:

Señal de 10mv a 1 volt.

Cables apantallados.

Límite de ancho de banda a 10Hz.

Presión 0,5%.

Nivel promedio de ruido industrial.

Longitud de cable de 1.5 a 30 m.

4.4.2 Interferencia en la transmisión eléctrica

El propósito de la transmisión de señales eléctricas es enviar información exacta de un lugar a otro. Si la interferencia evitable se agrega a la señal que se está transmitiendo, en ocasiones es preciso utilizar medios complejos para separar la señal de la interferencia. Generalmente se considera mejor evitar la adición de interferencia a la señal, que suprimir sus efectos en la misma. En el caso de los sistemas de control, la interferencia puede degradar la calidad del mismo y, por lo tanto, los beneficios derivables del proceso. La supresión del ruido por medio de prácticas correctas de cableado,

pueden representar también una contribución importante en el costo del sistema de control.

En sistemas de control electrónico tradicional, gran parte de la interferencia se elimina utilizando filtros de paso bajo. Un ejemplo típico de circuito de control electrónico tradicional sólo puede responder o dar paso a un ruido o señal con frecuencias que varían desde la típica de C.C. hasta pocos ciclos por segundo.

Los sistemas de control con computadora o controlador digital tienen características muy distintas si se les compara con los sistemas de control tradicionales. La porción analógica de la entrada de un sistema de entrada-salida es, casi siempre, un sistema de alta precisión y alta velocidad, que muestrea cada señal analógica de entrada durante una fracción o un microsegundo, o bien, cuando mucho, unos cuantos milisegundos. El convertidor analógico a digital en el sistema de entrada-salida convertirá cualquier voltaje que presente a través de la medición analógica y el sistema de transmisión durante este breve lapso de muestreo de datos, sea cual fuere el contenido de ruido de la señal. Por ende, es preciso suprimir el ruido en el sistema de medición y transmisión si se desea tener la certeza de datos de entrada exactos para el control, por medio de una computadora o controlador digital.

■ Interferencia externa e interna al receptor de señal

La interferencia externa es una señal indeseable que se

genera en serie con la señal deseada. En otras palabras, la interferencia externa aparece en las terminales de entrada del receptor de la señal. El ruido en el nodo normal se reduce casi siempre filtrando cada señal antes de suministrarla al controlador.

La interferencia interna es una señal que existe igualmente entre un punto de referencia eléctrico, por ejemplo, la tierra, y ambas terminales de entrada del receptor de la señal. La interferencia interna se reduce usando el blindaje apropiado, la conexión adecuada a tierra de dicho blindaje y usando receptores de señal que tengan entradas diferenciales. El blindaje y la conexión a tierra se deben aplicar a cada medición de señal y sistema de transmisión.

■ Fuentes de Interferencia y como eliminarlas

Las tres principales fuentes de interferencia eléctrica son los campos electrostático y electromagnético, instrumentos y sensores, y problemas de conexiones a tierra.

Los campos eléctricos y magnéticos se crean por acción de todos los dispositivos eléctricos y su cableado correspondiente. La captación de interferencia proveniente de esas fuentes se puede evitar manteniendo un espaciado adecuado entre las fuentes de interferencia y las líneas de señal, usando pares de alambre torcido para el cableado de la señal, haciendo que los cruces del alambrado de energía y equipo eléctrico de recepción formen

ángulos rectos, y proporcionando un campo magnético para el alambrado de la señal.

El alambrado de la señal y el de alimentación o energía no se debe entremezclar en el mismo cable, ducto (conduit) o tablero de alambrado. La separación adecuada entre los tableros de alambrado de la señal y los de alambrado de alimentación varía de un mínimo de 30cm. para 10Amp, en circuitos de potencia, hasta un mínimo de 4 pies para circuitos de alimentación de 800Amp.

Los instrumentos y sensores que alimentan un sistema de control, sobre todo cuando se trata de un sistema de control por computador o controlador digital, puede producir ruido por varias razones, tales como una conexión a tierra mal hecha, fuentes de alimentación ruidosas, sensibilidad a la vibración, captación electrostática, captación electromagnética, conexiones deficientes y las fem térmicas. Por lo común, estos problemas de ruido se reducen cuando se comprende perfectamente el funcionamiento de los dispositivos, y teniendo un cuidado extremo en su instalación y mantenimiento.

Los potenciales a tierra y las corrientes de circuito a tierra son quizá los que causan mas problemas de ruido que cualquier otra fuente de esta naturaleza. Para reducir los problemas de conexión a tierra, se debe establecer una tierra para el sistema, y establecer su referencia (conexión) a tierra firme en un solo punto. Luego, cada circuito eléctrico deberá conectarse a la tierra del

sistema en un punto. Se debe tener cuidado al elegir el tamaño de cable para la conexión a tierra, para tener la certeza de que en realidad se encuentra al potencial de tierra. El flujo de la corriente en el alambrado a tierra genera una caída de voltaje, y la magnitud de esta caída de voltaje debe ser baja. En la figura 53 se ilustra un lazo de tierra (Ground loop) establecido correctamente para evitar la interferencia por potenciales de tierra y corrientes a tierra.

4.4.3 Técnicas de alambrado

Además de las técnicas antes citadas para suprimir la interferencia eléctrica, la regla del alambrado para la señal depende de la naturaleza de la misma.

Las señales analógicas de entrada y salida de alto nivel, ya sean señales de voltaje o corriente, se deben portar utilizando alambrado de par torcido. Se requiere un blindaje adecuado si los tramos son largos o si se tienen problemas de potencial de tierra.

Las señales analógicas de entrada de bajo nivel requieren un cuidado considerable, durante el cableado. Se deben conectar con pares individuales blindados torcidos, con una cubierta aislante sobre el blindaje.

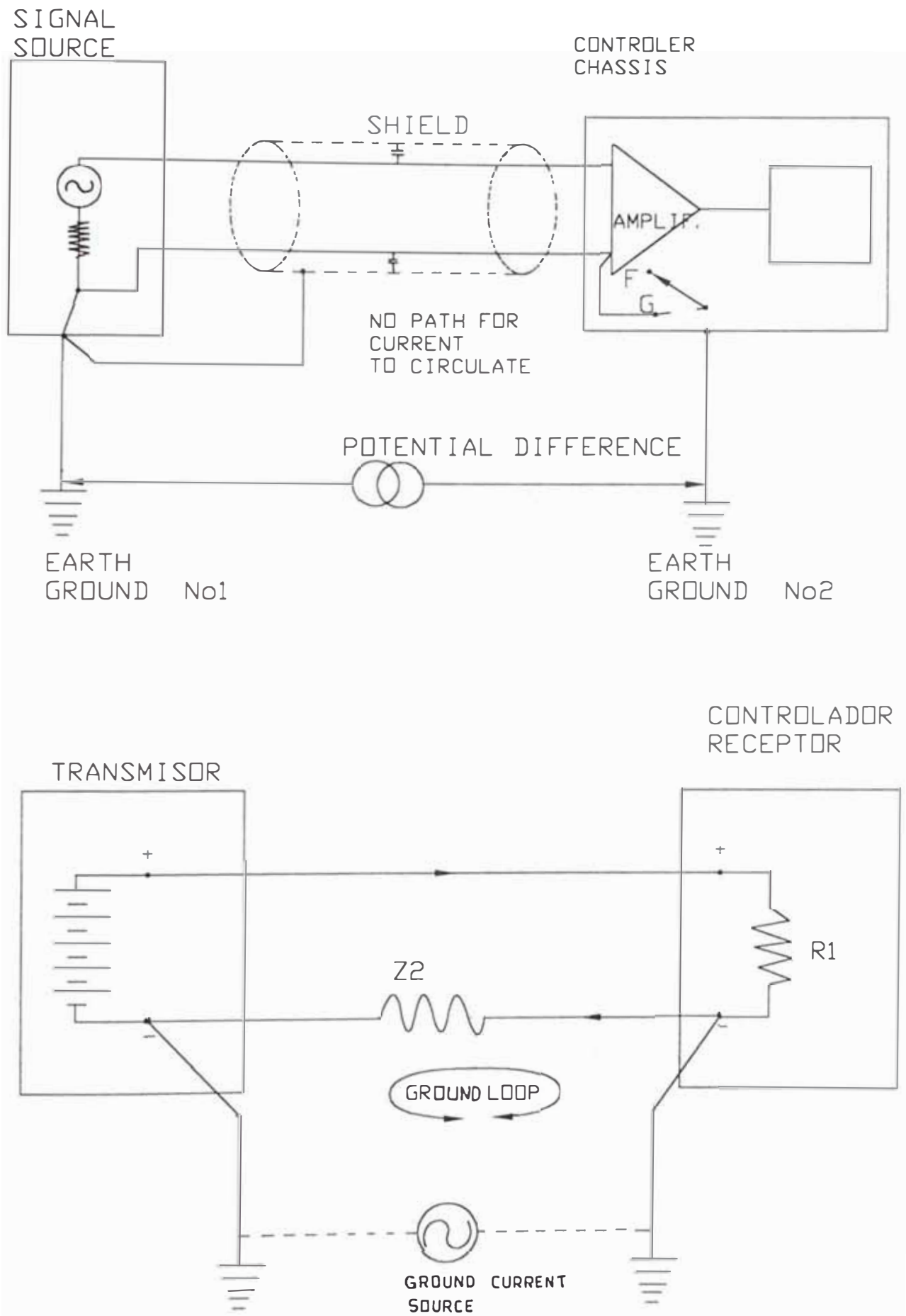


FIG. 53. Lazo de corriente de tierra

**CAPITULO V
COSTOS**

Los costos estimados del suministro de Equipos y Servicios de Ingeniería para la implementación del Sistema de Control propuesto se detallan en los siguientes rubros:

I. SUMINISTRO DE EQUIPOS

En este rubro se consideran los costos de equipos de instrumentación tales como elementos de medición, elementos de control final y controlador. En el cuadro siguiente se resumen los costos de equipamiento.

ITEM	DESCRIPCION	CANT	PRECIO UNITARIO \$	PRECIO TOTAL \$
	ELEMENTOS DE MEDICION:			
1	Medidor de Flujo Medio: Slurry minero Tipo : Magnético Rango Flujo: 35-600 GPM Diám.: 4" Conexión: Bridado	1	3500.00	3500.00
2	Medidor de Flujo Medio: Agua Tipo : Magnético Rango Flujo: 20-300 GPM Diám.: 3" Conexión: Bridado		2400.00	2400.00

Continuación...

ITEM	DESCRIPCION	CANT	PRECIO UNITARIO \$	PRECIO TOTAL \$
3	Medidor de Nivel Medio: Slurry minero Tipo : Ultrasónico Rango: 0 - 10 m.	1	800.00	800.00
4	Medidor de Presión Relativa Medio: Slurry Tipo : Tubo Bourdon con diafragma sellado Rango: 0 - 15 psi		200.00	200.00
5	Medidor de Densidad Medio: Slurry minero Tipo : Radiactivo Rango Densidad: 0-10 g/ml Precisión: ± 0.002 sgu (2g/l) Temperatura de operación: 0-60°C Diámetro de Tubería: 4"	1	7000.00	7000.00
	ELEMENTOS DE CONTROL FINAL:			
6	Válvula de Control Neumática Medio: Agua de Proceso Tipo : Mariposa CUERPO Diam.Nom: 3" Material: 316 SS Presión Nom: clase 150ANSI Montaje: Bridas ACTUADOR Tipo: Neumático Diafragma: Neoprene Posición de falla: Cerrado Alimentación: 3 a 15 psi POSICIONADOR Tipo: Electroneumático Señal de Entrada de control : 4 a 20mA	1	3500.00	3500.00

Continuación...

ITEM	DESCRIPCION	CANT	PRECIO UNITARIO \$	PRECIO TOTAL \$
7	<p>Señal de salida a actuador : 3 a 15 psi Alimentación: 0 a 45 psi</p> <p>Variador de Velocidad Aplicación: Regulación de velocidad del motor AC de la bomba</p> <p>Rango de Velocidad: 100- 350r.p.m. Voltaje: 440VAC, 50/60HZ Potencia: 50 Hp</p>	1	3500.00	3500.00
8	<p>Sistema de Pesaje Continuo de material en faja. Medio: Mineral Seco Capacidad: 300 TM/D</p> <p>CONTROLADOR</p>	1	12000.00	12000.00
9	<p>Controlador Digital SINGLE STATION MICRO CONTROLLER Marca :FoxBoro Modelo :760 Señal de entrada :0/4 a 20 mA Señal de salida :4 a 20 mA Control :PID, Sistema Experto Adaptivo Nº de Lazo de control: 1 Interfaz:Teclado, display digital y gráfico Comunicación: con otros 760 y PC vía RS-485 Alimentación: 220 VAC, 50/60 hZ</p>	4	2600.00	10400.00
PRECIO F.O.B TOTAL:				\$ 43 300.00

NOTA: Por materiales o accesorios anexos como: cables, conectores, tuberías o conductos, soportes, cajas de conexión, tableros o gabinetes para controladores entre otros, se estima un costo del 15% del monto total del suministro de equipos.

II. SERVICIOS DE INGENIERIA Y MANO DE OBRA CALIFICADA

Para una rápida y eficiente implementación de un proyecto de modernización del sistema de control de un proceso, se realiza las siguientes fases principales del proyecto, siendo:

FASE	TRABAJOS	DURACION (días)	COSTO H-H (\$)	COSTO TOTAL (\$)	PERIODO DURACION (semanas)
	INICIO DEL PROYECTO	2	45	720	1/3
2	INGENIERIA BASICA	4	35	1120	2/3
3	INGENIERIA DE DETALLE	6	40	1920	1
4	INTEGRACION Y PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL	3	30	720	1/2
5	PRUEBA DE ACEPTACION	4	30	960	2/3
6	INSTALACION, PUESTA EN MARCHA Y AJUSTE DEL SISTEMA	7	45	2520	7/6
7	CIERRE DEL PROYECTO	4	20	640	2/3
TOTAL				8600	5

III. RESUMEN DE COSTOS DEL SUMINISTRO

SUMINISTRO DE EQUIPOS	\$ 43300.00
SERVICIOS DE INGENIERIA Y MANO DE OBRA CALIFICADA	8600.00
SUMINISTRO MATERIALES	6495.00
TOTAL GENERAL:	\$ 58395.00

IV. RETORNO DE INVERSION

El monto de inversión total estimado para la implementación del sistema del control, es recuperado en el lapso de 1.5 meses.

CONCLUSIONES

- 1) En la molienda en circuito, el clasificador permite obtener un producto con una distribución de tamaño más uniforme y óptimo que lo que se tendría mediante el funcionamiento en circuito abierto continuo, devolviendo al molino las partículas gruesas no acabadas para que sufran una trituración adicional. Además, gradúa la descarga del molino de modo que solo salga del circuito el material del tamaño deseado en el producto acabado que rebosa.
- 2) Para que la reducción de tamaño sea más económica y rentable, se concluye que, en una primera fase, es importante un buen chancado, ya que es más barato chancar que moler.
- 3) Se ha visto que la eficacia, eficiencia y aplicación de un sistema de control en lazo abierto para reducir los efectos de las perturbaciones sobre las variables del proceso es restringida e ineficiente, en comparación con la que se obtiene un lazo cerrado, que si ofrece performance en las características de control, mejorando el comportamiento de la respuesta de las variables controladas. Estas Técnica de Control, se hace importante por la rama de

realimentación que permite supervisar continuamente en el tiempo el estado de la variable controlada, con el propósito de mantener en el valor deseado. Por consiguiente de mantener en el valor deseado. Por consiguiente, en un proceso en donde ocurren continuamente alteraciones en las variables, como es el caso del proceso minero, se requiere implantar sistemas de control en lazo cerrado (FEEDBACK) para hacer en lo posible, inmune al proceso de las perturbaciones, lográndose asegurar un óptimo rendimiento productivo.

- 4) El controlador como parte fundamental del lazo de control, logra, mediante la variación o ajustes de sus parámetros PID modificar el comportamiento dinámico de las variables de un proceso. Es por eso que las variables con comportamiento de 1er. orden o sobre amortiguadas pueden ser llevadas a respuestas con comportamiento de 2do. orden con cierto grado de amortiguamiento en su desarrollo, permitiéndose así, manipular y regular los parámetros de la respuesta de la variable para adaptarla al comportamiento deseado.
- 5) Las técnicas de estimación por su simplicidad no facilitan un conocimiento a fondo del proceso, pero sí una aproximación a sus características más significativas. La utilización de estas técnicas pueden suponer un ahorro de tiempo en la puesta en marcha de una planta o un mayor rendimiento del

sistema de control, por lo que son muy recomendables. Las fórmulas de sintonía no suelen dar resultados totalmente satisfactorios. No obstante, son muy útiles en la presintonía del controlador, ya que el operario siempre tiene la posibilidad de realizar pequeños ajustes entorno a los parámetros determinados, hasta conseguir la respuesta adecuada del sistema en lazo cerrado.

Los métodos empíricos de sintonía no constituyen la solución completa al problema (ajuste de parámetros en controladores PID) sino una primera aproximación a los valores óptimos, con los consiguientes ahorro de tiempo y calidad de control. No obstante, siempre existe el problema de que, cuando cambien las condiciones dinámicas del proceso, dejen de ser adecuados los parámetros fijados anteriormente, y sea necesario repetir la sintonía. Una solución a este problema son los métodos de autosintonía o sistemas expertos adaptivos.

- 6) Se observa una importante evolución de los Controladores Digitales Autónomos que pueden resumirse en una excelente y gran funcionalidad técnica a pesar de su reducido tamaño físico y reducido precio constituye las razones más importantes que justifican su implantación actual y futura en la gama baja de los sistemas de control de procesos.

- 7) Al emplearse la sintonización EXACT del controlador digital 760 de Foxboro se demuestra que:
- El algoritmo EXACT es robusto y es apto para todos los procesos.
 - El algoritmo no usa un modelo matemático (simple o complejo arbitrario).
 - El usuario solo selecciona el tipo de respuesta esperada del lazo.
 - Como mínimo el usuario decide la acción del controlador (Dir o Inv.).
 - El algoritmo baja sustancialmente los costos operativos de los lazos implementados.
- 8) La performance de los equipos electrónicos es óptima, las que se pueden cuantificar por las paradas de plantas por ésta razón.
- 9) Es conveniente destacar el desarrollo tecnológico y en especial la electrónica que permite transducir, medir transmitir, controlar, calcular, simular, almacenar, manipular y mediante las estrategias de control optimizar operaciones y procesos. Todo éste, conjunto de "know How" tiene altos costos en nuestro país. Por tal razón, las empresas deben dentro de las razonables posibilidades ir captando, desarrollando tecnologías en asociación con compañías especializadas y formar cuadros de profesionales para el soporte.
- 10) Existen diversas funciones y opciones para implementar el control y automatización; toda decisión al respecto

debe basarse en una adecuada evaluación técnico-económica.

- 11) Las tendencias futuras están orientadas hacia la automatización integral de plantas concentradoras y un aumento de la eficacia y eficiencia de los sistemas de control.

BIBLIOGRAFIA

- 1) MULAR BHAPU.- Diseño de Plantas de Proceso de Minerales, 2da. Edición, Ed. Rocas y Minerales.
- 2) A.J. LYNCH.- Circuitc de Trituración y Molienda de Minerales, vol. I.
- 3) ERROL G. KELLY.- Introducción al Procesamiento de Minerales, Ed. Noriega Limusa.
- 4) ANDREW L. MULAR, GERALD V. JERGENSEN.- Design and Installation of Comminution Circuits, Ed. Board, T.I/II.
- 5) I. QUIROZ NUÑEZ.- Ingeniería Metalúrgica.
- 6) F.G. SHINSKEY.- Process Control Systems, application/design/andjstment, second Edición, McGraw-Hill, 1979.
- 7) ANTONIO CREUS SOLE.- Instrumentación Industrial, Publicaciones Marcombo S.A., Segunda Edición : 1979.
- 8) CARLOS A. SMITH, ARMANDO B. CORRIPIO.- Control Automático de Proceso, Editorial Limusa, Primera Edición : 1991.
- 9) FOXBORO.- Technical Information, 760 series single station Micro Controller, 1987.
- 10) ALLEN BRADLEY.- Redefining Simplicity, Flexibility and Performance in an Ac Drive, Publication 1336 Plus-1.0 March 1994.
- 11) PAUL C. BADAVAS.- Process Automation Foxboro ChE, Frebruary 6, 1984, P 35.
- 12) Manual de Operación de Balanzas MERRICK MC² 2000 HP.
- 13) V.M. CHERKASSKI.- Bombas-Ventiladores-Compresores, Editorial MIR MOSCU, Edición 1992.
- 14) INGENIERIA MECANICA DE FLUIDOS U.N.M.S.M.- Seminario Bombas, Diseño y Construcción, Selección y Aplicaciones, Instalación y Operación, Diciembre 1996.