



OPERADOR DE CHANCADO Y MOLIENDA

Este curso proporciona los conocimientos esenciales para comprender y operar equipos de chancado y molienda de manera segura, eficiente y controlada dentro de una planta de procesamiento de minerales.

Los participantes aprenderán a reconocer los principales equipos y sus componentes, controlar las variables operativas, comprender los circuitos de chancado y molienda, interpretar parámetros e indicadores de operación, identificar condiciones anormales y aplicar prácticas básicas de inspección, limpieza, mantenimiento y seguridad, contribuyendo a la continuidad y eficiencia del proceso.

CURSO: OPERADOR DE CHANCADO Y MOLIENDA



CONTENIDO

Módulo 1. Fundamentos del Chancado y la Molienda

- 1.1. Principios de reducción de tamaño y características del mineral
- 1.2. Etapas del proceso de chancado y molienda
- 1.3. Granulometría y distribución del tamaño de partículas
- 1.4. Variables fundamentales del proceso
- 1.5. Flowsheet básico de una planta de chancado y molienda

Módulo 2. Operación de Equipos de Chancado

- 2.1. Chancadoras de mandíbula, giratorias y de cono
- 2.2. Componentes, funcionamiento y condiciones de operación
- 2.3. Alimentación, descarga y regulación de la abertura de chancado
- 2.4. Zarandas y clasificación en el circuito de chancado
- 2.5. Circuitos abiertos y cerrados de chancado
- 2.6. Problemas operativos, atascos y acciones correctivas

Módulo 3. Operación de Equipos de Molienda y Control del Producto

- 3.1. Molinos de bolas y molinos de barras
- 3.2. Componentes y funcionamiento de los sistemas de molienda
- 3.3. Variables de operación: alimentación, carga, velocidad y agua
- 3.4. Clasificación mediante hidrociclones y zarandas
- 3.5. Circuitos abiertos y cerrados de molienda
- 3.6. Control de la granulometría y calidad del producto
- 3.7. Muestreo del mineral y producto del proceso
- 3.8. Preparación, identificación y manejo de muestras operativas
- 3.9. Problemas frecuentes y acciones correctivas

Módulo 4. Instrumentación, Automatización y Control del Proceso

- 4.1. Instrumentación básica aplicada a chancado y molienda
- 4.2. Sensores de nivel, presión, flujo, temperatura y velocidad
- 4.3. Balanzas y sistemas de medición de alimentación y producción
- 4.4. Variadores de frecuencia (VFD) y control de velocidad de equipos
- 4.5. Sistemas de control y monitoreo SCADA
- 4.6. Alarmas, tendencias y parámetros operativos

4.7. Interpretación básica de información del sistema de control

Módulo 5. Seguridad, Mantenimiento Operativo y Gestión de Datos

5.1. Identificación de peligros y evaluación de riesgos en chancado y molienda

5.2. Bloqueo y etiquetado de equipos (LOTO)

5.3. Inspección, limpieza y mantenimiento operativo básico

5.4. Detección de condiciones anormales y comunicación de fallas

5.5. Bitácora de turno y registro de parámetros operativos

5.6. Reportes de producción, incidencias y consumo de insumos

5.7. Indicadores básicos de operación y desempeño del proceso

Módulo 1. Fundamentos del Chancado y la Molienda

1.1. Principios de reducción de tamaño y características del mineral

La reducción de tamaño es una de las operaciones fundamentales dentro de una planta concentradora, porque permite transformar el mineral extraído de mina en partículas de tamaño adecuado para las etapas posteriores de concentración. En un circuito de procesamiento de minerales, el chancado y la molienda no tienen como objetivo simplemente producir un material cada vez más fino. Su finalidad principal es **liberar los minerales de valor contenidos en la roca y obtener una granulometría compatible con el proceso de concentración seleccionado**, utilizando de manera eficiente la energía, los equipos y la capacidad instalada.



El operador de chancado y molienda debe comprender que el comportamiento del mineral determina, en gran medida, la respuesta del circuito. Dos minerales con el mismo tamaño de alimentación pueden presentar comportamientos completamente diferentes debido a sus características físicas, mineralógicas y estructurales. La dureza, resistencia, abrasividad, humedad, distribución granulométrica, mineralogía, presencia de arcillas y grado de alteración influyen directamente en el rendimiento de chancadoras, molinos, zarandas, clasificadores, bombas y demás equipos asociados.

La reducción de tamaño comienza normalmente en mina, donde el mineral es fragmentado mediante perforación y voladura. El material obtenido puede presentar bloques de gran tamaño que no son adecuados para ingresar directamente a los equipos de procesamiento.

Por ello, el mineral pasa por diferentes etapas de reducción hasta alcanzar una granulometría apropiada. De manera general, el **chancado** se utiliza para obtener reducciones importantes de tamaño mediante esfuerzos de compresión, impacto o una combinación de ellos, mientras que la **molienda** continúa la reducción hasta tamaños mucho menores, generalmente utilizando molinos donde intervienen mecanismos de impacto, abrasión y fricción.

El proceso debe realizarse de manera gradual. Intentar obtener una reducción excesiva en una sola etapa puede incrementar considerablemente el consumo de energía, producir una cantidad innecesaria de partículas ultrafinas y generar sobrecargas en los equipos. Por esta razón, las plantas concentradoras utilizan circuitos compuestos por varias etapas de chancado y molienda, acompañadas por operaciones de clasificación y transporte.

Fundamentos de la reducción de tamaño

La reducción de tamaño consiste en aplicar fuerzas mecánicas sobre el mineral hasta producir la fractura de las partículas. Cuando la fuerza aplicada supera la resistencia interna de la roca, se generan grietas que se propagan hasta producir la fragmentación.

Los principales mecanismos de fragmentación son la **compresión, impacto, abrasión y cizallamiento**. En la compresión, la partícula queda sometida a fuerzas que actúan desde lados opuestos y provocan su fractura. Este mecanismo es característico de diversos tipos de chancadoras. El impacto ocurre cuando una partícula recibe una fuerza de alta intensidad durante un período muy corto, como puede suceder en determinadas chancadoras y molinos. La abrasión produce desgaste progresivo de las superficies de las partículas por contacto y fricción, mientras que el cizallamiento ocurre cuando fuerzas opuestas actúan de manera que provocan un desplazamiento relativo dentro del material.

En la práctica, estos mecanismos no actúan necesariamente de forma aislada. El resultado depende del diseño del equipo, las características del mineral, la velocidad de operación, el tamaño de alimentación, la carga circulante y otras variables del circuito.

La energía necesaria para reducir el tamaño de un mineral aumenta conforme se busca una granulometría más fina. Por esta razón, la molienda representa normalmente una de las operaciones de mayor consumo energético de una planta concentradora. Desde el punto de vista operacional, es fundamental evitar una molienda más fina de la necesaria. El objetivo no es producir el material más fino posible, sino alcanzar el tamaño que permita una adecuada liberación y recuperación del mineral de interés.

Características del mineral que influyen en el proceso

El mineral alimentado a una planta no es un material homogéneo. Su comportamiento puede cambiar dependiendo del frente de explotación, banco, zona geológica, alteración, composición mineralógica y condiciones de extracción. El operador debe reconocer que las

variaciones en la alimentación pueden reflejarse rápidamente en las variables operacionales del circuito.

Una de las propiedades más importantes es la **dureza**. Un mineral duro requiere mayor energía para ser fragmentado y puede reducir la capacidad efectiva del circuito. También puede aumentar el desgaste de revestimientos, chancadoras, cuerpos molidores y otros componentes sometidos a contacto con el mineral. Por el contrario, un mineral de menor dureza puede ser procesado con menor consumo específico de energía, aunque otras propiedades, como la presencia de arcillas, pueden generar problemas diferentes.

La **resistencia mecánica** está relacionada con la capacidad del mineral para soportar esfuerzos antes de fracturarse. Un material puede presentar diferentes comportamientos dependiendo de su estructura interna y de la presencia de fracturas naturales. Un mineral muy fracturado puede fragmentarse con mayor facilidad durante el chancado, mientras que una roca masiva y competente puede requerir mayores esfuerzos.

La **abrasividad** también es una característica importante. Los minerales que contienen componentes duros y abrasivos pueden provocar un desgaste acelerado de revestimientos, placas, mantos, cóncavos, martillos, bolas y otros elementos. El desgaste modifica progresivamente las condiciones de operación y puede afectar la granulometría del producto. Por ello, el control del desgaste forma parte de la operación normal del circuito y no debe considerarse únicamente como una actividad de mantenimiento.

La **humedad** influye especialmente en las operaciones de chancado, zarandeo y transporte. Un exceso de humedad puede favorecer la adherencia del material, provocar acumulaciones, obstrucciones y dificultades en las zarandas, tolvas y chutes. En determinados minerales, la presencia de agua combinada con materiales finos o arcillosos puede generar una masa pegajosa que reduce la eficiencia de clasificación y transporte.

Las **arcillas** pueden presentar dificultades particulares. El material arcilloso puede adherirse a superficies, cubrir partículas, reducir la eficiencia de las zarandas y provocar problemas de flujo. Por esta razón, la presencia de arcillas debe ser considerada al evaluar el comportamiento del mineral y seleccionar las condiciones de operación.

Otra propiedad fundamental es la **densidad**. La densidad del mineral influye en el transporte, almacenamiento, alimentación y comportamiento de las partículas dentro de determinados equipos. También es relevante para los cálculos de tonelaje, volumen y capacidad de los circuitos.

Tamaño de alimentación y granulometría

La granulometría describe la distribución de tamaños de las partículas presentes en una determinada corriente de mineral. No basta con conocer el tamaño máximo de una

alimentación. También es necesario conocer cómo se distribuye el material entre diferentes rangos de tamaño.

El **tamaño máximo de alimentación** es especialmente importante para las chancadoras, porque cada equipo posee limitaciones respecto al tamaño de partícula que puede recibir. Una alimentación con bloques excesivamente grandes puede provocar atascos, esfuerzos anormales, reducción de capacidad o daños en componentes.

La distribución granulométrica también determina el comportamiento de las zarandas y clasificadores. Una corriente con una proporción elevada de finos puede comportarse de manera diferente a una alimentación compuesta principalmente por partículas gruesas. El operador debe observar estas variaciones y relacionarlas con los cambios registrados en el circuito.

En el chancado, normalmente se busca reducir progresivamente el tamaño del mineral mediante etapas sucesivas. Una primera etapa puede recibir el mineral proveniente directamente de mina y producir un material de tamaño intermedio. Posteriormente, etapas secundarias y terciarias pueden reducirlo aún más. La cantidad de etapas depende de las características del mineral, del tamaño requerido y del diseño de la planta.

La **razón de reducción** expresa la relación entre el tamaño de alimentación y el tamaño del producto. Esta relación permite evaluar cuánto se ha reducido el material durante una determinada etapa. Sin embargo, en una planta real no debe analizarse únicamente como una relación matemática, sino en conjunto con la capacidad, eficiencia, carga circulante, desgaste y características del producto.

Chancado y liberación del mineral

Uno de los conceptos fundamentales para el operador es la diferencia entre **reducción de tamaño y liberación mineralógica**. Una partícula puede ser pequeña y, sin embargo, contener todavía minerales de valor unidos a minerales de ganga. En ese caso, el mineral no se encuentra completamente liberado.

La liberación ocurre cuando las partículas de mineral de interés quedan suficientemente separadas de la ganga como consecuencia de la fragmentación. El grado de liberación requerido depende del tipo de mineral y del método de concentración posterior.

Si el mineral no se encuentra suficientemente liberado, la recuperación puede verse afectada. Sin embargo, una molienda excesiva tampoco es conveniente. La generación excesiva de partículas muy finas puede producir problemas de recuperación, aumentar el consumo energético y dificultar determinadas operaciones de concentración.

Por ello, el tamaño óptimo del producto no es universal. Cada mineral y cada proceso poseen condiciones particulares. El operador debe trabajar con los parámetros establecidos

por la planta y comprender que el objetivo es mantener una **granulometría controlada y consistente**, no simplemente reducir el tamaño al máximo.

Importancia de la clasificación

La reducción de tamaño está estrechamente relacionada con la clasificación. Después de una etapa de molienda, el material puede contener partículas de diferentes tamaños. Los clasificadores permiten separar las partículas de acuerdo con su comportamiento hidráulico o características granulométricas, dependiendo del equipo utilizado.

En circuitos de molienda con clasificación, las partículas que alcanzan el tamaño requerido pueden avanzar hacia las etapas siguientes, mientras que las partículas demasiado gruesas retornan al molino para continuar su reducción. Este retorno genera una **carga circulante**.

La clasificación permite evitar que todo el material permanezca innecesariamente dentro del molino. Una clasificación adecuada contribuye a utilizar mejor la capacidad de molienda y mantener el tamaño del producto dentro de los parámetros establecidos.

Relación entre mineral, energía y capacidad

Existe una relación directa entre las características del mineral y el desempeño del circuito. Cuando aumenta la dureza o resistencia del mineral, puede aumentar la energía necesaria para alcanzar una determinada granulometría. Si la alimentación cambia significativamente respecto a las condiciones de diseño, pueden aparecer variaciones en el tonelaje tratado, consumo energético, presión, potencia del molino, carga circulante y granulometría del producto.

El operador debe interpretar estas variaciones como parte del comportamiento normal del proceso. No todos los cambios de operación indican una falla del equipo. Algunas modificaciones pueden originarse en la propia alimentación.

Por ejemplo, un incremento de material grueso y duro puede producir una disminución de la capacidad de reducción y un aumento de la carga sobre determinados equipos. Un incremento de humedad o arcillas puede generar problemas de flujo y clasificación. Una alimentación con mayor proporción de finos puede modificar la respuesta de las zarandas y del circuito de molienda.

Por esta razón, el control operacional requiere observar simultáneamente la alimentación, los equipos y el producto.

Conceptos que debe dominar el operador

El operador de chancado y molienda debe comprender, como mínimo, los siguientes conceptos: tamaño de alimentación, tamaño máximo, granulometría, razón de reducción,

dureza, resistencia, abrasividad, humedad, densidad, presencia de arcillas, liberación mineralógica, consumo de energía, capacidad de tratamiento y carga circulante.

Estos conceptos permiten interpretar correctamente las condiciones del proceso. Una variación de granulometría no debe analizarse de manera aislada. Debe relacionarse con la alimentación, la configuración del equipo, la velocidad, la carga, el desgaste, la clasificación y las condiciones del mineral.

El conocimiento de las características del mineral también permite anticipar determinados problemas. Un mineral húmedo y arcilloso puede requerir especial atención en zarandas y chutes; un mineral muy abrasivo puede acelerar el desgaste; un mineral duro puede incrementar la demanda energética; y una alimentación con granulometría variable puede producir fluctuaciones en la capacidad y estabilidad del circuito.

En consecuencia, la reducción de tamaño debe entenderse como una operación integrada. El chancado, la clasificación, la molienda y el transporte forman parte de un mismo sistema. El desempeño de una etapa afecta a las siguientes y cualquier modificación significativa en la alimentación puede propagarse por todo el circuito.

El objetivo final es obtener un producto con la granulometría requerida para la siguiente etapa del proceso, manteniendo simultáneamente la capacidad de tratamiento, estabilidad operacional, eficiencia energética y disponibilidad de los equipos. Para conseguirlo, el operador debe conocer tanto el funcionamiento de los equipos como las características del mineral que está procesando.

La comprensión de estos principios constituye la base para operar correctamente los circuitos de chancado y molienda. A partir de este conocimiento, el operador puede interpretar las variables del proceso, reconocer desviaciones, actuar dentro de los procedimientos establecidos y contribuir a mantener una operación segura, estable y eficiente.

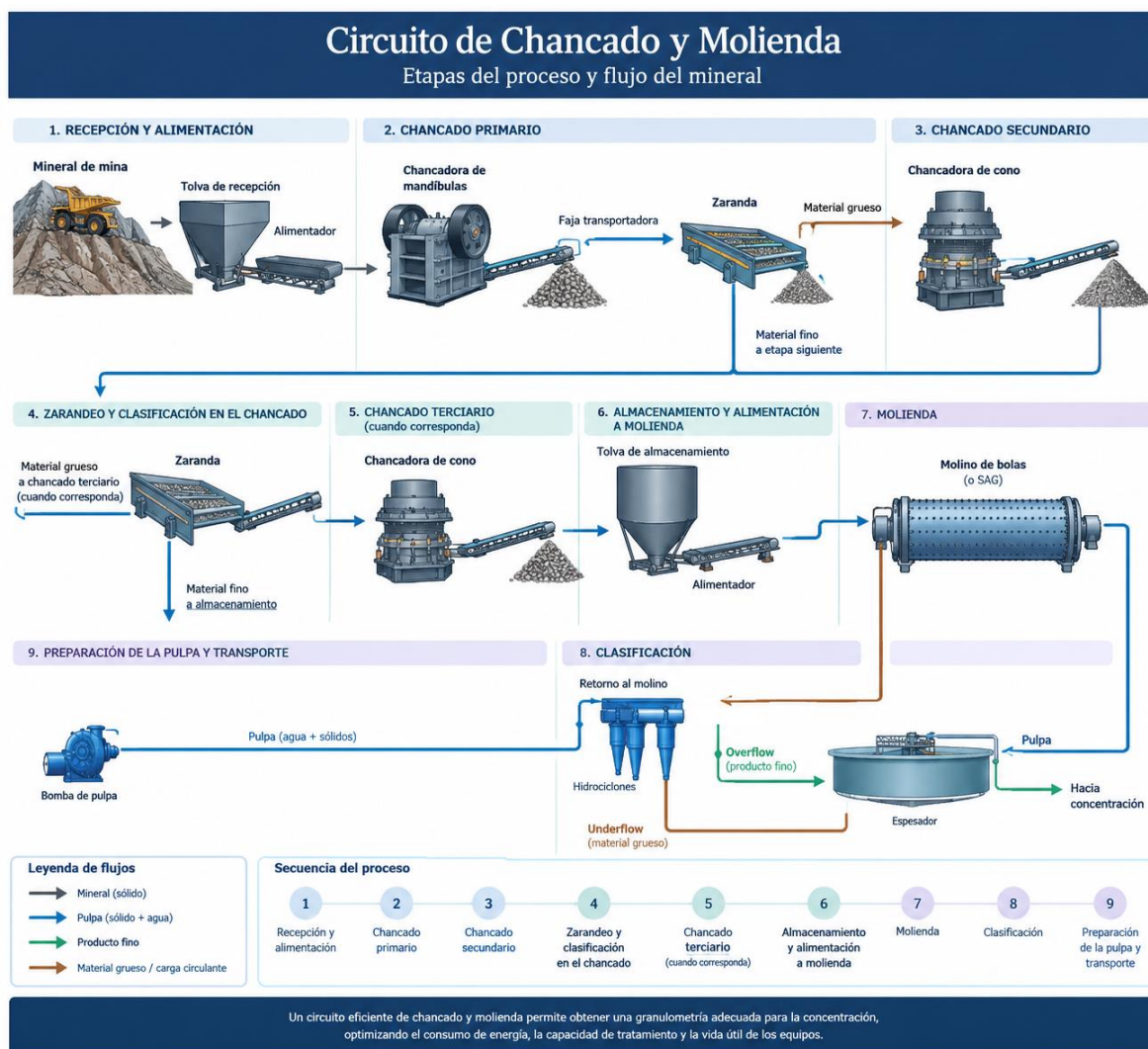
1.2. Etapas del proceso de chancado y molienda

El proceso de chancado y molienda comprende un conjunto de operaciones sucesivas destinadas a reducir progresivamente el tamaño del mineral hasta alcanzar una granulometría adecuada para las etapas posteriores de procesamiento. En una planta concentradora, estas operaciones no funcionan de manera independiente: están conectadas mediante tolvas, alimentadores, zarandas, fajas transportadoras, chutes, bombas, clasificadores y sistemas de control. La estabilidad de cada etapa influye directamente sobre las condiciones de operación de las etapas siguientes.

El circuito comienza con la recepción del mineral proveniente de mina y termina con la entrega de un producto molido y clasificado que cumple las condiciones requeridas para la concentración. La configuración exacta depende del tipo de mineral, capacidad de la planta, tamaño de alimentación, características de liberación y proceso metalúrgico utilizado. Por

ello, no todas las plantas presentan exactamente el mismo número de etapas ni utilizan los mismos equipos.

Para el operador, conocer la secuencia del proceso es fundamental. Permite comprender hacia dónde se dirige el mineral, qué función cumple cada equipo, cuáles son las principales variables de operación y cómo una desviación en una etapa puede afectar al circuito completo.



Recepción y alimentación del mineral

Antes de ingresar al circuito de chancado, el mineral extraído de mina debe ser recibido y alimentado de manera controlada. El mineral puede llegar mediante camiones, fajas transportadoras u otros sistemas de transporte y normalmente es descargado en una tolva de recepción o almacenamiento.

La tolva cumple una función importante porque permite desacoplar parcialmente la llegada del mineral desde mina de la alimentación continua hacia la planta. Desde la tolva, el material es extraído mediante alimentadores que regulan el flujo hacia el primer equipo de reducción.

El operador debe controlar que la alimentación sea continua y que no existan acumulaciones, obstrucciones o segregación excesiva del material. Una alimentación irregular puede generar fluctuaciones en la capacidad del chancado y provocar condiciones inestables en los equipos posteriores.

El tamaño máximo del mineral recibido constituye una variable crítica. Los bloques que superan la capacidad de recepción del equipo deben ser tratados de acuerdo con los procedimientos establecidos, normalmente mediante reducción secundaria autorizada. Nunca debe intentarse solucionar manualmente un atoro o intervenir un equipo en movimiento.

Chancado primario

El chancado primario constituye normalmente la primera etapa importante de reducción mecánica de tamaño. Su función es recibir el mineral de mayor tamaño proveniente de mina y reducirlo hasta una granulometría que pueda ser manejada eficientemente por las etapas siguientes.

Dependiendo del diseño de la planta, pueden utilizarse chancadoras de mandíbulas, giratorias u otros equipos apropiados para la alimentación y capacidad requerida.

En una chancadora de mandíbulas, el mineral es fragmentado principalmente mediante compresión entre una mandíbula fija y una mandíbula móvil. El movimiento de la mandíbula genera ciclos de apertura y cierre que permiten introducir, comprimir y descargar el material.

En una chancadora giratoria, la reducción se produce mediante la acción de un elemento móvil que gira dentro de una cámara de trituración. Estos equipos son utilizados habitualmente en operaciones de mayor capacidad.

El producto del chancado primario puede presentar una distribución amplia de tamaños. Por esta razón, normalmente no se considera que esta etapa por sí sola entregue el tamaño final requerido. El material continúa hacia las etapas secundarias o hacia sistemas de clasificación y almacenamiento intermedio.

El operador debe vigilar variables como alimentación, nivel de la cámara, potencia o carga del equipo, presencia de material extraño, vibraciones, temperatura de componentes y condición del producto. Los valores normales dependen de las especificaciones del fabricante y de los parámetros establecidos por la planta.

Transporte entre etapas

Después del chancado primario, el mineral es normalmente transportado mediante fajas, alimentadores u otros sistemas. El transporte forma parte integral del proceso porque permite mantener el flujo de mineral entre las diferentes operaciones.

Las fajas transportadoras deben operar con una carga compatible con su capacidad. Una alimentación excesiva puede producir derrames, sobrecarga y problemas mecánicos, mientras que una alimentación insuficiente puede reducir la utilización de la capacidad instalada.

El operador debe observar el centrado de la faja, condición de rodillos, limpiadores, empalmes, poleas, chutes y puntos de transferencia. Los derrames no deben ser ignorados, porque además de representar pérdida de material pueden generar riesgos de seguridad, daños a equipos y problemas ambientales.

Los sistemas de detección de desalineamiento, sensores de velocidad, cables de parada de emergencia y otros dispositivos de protección deben mantenerse operativos. Cualquier anomalía debe ser comunicada según los procedimientos establecidos.

Chancado secundario

El chancado secundario recibe el producto del chancado primario y continúa la reducción de tamaño. Su finalidad es producir un material suficientemente fino para alimentar las etapas posteriores del circuito.

Entre los equipos utilizados en esta etapa se encuentran las chancadoras de cono y otros tipos de chancadoras diseñadas para reducción intermedia. Las chancadoras de cono trabajan mediante compresión del mineral entre superficies de trituración.

La operación correcta depende de mantener una alimentación estable y compatible con la capacidad del equipo. Una alimentación deficiente puede provocar operación inestable, mientras que una alimentación excesiva puede generar sobrecarga.

La abertura de descarga y las condiciones de operación influyen directamente en la granulometría del producto. Una reducción excesiva de la abertura puede incrementar la cantidad de finos y elevar la demanda de potencia, mientras que una abertura demasiado grande puede producir un producto más grueso del requerido.

El operador debe comprender que cualquier ajuste de configuración debe realizarse únicamente de acuerdo con los procedimientos operacionales y parámetros definidos para el equipo. No corresponde realizar modificaciones improvisadas para compensar una desviación del proceso.

Zarandeo y clasificación en el chancado

El zarandeo permite separar el material de acuerdo con su tamaño. Las zarandas pueden instalarse entre diferentes etapas de chancado para retirar las partículas que ya cumplen con el tamaño requerido y enviar únicamente el material grueso hacia una etapa adicional de reducción.

Esta configuración puede mejorar la eficiencia energética del circuito porque evita chancar nuevamente partículas que ya poseen el tamaño adecuado.

En una zaranda, el material es distribuido sobre una superficie con aberturas determinadas. Las partículas menores que las aberturas pueden atravesarlas, mientras que las mayores continúan sobre la superficie hasta ser descargadas.

La eficiencia de clasificación depende de factores como tamaño y forma de las partículas, humedad, cantidad de material, características de la superficie de cribado y condiciones de operación.

Una zaranda sobrecargada puede reducir la eficiencia de separación. La presencia de material húmedo o arcilloso también puede producir cegamiento de las aberturas y disminuir el rendimiento.

El operador debe controlar la alimentación, condición de las mallas, vibración, distribución del material y granulometría de los productos. Las anomalías deben investigarse antes de que afecten al circuito completo.

Chancado terciario

En determinados circuitos se incorpora una etapa de chancado terciario para alcanzar una reducción adicional antes de la molienda. Esta etapa puede utilizar chancadoras de cono u otros equipos especializados.

El chancado terciario permite reducir el tamaño del producto a niveles que faciliten la alimentación de los molinos. La necesidad de esta etapa depende principalmente del tamaño requerido para la molienda y de las características del mineral.

La relación entre chancado y molienda es especialmente importante. Cuanto más eficiente sea la preparación del mineral antes de ingresar al molino, mejores pueden ser las condiciones para la molienda. Un producto de chancado demasiado grueso puede aumentar la demanda del molino, mientras que un producto excesivamente fino puede representar un consumo energético innecesario durante el chancado.

Por ello, el objetivo es alcanzar la granulometría de alimentación establecida por el diseño del circuito, no producir el material más fino posible.

Almacenamiento y alimentación a molienda

Después del chancado, el mineral puede ser almacenado en una tolva, stockpile o depósito intermedio antes de ingresar al circuito de molienda. Esta etapa proporciona capacidad de almacenamiento y ayuda a mantener una alimentación relativamente estable hacia los molinos.

Los alimentadores ubicados debajo de las tolvas regulan el flujo de mineral. La estabilidad de esta alimentación es fundamental porque los molinos responden directamente a los cambios de tonelaje.

Una variación importante en la alimentación puede modificar el nivel de carga del molino, consumo de potencia, granulometría del producto y comportamiento del clasificador.

El operador debe vigilar que la tolva mantenga niveles operacionales adecuados y que los alimentadores funcionen dentro de sus parámetros establecidos. También debe observar la presencia de obstrucciones, segregación o acumulaciones.

Molienda

La molienda constituye una etapa de reducción de tamaño más fina que el chancado. Su finalidad principal es alcanzar el grado de liberación necesario para que los minerales de interés puedan ser recuperados eficientemente durante las operaciones de concentración.

Entre los equipos más utilizados se encuentran los molinos de bolas, molinos SAG y otros sistemas de molienda, dependiendo del diseño de la planta.

En un molino de bolas, el mineral es reducido mediante la acción combinada del movimiento del molino y de los cuerpos moledores. Las bolas producen impactos y abrasión sobre las partículas.

En los molinos SAG, una parte importante de la acción de molienda proviene del propio mineral, complementada por una carga de bolas. Estos molinos pueden recibir material relativamente grueso proveniente del chancado.

La operación de un molino depende de múltiples variables: tonelaje de alimentación, granulometría de alimentación, porcentaje de sólidos, nivel de carga, velocidad de rotación, cantidad y tamaño de cuerpos moledores, características del mineral y condiciones de clasificación.

El operador no debe analizar estas variables de manera aislada. Una modificación en una de ellas puede producir cambios en otras variables del circuito.

Clasificación del producto de molienda

La molienda normalmente está asociada a una etapa de clasificación. El objetivo es separar las partículas que ya alcanzaron el tamaño requerido de aquellas que necesitan continuar siendo molidas.

Los hidrociclones son ampliamente utilizados para esta función. Reciben una pulpa de mineral y agua a presión y realizan una separación basada principalmente en el comportamiento de las partículas dentro del flujo.

El producto fino, denominado overflow, puede avanzar hacia la etapa de concentración, mientras que el material más grueso, denominado underflow, retorna al molino para continuar la reducción.

Esta recirculación forma parte del funcionamiento normal del circuito y genera la denominada carga circulante.

El desempeño de los ciclones puede evaluarse mediante variables como presión de alimentación, densidad de pulpa, distribución de tamaños y comportamiento del overflow y underflow. Una clasificación deficiente puede enviar partículas demasiado gruesas hacia la concentración o incrementar innecesariamente la cantidad de material que retorna al molino.

Preparación de la pulpa

A diferencia del chancado, que normalmente trabaja con mineral seco o con niveles limitados de humedad, la molienda y clasificación en muchas plantas concentradoras se realiza en presencia de agua. El resultado es una pulpa compuesta por sólidos y líquido.

La densidad de pulpa es una variable fundamental. Una cantidad excesiva de agua puede reducir la concentración de sólidos y modificar el comportamiento de clasificación, mientras que una cantidad insuficiente puede aumentar la viscosidad y dificultar el transporte y clasificación.

El operador debe controlar los parámetros definidos por el proceso y observar cambios en el flujo, densidad, presión y comportamiento de las corrientes.

Las bombas de pulpa cumplen una función esencial en el transporte del material entre molienda, clasificación y etapas posteriores. Su operación debe vigilarse considerando caudal, presión, condición de la bomba, desgaste y presencia de vibraciones o fugas.

Circuito abierto y circuito cerrado

Los procesos de reducción de tamaño pueden organizarse en circuitos abiertos o cerrados.

En un **circuito abierto**, el material pasa por el equipo de reducción y continúa hacia la siguiente etapa sin que una fracción determinada sea retornada sistemáticamente al mismo equipo.

En un **circuito cerrado**, existe una clasificación posterior y una fracción del material retorna al equipo de reducción. Este esquema es frecuente en molienda porque permite controlar mejor el tamaño del producto.

El circuito cerrado puede aumentar la eficiencia del proceso al evitar que partículas que ya alcanzaron el tamaño requerido permanezcan innecesariamente en el molino. Sin embargo, requiere controlar correctamente la carga circulante y las condiciones de clasificación.

Integración de todo el circuito

El circuito completo puede representarse conceptualmente como una secuencia:

Mineral de mina → recepción → alimentación → chancado primario → clasificación → chancado secundario → clasificación → chancado terciario, cuando corresponda → almacenamiento → alimentación a molienda → molienda → clasificación → producto final hacia concentración.

La configuración real puede variar. Algunas plantas utilizan circuitos con chancado convencional y molienda SAG, otras utilizan varias etapas de chancado seguidas de molinos de bolas, y algunas operaciones emplean tecnologías diferentes de acuerdo con las características del mineral.

Lo importante para el operador es comprender el flujo real de su planta y conocer qué función cumple cada equipo dentro del circuito.

Una alteración en una etapa puede propagarse hacia las demás. Por ejemplo, un aumento del tamaño de alimentación al chancado puede modificar el producto del chancado y posteriormente incrementar la carga sobre los molinos. Una clasificación deficiente puede aumentar la carga circulante y reducir la capacidad efectiva de molienda. Una alimentación irregular puede provocar fluctuaciones de potencia, densidad y granulometría.

Por ello, la operación debe orientarse a mantener el circuito estable y no únicamente a corregir problemas individuales.

Importancia del control de la granulometría

La granulometría constituye uno de los principales indicadores del desempeño del circuito. El producto de cada etapa debe encontrarse dentro de los rangos establecidos por el diseño y por los requerimientos metalúrgicos.

El operador debe utilizar los instrumentos disponibles y los resultados de muestreo y análisis granulométrico para verificar el comportamiento del proceso. La inspección visual puede proporcionar información útil, pero no sustituye las mediciones establecidas por el sistema de control de la planta.

El objetivo final de las etapas de chancado y molienda es obtener una alimentación adecuada para la concentración. El tamaño debe permitir una liberación suficiente de los minerales de interés sin generar una cantidad innecesaria de partículas ultrafinas.

Coordinación entre operación y seguridad

Todas las etapas del proceso involucran riesgos asociados a equipos móviles, partes giratorias, electricidad, presión, polvo, ruido, caída de materiales, superficies calientes, energía hidráulica y neumática, entre otros.

El operador debe respetar los procedimientos de operación, inspección y bloqueo establecidos por la planta. Las intervenciones sobre equipos deben realizarse con el aislamiento de energías correspondiente y bajo los procedimientos de seguridad aplicables.

Los atascos, derrames, vibraciones anormales, ruidos inusuales, temperaturas elevadas, fugas y fallas de sensores deben ser comunicados y tratados de acuerdo con los procedimientos establecidos. Nunca se debe ingresar a tolvas, chancadoras, molinos, chutes u otras zonas peligrosas para solucionar manualmente una condición operacional sin autorización y sin aislamiento adecuado de las energías.

La seguridad forma parte del proceso productivo. Una operación eficiente no puede considerarse correcta si se realiza exponiendo al personal a riesgos no controlados.

En síntesis, las etapas de chancado y molienda constituyen un sistema continuo de reducción, clasificación, transporte y control. El mineral pasa progresivamente desde tamaños gruesos provenientes de mina hasta una granulometría fina adecuada para la

concentración. Cada etapa tiene una función específica, pero su desempeño depende de la interacción con las demás.

El operador debe conocer el recorrido del mineral, identificar la función de cada equipo, controlar las variables principales y reconocer cómo las características de la alimentación afectan el circuito. El objetivo operacional es mantener un flujo estable, una granulometría controlada, una utilización eficiente de los equipos y condiciones seguras de trabajo. Esta visión integral permite comprender el circuito no como una sucesión de máquinas independientes, sino como un único proceso de preparación del mineral para la recuperación de sus componentes de valor.

1.3. Granulometría y distribución del tamaño de partículas

La granulometría es uno de los parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento de un mineral durante las operaciones de chancado, molienda y clasificación. Se refiere a la **distribución de las partículas de un material según su tamaño**. En una planta concentradora, conocer y controlar esta distribución permite determinar si el mineral ha sido reducido correctamente y si presenta las condiciones necesarias para continuar hacia la siguiente etapa del proceso.

El operador de chancado y molienda debe comprender que una corriente de mineral no está compuesta normalmente por partículas de un único tamaño. Incluso cuando un equipo está correctamente configurado, el producto obtenido presenta una distribución de tamaños: algunas partículas serán relativamente gruesas, otras intermedias y otras finas. El objetivo del proceso es controlar esta distribución dentro de los rangos establecidos por el diseño de la planta y los requerimientos metalúrgicos.

La granulometría tiene relación directa con la capacidad de los equipos, el consumo de energía, la eficiencia de clasificación, la liberación de los minerales de interés y el desempeño de las etapas posteriores de concentración. Por ello, una desviación granulométrica no debe considerarse solamente como un problema de tamaño, sino como una condición que puede afectar el funcionamiento de todo el circuito.

Concepto de tamaño de partícula

El tamaño de una partícula mineral puede expresarse mediante diferentes criterios, dependiendo de su forma y del método utilizado para medirla. En operaciones de procesamiento de minerales, la clasificación granulométrica se realiza frecuentemente mediante **tamices o zarandas**, especialmente para partículas relativamente gruesas.

Un tamiz posee una abertura determinada. Cuando una muestra de mineral pasa a través de una serie de tamices con aberturas progresivamente menores, las partículas quedan separadas en diferentes rangos de tamaño. De esta manera se puede determinar qué porcentaje de la muestra corresponde a cada fracción granulométrica.

En partículas aproximadamente esféricas, hablar de diámetro resulta sencillo. Sin embargo, las partículas de mineral presentan normalmente formas irregulares, angulares, laminares o alargadas. Por ello, el tamaño determinado por un método de análisis representa una

dimensión equivalente asociada al comportamiento de la partícula frente al sistema de medición utilizado.

Para el operador, lo más importante es interpretar correctamente los resultados granulométricos y relacionarlos con las condiciones del proceso.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica muestra cómo se reparte la masa de una muestra entre diferentes tamaños de partículas. Por ejemplo, una alimentación podría contener una determinada proporción de material grueso, una proporción intermedia y una fracción fina.

Dos muestras pueden tener el mismo tamaño máximo y, sin embargo, presentar comportamientos completamente diferentes si la distribución del resto de las partículas es distinta.

Por esta razón, el tamaño máximo por sí solo no es suficiente para caracterizar una corriente de mineral. También es importante conocer la cantidad relativa de partículas finas, intermedias y gruesas.

La distribución granulométrica puede representarse mediante tablas, histogramas o curvas granulométricas. Estos instrumentos permiten visualizar cómo cambia el tamaño de las partículas entre la alimentación y el producto de una determinada etapa.

En una planta industrial, las especificaciones granulométricas suelen expresarse mediante parámetros definidos para cada corriente. Uno de los más utilizados es el **P80**, que corresponde al tamaño para el cual el 80 % de la masa de la muestra pasa por una abertura determinada. El P80 es especialmente utilizado para describir productos de chancado y molienda y evaluar el desempeño de los circuitos.

Por ejemplo, si un producto tiene un P80 determinado, significa que aproximadamente el 80 % de la masa de la muestra está compuesto por partículas menores que ese tamaño, mientras que el porcentaje restante corresponde a partículas mayores.

El operador debe interpretar el P80 como un indicador de la distribución, no como el tamaño de todas las partículas del producto.

Tamaño máximo y tamaño objetivo

El **tamaño máximo** representa la dimensión de las partículas más grandes presentes en una corriente, dentro de los criterios utilizados para su determinación. Es especialmente importante en la alimentación de chancadoras, zarandas, molinos y otros equipos.

Cada equipo tiene una capacidad determinada para recibir y procesar material. Si la alimentación contiene partículas excesivamente grandes, puede producirse atoro, reducción de capacidad, sobrecarga o daño de componentes.

El **tamaño objetivo**, por otro lado, corresponde al rango de granulometría que se busca alcanzar en una determinada etapa. Este tamaño depende de la función del proceso.

En el chancado, el producto debe ser suficientemente pequeño para alimentar la etapa siguiente. En la molienda, el tamaño debe ser adecuado para alcanzar el grado de liberación requerido por la concentración.

No existe una granulometría universalmente correcta. El tamaño adecuado depende del mineral, del proceso metalúrgico y de las condiciones de diseño de la planta.

Granulometría en el chancado

Durante el chancado, el mineral pasa por diferentes etapas de reducción. La alimentación inicial puede contener bloques de gran tamaño, mientras que el producto final del circuito de chancado debe presentar una distribución considerablemente más fina y controlada.

En el chancado primario, el objetivo principal es reducir el tamaño de los fragmentos provenientes de mina. El producto puede continuar hacia una zaranda y posteriormente hacia el chancado secundario.

Las zarandas permiten separar el material que ya ha alcanzado el tamaño requerido del material que todavía necesita reducción. Esta operación evita que las partículas que cumplen la especificación sean sometidas innecesariamente a una nueva etapa de chancado.

La eficiencia del circuito depende en gran medida de esta interacción entre reducción y clasificación.

Si el producto de una chancadora presenta demasiadas partículas gruesas, puede significar que la reducción no está alcanzando las condiciones requeridas. Las causas pueden estar relacionadas con la configuración del equipo, desgaste de los elementos de trituración, alimentación irregular, características del mineral u otras variables operacionales.

Por otro lado, una cantidad excesiva de finos puede indicar una reducción más intensa de la necesaria o cambios en las características del mineral. Una producción excesiva de finos también puede afectar la eficiencia de las zarandas y aumentar determinadas demandas energéticas.

Granulometría en la molienda

La molienda tiene como finalidad alcanzar tamaños considerablemente menores que los obtenidos normalmente mediante chancado. La razón principal es conseguir una adecuada **liberación mineralógica**.

La liberación ocurre cuando las partículas que contienen minerales de interés quedan suficientemente separadas de la ganga para que puedan ser recuperadas mediante las operaciones posteriores.

Sin embargo, una molienda excesivamente fina no necesariamente mejora la recuperación. La generación excesiva de partículas ultrafinas puede incrementar el consumo energético y producir dificultades en determinadas etapas de concentración.

Por esta razón, el operador debe buscar la estabilidad del producto dentro de la especificación establecida. La condición ideal no consiste en obtener la mayor cantidad posible de material fino, sino en alcanzar el grado de reducción necesario para el proceso.

La granulometría del producto de molienda depende de variables como el tonelaje alimentado, características del mineral, velocidad del molino, carga de cuerpos moledores, densidad de pulpa, tiempo de residencia y desempeño del sistema de clasificación.

Una modificación en cualquiera de estas condiciones puede producir cambios en la distribución granulométrica.

U.S. MESH	MICRONS	INCHES	MILLIMETERS
3	6730	0.2650	6.730
4	4760	0.1870	4.760
5	4000	0.1570	4.000
6	3360	0.1320	3.360
7	2830	0.1110	2.830
8	2380	0.0937	2.380
10	2000	0.0787	2.000
12	1680	0.0661	1.680
14	1410	0.0555	1.410
16	1190	0.0469	1.190
18	1000	0.0394	1.000
20	841	0.0331	0.841
25	707	0.0280	0.707
30	595	0.0232	0.595
35	500	0.0197	0.500
40	400	0.0165	0.400
45	354	0.0138	0.354
50	297	0.0117	0.297
60	250	0.0098	0.250
70	210	0.0083	0.210
80	177	0.0070	0.177
100	149	0.0059	0.149
120	125	0.0049	0.125
140	105	0.0041	0.105
170	88	0.0035	0.088
200	74	0.0029	0.074
230	63	0.0024	0.063
270	53	0.0021	0.053
325	44	0.0017	0.044
400	37	0.0015	0.037

Relación entre granulometría y liberación

La granulometría está estrechamente relacionada con la liberación de los minerales de valor. Una roca puede contener partículas de mineral útil encerradas dentro de partículas mayores de ganga. Si el tamaño de reducción es insuficiente, ambos materiales permanecen unidos y la recuperación puede disminuir.

Por el contrario, si se continúa reduciendo el material después de alcanzar el grado de liberación necesario, se consume energía adicional sin obtener necesariamente un beneficio equivalente.

El tamaño óptimo de molienda debe determinarse mediante estudios metalúrgicos y pruebas específicas para cada mineral. El operador debe trabajar con los parámetros definidos por la planta y comprender la razón de mantenerlos.

La relación entre granulometría y recuperación es especialmente importante en circuitos donde el producto de molienda alimenta procesos como flotación, concentración gravimétrica u otras operaciones de separación.

Métodos de análisis granulométrico

El análisis granulométrico permite determinar la distribución de tamaños de una muestra. Para materiales relativamente gruesos se utilizan comúnmente juegos de tamices con diferentes aberturas.

Una muestra representativa se coloca sobre el conjunto de tamices y se somete a un proceso de tamizado durante un tiempo establecido. Después se determina la masa retenida en cada tamiz y se calcula el porcentaje correspondiente.

Los resultados pueden expresarse como:

- **Porcentaje retenido:** fracción de la muestra que queda sobre un determinado tamiz.
- **Porcentaje acumulado retenido:** suma de las fracciones retenidas desde los tamaños mayores hasta el tamiz considerado.
- **Porcentaje pasante:** fracción de la muestra que atraviesa una abertura determinada.
- **Porcentaje acumulado pasante:** porcentaje total de material que pasa por cada tamaño de referencia.

Estos valores permiten construir una curva granulométrica y comparar la alimentación con el producto.

En materiales muy finos, especialmente en productos de molienda, pueden utilizarse métodos complementarios basados en técnicas instrumentales específicas. La metodología depende del rango de tamaños y de los procedimientos establecidos por el laboratorio o la planta.

Importancia del muestreo

Un análisis granulométrico solamente será representativo si la muestra utilizada representa correctamente la corriente de mineral.

Las corrientes transportadas mediante fajas, chutes o tuberías pueden presentar segregación. Las partículas gruesas y finas pueden distribuirse de manera desigual, por lo que una muestra tomada incorrectamente puede proporcionar resultados que no representan el flujo completo.

El operador debe respetar los procedimientos de muestreo establecidos. Los puntos de muestreo deben ser seguros, accesibles y adecuados para obtener una muestra representativa.

No debe confundirse una observación visual con un análisis granulométrico. Ver una corriente aparentemente fina o gruesa proporciona información cualitativa, pero la evaluación precisa requiere mediciones apropiadas.

Factores que modifican la granulometría

La distribución granulométrica puede cambiar por múltiples razones. En el chancado, algunos factores importantes son la abertura de descarga, desgaste de componentes, velocidad, alimentación, dureza y estructura del mineral.

En las zarandas, influyen la abertura de las mallas, frecuencia y amplitud de vibración, inclinación, carga, humedad y características del material.

En la molienda, intervienen el tonelaje de alimentación, tamaño de alimentación, carga del molino, cuerpos moledores, velocidad, densidad de pulpa y condiciones de clasificación.

En los hidrociclones, la presión de alimentación, densidad de pulpa, geometría del ciclón y características del material influyen en el tamaño de separación.

El operador debe evitar interpretar un cambio granulométrico como consecuencia de una única variable sin analizar el comportamiento general del circuito.

Sobrecarga y sus efectos sobre la granulometría

Una condición de sobrecarga puede modificar significativamente la distribución del producto.

En una zaranda, una alimentación excesiva puede reducir el tiempo disponible para que las partículas encuentren las aberturas correspondientes. Esto puede provocar que partículas que deberían pasar continúen hacia la descarga de material grueso.

En una chancadora, una alimentación superior a la capacidad operacional puede producir inestabilidad y afectar el tamaño del producto.

En un molino, una alimentación excesiva puede alterar el nivel de carga y disminuir la capacidad efectiva de reducción. La respuesta dependerá del tipo de molino y de las condiciones del circuito.

Por esta razón, mantener una alimentación estable constituye uno de los principios básicos de una operación granulométricamente controlada.

Influencia de la humedad y las arcillas

La humedad puede afectar la separación granulométrica, especialmente en las operaciones de zarandeo. Las partículas finas pueden adherirse entre sí o a la superficie de las mallas, reduciendo la eficiencia de clasificación.

La presencia de arcillas puede intensificar este problema. Materiales arcillosos pueden formar aglomeraciones y generar una falsa percepción del tamaño de las partículas. Una

masa de partículas finas aglomeradas puede comportarse temporalmente como una partícula mayor.

En circuitos húmedos, las propiedades de la pulpa también influyen sobre la clasificación. Cambios en la densidad y viscosidad pueden modificar el comportamiento de los clasificadores y, por consecuencia, la granulometría del producto final.

Granulometría y carga circulante

En un circuito cerrado de molienda, las partículas gruesas que no cumplen con la especificación retornan al molino. Este flujo constituye parte de la **carga circulante**.

Si la clasificación se vuelve demasiado gruesa, una mayor cantidad de material puede retornar al molino. Esto incrementa la carga interna del circuito y puede reducir la capacidad efectiva.

Si la clasificación es demasiado fina, parte del material que todavía requiere mayor reducción puede avanzar hacia la siguiente etapa. Esto puede afectar negativamente la liberación y el desempeño metalúrgico.

El equilibrio entre molienda y clasificación es, por tanto, fundamental para mantener una granulometría estable.

Indicadores operacionales relacionados con la granulometría

El operador puede utilizar diferentes indicadores para evaluar el comportamiento del circuito. Entre ellos se encuentran el P80, porcentaje pasante por una determinada abertura, porcentaje de material grueso, densidad de pulpa, presión de ciclones, tonelaje y carga circulante.

Estos indicadores deben interpretarse conjuntamente.

Por ejemplo, un aumento del porcentaje de material grueso en el producto puede estar relacionado con cambios en la alimentación, desgaste de componentes, disminución de la eficiencia de clasificación o variaciones en las condiciones de molienda.

La tendencia de las mediciones suele ser más importante que una observación aislada. Un cambio puntual puede ser consecuencia de una variación temporal, mientras que una tendencia sostenida puede indicar una desviación del proceso que requiere investigación.

Importancia para el operador

El operador debe desarrollar la capacidad de relacionar la granulometría con el comportamiento físico del circuito. Una corriente que cambia visualmente, una zaranda que presenta una distribución irregular, un aumento de carga en una faja o una modificación del aspecto de la pulpa pueden constituir señales tempranas de una alteración granulométrica.

Sin embargo, las decisiones operacionales deben basarse en los instrumentos, procedimientos, parámetros establecidos y resultados de control disponibles en la planta.

El operador no debe modificar arbitrariamente la configuración de chancadoras, molinos, zarandas o ciclones para corregir una desviación. Las modificaciones deben ejecutarse mediante los procedimientos autorizados y considerando la coordinación con control de procesos, supervisión y mantenimiento cuando corresponda.

Relación con las etapas posteriores

La granulometría obtenida en chancado y molienda condiciona el desempeño de las etapas posteriores de concentración. Un producto demasiado grueso puede impedir una adecuada liberación de los minerales de interés. Un producto excesivamente fino puede incrementar el consumo energético y generar problemas de procesamiento.

Por ello, la granulometría constituye un punto de conexión entre la preparación mecánica del mineral y la recuperación metalúrgica.

El objetivo del circuito es entregar un producto estable y dentro de las especificaciones definidas. La estabilidad es especialmente importante porque las etapas posteriores también requieren condiciones relativamente constantes para operar de manera eficiente.

En términos generales, el control granulométrico permite optimizar tres aspectos fundamentales: **reducción adecuada del mineral, utilización eficiente de la energía y preparación correcta para la concentración.**

El operador de chancado y molienda debe comprender que la granulometría no es simplemente una característica del producto final. Es una variable que permite evaluar el funcionamiento del circuito completo. La alimentación, reducción, clasificación, transporte y condiciones del mineral interactúan continuamente para determinar la distribución de tamaños obtenida.

Una correcta interpretación de la granulometría permite identificar desviaciones, anticipar problemas y mantener el proceso dentro de las condiciones operacionales establecidas. Por ello, el conocimiento del tamaño de partículas, distribución granulométrica, porcentaje pasante, P80, clasificación y carga circulante constituye una competencia esencial para cualquier operador responsable de un circuito de chancado y molienda.

1.4. Variables fundamentales del proceso

La operación de un circuito de chancado y molienda depende del control permanente de un conjunto de variables que determinan la capacidad, estabilidad, granulometría, consumo de energía y eficiencia de los equipos. Estas variables están relacionadas entre sí y deben analizarse como parte de un sistema integrado. Una modificación en la alimentación, por ejemplo, puede alterar la carga de una chancadora, cambiar la granulometría del producto y posteriormente afectar la operación del molino y del sistema de clasificación.

El operador debe conocer las principales variables del proceso, comprender su comportamiento normal y reconocer las desviaciones que pueden indicar una condición

operacional anormal. El objetivo del control no consiste en mantener todos los valores absolutamente constantes, sino en mantenerlos dentro de los rangos establecidos por el diseño, los procedimientos operacionales y los parámetros definidos por la planta.

Entre las variables fundamentales se encuentran el tonelaje de alimentación, granulometría, humedad, dureza y características del mineral, abertura de descarga, velocidad y carga de los equipos, potencia, nivel de carga, densidad de pulpa, presión de clasificación, porcentaje de sólidos, carga circulante y granulometría del producto.

Tonelaje y flujo de alimentación

El **tonelaje de alimentación** representa la cantidad de mineral que ingresa al circuito durante un determinado período de tiempo. Es una de las variables más importantes porque determina la carga de trabajo de chancadoras, zarandas, molinos, bombas y clasificadores.

Una alimentación demasiado elevada puede producir sobrecarga y pérdida de estabilidad. Una alimentación demasiado baja puede reducir la utilización de la capacidad instalada y modificar las condiciones normales de operación.

El objetivo es mantener un flujo estable y compatible con la capacidad de cada equipo. En una línea de proceso, la capacidad no está determinada únicamente por el equipo individual más grande, sino por la interacción de todos los equipos conectados.

Una chancadora puede tener capacidad suficiente para un determinado tonelaje, pero si la zaranda, faja o molino posterior tiene menor capacidad, esta diferencia puede convertirse en una restricción del circuito.

La alimentación también debe ser uniforme. Las variaciones bruscas de tonelaje pueden producir oscilaciones en la carga, potencia y granulometría. Por ello, los alimentadores deben utilizarse para regular el flujo y mantener condiciones relativamente estables.

Granulometría de alimentación

La granulometría de alimentación determina el tamaño de las partículas que ingresan al equipo. Es especialmente importante en las primeras etapas de chancado y en la alimentación de los molinos.

Una alimentación con una proporción elevada de material grueso puede incrementar la demanda de reducción. Si el tamaño máximo supera las condiciones previstas para el equipo, puede producirse atoro, disminución de capacidad o esfuerzos mecánicos elevados.

La distribución granulométrica también es importante. No es suficiente conocer solamente el tamaño máximo; se debe considerar la proporción de material grueso, intermedio y fino.

En molienda, una alimentación más gruesa puede requerir mayor trabajo de reducción para alcanzar el tamaño objetivo. Por el contrario, una alimentación con mayor proporción de finos puede modificar la respuesta del molino y del clasificador.

El operador debe relacionar los cambios de granulometría con las variaciones observadas en el proceso y con las características del mineral proveniente de mina.

Dureza y competencia del mineral

La dureza del mineral influye directamente en la facilidad con la que puede ser fragmentado. Un mineral más duro normalmente requiere mayor energía para alcanzar una determinada reducción de tamaño.

Cuando cambia la dureza del mineral alimentado, pueden producirse modificaciones en el consumo de potencia, capacidad de tratamiento, granulometría del producto y desgaste de los componentes.

La **competencia** de la roca también es relevante. Un material competente puede resistir mayores esfuerzos antes de fracturarse, mientras que una roca intensamente fracturada puede fragmentarse con mayor facilidad.

Estas características pueden cambiar dentro de un mismo yacimiento. Por ello, el operador debe estar preparado para trabajar con variaciones naturales de la alimentación.

Humedad y presencia de arcillas

La humedad es una variable especialmente importante en el chancado y zarandeo. Una cantidad elevada de agua puede favorecer la adherencia del material y provocar acumulaciones en chutes, tolvas y superficies de clasificación.

La presencia de arcillas puede intensificar estos problemas. Los materiales arcillosos pueden adherirse a las mallas de las zarandas, disminuir el área efectiva de paso y reducir la eficiencia de clasificación.

En molienda húmeda, el agua cumple además una función esencial en la formación y transporte de la pulpa. Sin embargo, la cantidad de agua debe mantenerse dentro de los parámetros definidos.

Un aumento excesivo del agua puede disminuir la concentración de sólidos y modificar la clasificación. Una cantidad insuficiente puede incrementar la densidad y viscosidad de la pulpa, dificultando el transporte y alterando el comportamiento de los equipos.

Abertura de descarga

La **abertura de descarga** de una chancadora constituye una variable fundamental para determinar el tamaño del producto.

Una abertura más amplia permite una mayor descarga de material y generalmente produce un producto más grueso. Una abertura más reducida aumenta la intensidad de reducción y puede producir un producto más fino, pero también puede incrementar la carga sobre el equipo y la demanda energética.

El ajuste debe realizarse según los parámetros establecidos para la planta. El operador no debe modificar la configuración arbitrariamente para compensar una desviación sin identificar primero su causa.

El desgaste de los elementos de trituración también modifica progresivamente las condiciones de descarga. Por ello, una chancadora que inicialmente operaba correctamente puede producir un producto diferente después de un período prolongado de operación si sus componentes presentan desgaste significativo.

Velocidad de operación

La velocidad de los equipos rotativos influye en la forma en que el mineral recibe las fuerzas de reducción.

En chancadoras y molinos, la velocidad debe mantenerse dentro de los valores establecidos para cada equipo. Una velocidad inadecuada puede modificar la eficiencia de fragmentación, consumo de energía, vibración y comportamiento del material.

En los molinos, la velocidad de rotación determina el movimiento de la carga interna y, por tanto, la acción de impacto y abrasión sobre el mineral.

El operador debe vigilar las indicaciones del sistema de control y las condiciones mecánicas del equipo. Las variaciones de velocidad deben interpretarse conjuntamente con potencia, carga, alimentación y granulometría.

Potencia y consumo de energía

La **potencia** consumida por chancadoras y molinos proporciona información importante sobre la carga de trabajo del equipo. En molienda, el consumo energético constituye una variable particularmente relevante debido a la elevada demanda de energía asociada con la reducción fina del mineral.

Un aumento de potencia puede estar relacionado con un incremento del tonelaje, mineral más duro, mayor carga interna u otras modificaciones del proceso. Una disminución puede indicar una reducción de alimentación, menor carga o una condición diferente del circuito.

La potencia no debe analizarse de forma aislada. Un valor determinado puede ser normal bajo una condición de alimentación y anormal bajo otra.

El objetivo operacional es mantener una relación adecuada entre energía consumida y cantidad de mineral procesado, evitando condiciones de sobrecarga o funcionamiento innecesariamente ineficiente.

Carga del molino

La carga interna de un molino está compuesta por mineral, agua y, según el tipo de equipo, cuerpos moledores como bolas. Su comportamiento determina en gran medida la eficiencia de molienda.

Una carga insuficiente puede reducir la capacidad de molienda, mientras que una carga excesiva puede generar sobrecarga y afectar el movimiento adecuado del material.

En molinos de bolas, la cantidad, tamaño y distribución de los cuerpos moledores son variables importantes. Las bolas transfieren energía al mineral mediante impactos y abrasión.

En molinos SAG, el propio mineral participa de manera importante en el proceso de molienda, complementado por una determinada carga de bolas.

El operador debe controlar las variables establecidas para el equipo y observar las tendencias de potencia, nivel de carga y granulometría.

Densidad y porcentaje de sólidos

En los circuitos de molienda húmeda, la **densidad de pulpa** es una de las variables fundamentales. La pulpa contiene partículas sólidas suspendidas en agua y debe presentar condiciones apropiadas para la molienda, transporte y clasificación.

El porcentaje de sólidos influye en la viscosidad, transporte de partículas y comportamiento del clasificador.

Una pulpa demasiado diluida puede modificar la eficiencia de clasificación y aumentar el volumen de agua transportado por el circuito. Una pulpa demasiado concentrada puede presentar mayor viscosidad y dificultar el transporte y la clasificación.

El valor adecuado depende del mineral, equipo y diseño del circuito. Por ello, el operador debe trabajar con los rangos establecidos por la planta.

Presión de los hidrociclones

En circuitos que utilizan hidrociclones, la **presión de alimentación** es una variable fundamental para el funcionamiento de la clasificación.

La presión influye en el comportamiento del flujo dentro del ciclón y en la separación de las partículas. Una variación importante puede modificar el tamaño de corte y, por tanto, la granulometría del overflow y underflow.

Una presión demasiado baja puede reducir la eficiencia de clasificación, mientras que condiciones excesivas pueden afectar el comportamiento del equipo y sus componentes.

La presión debe controlarse junto con la densidad de alimentación, caudal y características de la pulpa. Un cambio en una de estas variables puede afectar la interpretación de las demás.

Granulometría del producto

La granulometría del producto es uno de los principales indicadores del desempeño del circuito. En chancado puede evaluarse mediante el tamaño máximo, porcentaje pasante y otros parámetros establecidos.

En molienda, el P80 y otros indicadores granulométricos permiten determinar si el producto está alcanzando las condiciones requeridas para la concentración.

Una granulometría demasiado gruesa puede indicar reducción insuficiente o clasificación inadecuada. Una granulometría excesivamente fina puede representar un consumo energético superior al necesario.

La tendencia del producto debe ser monitoreada para identificar desviaciones antes de que afecten significativamente las etapas posteriores.

Carga circulante

En un circuito cerrado de molienda, una parte del material clasificado como grueso retorna al molino. Este flujo se denomina **carga circulante**.

La magnitud de la carga circulante depende de la eficiencia de clasificación y de las condiciones de molienda. Un incremento importante puede indicar que una mayor cantidad de material no está alcanzando el tamaño requerido.

Una carga circulante elevada puede incrementar la cantidad de material que debe manejar el molino y los equipos asociados, afectando la capacidad efectiva del circuito.

El operador debe observar la relación entre alimentación fresca, alimentación al molino, underflow y overflow para comprender el comportamiento del circuito.

Nivel de las tolvas y capacidad de almacenamiento

Las tolvas y depósitos intermedios permiten mantener una reserva de mineral entre diferentes etapas. El nivel de estas instalaciones es una variable operacional importante.

Un nivel demasiado bajo puede provocar interrupciones o alimentación irregular. Un nivel excesivamente alto puede reducir la capacidad disponible para absorber variaciones y generar condiciones de riesgo si se superan los límites operacionales.

El control del nivel permite desacoplar parcialmente las variaciones entre etapas y mantener una alimentación más estable.

El operador debe respetar los niveles mínimo y máximo definidos para cada instalación y comunicar cualquier comportamiento anormal.

Flujo de agua

El agua participa en diferentes partes del proceso, especialmente en molienda, clasificación y transporte de pulpa. El caudal de agua debe controlarse para mantener las condiciones requeridas.

Una variación del flujo puede modificar la densidad de pulpa, presión de clasificación, capacidad de transporte y comportamiento del producto.

Las líneas de agua, válvulas, bombas e instrumentos asociados deben mantenerse en condiciones adecuadas. Las fugas o restricciones de flujo pueden generar desviaciones que afectan a todo el circuito.

Desgaste de componentes

El desgaste de los componentes de chancadoras, molinos, zarandas y sistemas de transporte constituye una variable que cambia progresivamente las condiciones del proceso.

En chancadoras, el desgaste puede modificar la geometría efectiva de la cámara y afectar la granulometría del producto.

En molinos, el desgaste de revestimientos puede modificar el movimiento de la carga y la transferencia de energía.

En zarandas, el desgaste o daño de las mallas puede alterar la clasificación.

En bombas de pulpa, el desgaste de componentes puede modificar el rendimiento hidráulico.

Por ello, el operador desempeña un papel importante en la detección temprana del desgaste mediante observación, mediciones y comunicación de anomalías.

Vibración, temperatura y condición mecánica

La vibración y la temperatura proporcionan información sobre el estado de los equipos. Un aumento anormal puede indicar problemas de alineación, lubricación, desgaste, desequilibrio, sobrecarga u otras condiciones que requieren evaluación.

Los equipos rotativos deben operar dentro de los límites establecidos por el fabricante y la planta.

El operador debe prestar atención a cambios repentinos de ruido, vibración, temperatura, olor, fugas o comportamiento mecánico. Estas señales pueden aparecer antes de una falla importante.

No corresponde al operador intervenir mecánicamente un equipo energizado para investigar una anomalía. La evaluación y reparación deben realizarse mediante los procedimientos de seguridad y mantenimiento correspondientes.

Relación entre las variables

Las variables del proceso están estrechamente relacionadas. Por ejemplo, un incremento del tonelaje puede aumentar la potencia requerida. Si además el mineral presenta mayor dureza, el efecto puede ser más significativo.

Una modificación de la granulometría de alimentación puede cambiar la carga del molino y afectar el P80 del producto. Una variación de densidad puede modificar la clasificación y, como consecuencia, aumentar o disminuir la carga circulante.

Por esta razón, el operador debe evitar realizar ajustes basados en una sola lectura. La interpretación correcta requiere observar tendencias y relaciones entre diferentes variables.

El comportamiento del circuito puede analizarse mediante una secuencia lógica:

Alimentación → reducción → clasificación → producto → retorno → nueva reducción.

Si una variable cambia, es necesario determinar cómo ese cambio afecta al resto del sistema.

Control de tendencias

El control de tendencias permite identificar desviaciones antes de que se conviertan en problemas mayores. Los sistemas de control de planta pueden registrar continuamente variables como tonelaje, potencia, presión, densidad, niveles, velocidades y temperaturas.

La observación de tendencias permite diferenciar una fluctuación temporal de una desviación persistente.

Por ejemplo, un aumento progresivo de potencia acompañado por una reducción de la granulometría puede tener una interpretación diferente de un aumento de potencia acompañado por una disminución del tonelaje.

El operador debe utilizar la información disponible y comunicar las desviaciones según los procedimientos establecidos.

Importancia de la estabilidad operacional

La estabilidad es uno de los objetivos principales del control del circuito. Un proceso que funciona con grandes variaciones de alimentación, carga, densidad y granulometría resulta más difícil de controlar y puede presentar menor eficiencia.

Una operación estable permite aprovechar mejor la capacidad de los equipos, mantener una granulometría más uniforme y facilitar el trabajo de las etapas posteriores.

La estabilidad no significa ausencia absoluta de variaciones. Significa mantener el proceso dentro de rangos aceptables y responder oportunamente cuando las variables comienzan a desviarse.

Principios básicos para el operador

El operador debe aplicar algunos principios fundamentales durante el control del proceso: mantener una alimentación estable, respetar los rangos operacionales, observar tendencias, verificar la granulometría, controlar los niveles y flujos, vigilar la condición mecánica de los equipos y comunicar oportunamente cualquier desviación.

También debe comprender que una variable fuera de rango no siempre es la causa del problema. Puede ser simplemente el resultado de otra condición anterior del circuito.

Por ejemplo, una presión anormal en los hidrociclones puede estar relacionada con cambios en el caudal, densidad, bomba o alimentación. Una granulometría gruesa puede estar relacionada con el molino, el clasificador o las características del mineral.

La identificación correcta de la causa requiere analizar el circuito de manera integral.

En conclusión, las variables fundamentales del proceso constituyen el conjunto de parámetros que permiten controlar y evaluar el desempeño del circuito de chancado y molienda. Tonelaje, granulometría, dureza, humedad, abertura de descarga, velocidad, potencia, carga del molino, densidad de pulpa, presión de clasificación, carga circulante, niveles, flujo de agua y condición mecánica deben ser considerados conjuntamente.

El operador debe conocer los valores normales establecidos para su planta, reconocer las tendencias y actuar de acuerdo con los procedimientos operacionales. El control adecuado de estas variables permite mantener una operación estable, reducir pérdidas, optimizar el uso de energía y equipos, conservar una granulometría adecuada y preparar correctamente el mineral para las etapas posteriores de concentración.

La competencia fundamental del operador no consiste únicamente en observar instrumentos, sino en **interpretar la relación entre las variables y comprender cómo los cambios en una parte del circuito afectan al proceso completo**. Esta capacidad es esencial para mantener una operación segura, eficiente y técnicamente controlada.

1.5. Flowsheet básico de una planta de chancado y molienda

El flowsheet (flujograma) es la representación gráfica simplificada del proceso que permite visualizar la secuencia de operaciones, equipos, corrientes de mineral y puntos de transferencia dentro de una planta de procesamiento. En un circuito de chancado y molienda, el flowsheet permite comprender cómo el mineral ingresa a la planta, cómo se reduce progresivamente su tamaño, cómo se clasifica y cómo se obtiene un producto con la granulometría requerida para las etapas posteriores de concentración.

Para el operador, conocer el flowsheet de la planta es fundamental porque permite comprender el proceso como un sistema integrado. No basta con conocer individualmente una chancadora, una zaranda o un molino. El operador debe saber **de dónde proviene el mineral, hacia dónde se dirige, qué equipo interviene en cada etapa y qué ocurre con las diferentes corrientes generadas por el proceso**.

El flowsheet puede variar considerablemente entre plantas debido a las características del mineral, capacidad de tratamiento, grado de liberación requerido, tecnología disponible, condiciones de operación y objetivos metalúrgicos. Por esta razón, el esquema básico utilizado para fines de capacitación debe entenderse como una representación conceptual. La configuración real de una planta debe consultarse siempre en sus planos, diagramas de proceso, procedimientos operacionales y documentación técnica vigente.

Concepto de flowsheet

Un flowsheet, también denominado diagrama de flujo de proceso, representa mediante símbolos y líneas la secuencia de operaciones unitarias que conforman un circuito.

En un circuito de chancado y molienda, el flowsheet puede mostrar:

- Alimentación de mineral.
- Tolvas y alimentadores.
- Chancadoras.
- Zarandas.
- Fajas transportadoras.
- Puntos de transferencia.
- Stockpiles o tolvas intermedias.
- Molinos.
- Bombas de pulpa.
- Hidrociclones.
- Corrientes de producto.
- Corrientes de retorno.
- Agua de proceso.
- Carga circulante.

Las flechas representan la dirección del flujo. De esta manera, el operador puede seguir visualmente el recorrido del mineral desde la alimentación hasta el producto.

El flowsheet no necesariamente representa la ubicación física exacta de los equipos. Su principal función es mostrar **la relación funcional entre las operaciones**.

Secuencia general del circuito

Un circuito básico puede representarse conceptualmente de la siguiente manera:

Mineral de mina → tolva de recepción → alimentador → chancado primario → zarandeo → chancado secundario → zarandeo → chancado terciario, cuando corresponda → almacenamiento → alimentación a molienda → molino → clasificación → producto fino → concentración.

En un circuito cerrado de molienda, el material grueso separado por el clasificador retorna al molino:

Molino → clasificación → overflow → concentración

y

Molino → clasificación → underflow → retorno al molino.

Esta recirculación constituye la carga circulante del circuito.

La configuración exacta puede ser diferente. Algunas plantas pueden no utilizar chancado terciario, mientras que otras incorporan circuitos de preclasificación, molienda SAG, molinos de bolas, clasificación en varias etapas o sistemas adicionales de tratamiento.

Recepción del mineral

El circuito comienza con la recepción del mineral proveniente de mina. El mineral puede ser transportado mediante camiones y descargado en una tolva, o llegar mediante un sistema de transporte continuo.

La tolva permite recibir y almacenar temporalmente el mineral. Desde allí, un alimentador regula el flujo hacia la primera etapa de chancado.

En el flowsheet, esta etapa normalmente aparece como el punto inicial del circuito. El operador debe reconocer que cualquier variación importante en esta alimentación puede afectar progresivamente las etapas siguientes.

Una alimentación irregular puede producir fluctuaciones en el tonelaje, carga de las chancadoras, granulometría del producto y disponibilidad del circuito.

Alimentador

El alimentador tiene como función extraer el mineral de la tolva y entregar un flujo controlado al equipo siguiente.

Dependiendo del diseño, pueden utilizarse alimentadores de placas, vibratorios, de banda u otros sistemas.

El alimentador representa un elemento fundamental para estabilizar el circuito. Una alimentación demasiado elevada puede generar sobrecarga, mientras que una alimentación insuficiente reduce la capacidad de procesamiento.

En el flowsheet, el alimentador aparece normalmente entre la tolva y la primera chancadora.

Chancado primario

El mineral ingresa posteriormente al chancado primario. Esta etapa realiza la primera reducción significativa del tamaño.

Entre los equipos utilizados se encuentran las chancadoras de mandíbulas y las chancadoras giratorias. La selección depende principalmente de la capacidad, tamaño de alimentación y características del mineral.

El producto del chancado primario presenta una distribución granulométrica menor que la alimentación original, pero normalmente todavía contiene una proporción importante de partículas gruesas.

En el flowsheet, la chancadora primaria constituye uno de los principales puntos de reducción de tamaño.

Zarandeo

Después de una etapa de chancado puede instalarse una zaranda para clasificar el material.

La zaranda divide el flujo en función del tamaño de las partículas. El material que ya cumple con el tamaño requerido puede avanzar hacia la siguiente etapa, mientras que el material que todavía es demasiado grueso retorna a una chancadora.

Esta configuración permite evitar una reducción innecesaria de las partículas que ya tienen el tamaño adecuado.

Una representación simplificada puede ser:

Chancadora → Zaranda → material fino → siguiente etapa

y

Zaranda → material grueso → chancadora.

Esta corriente de retorno forma un circuito cerrado de chancado.

Chancado secundario

El material grueso separado por la clasificación puede ingresar al chancado secundario.

Las chancadoras de cono son ampliamente utilizadas en esta etapa debido a su capacidad para realizar una reducción intermedia y producir una distribución granulométrica adecuada para las etapas posteriores.

La relación entre chancado secundario y zarandeo es importante. La zaranda separa el material que ya cumple con el tamaño requerido, mientras que la fracción gruesa retorna a la reducción.

El operador debe comprender que la eficiencia del circuito depende de la interacción entre ambos equipos y no únicamente del rendimiento individual de la chancadora.

Chancado terciario

Cuando la granulometría requerida no puede alcanzarse mediante las etapas anteriores, puede incorporarse una etapa de chancado terciario.

Esta etapa permite obtener un producto más fino antes del almacenamiento y posterior alimentación a molienda.

No todas las plantas requieren chancado terciario. Su incorporación depende de la dureza del mineral, tamaño de alimentación al molino, capacidad instalada y requerimientos del proceso.

En el flowsheet, esta etapa puede aparecer después de una nueva clasificación:

Chancado secundario → zaranda → material grueso → chancado terciario.

El material que cumple la especificación granulométrica continúa hacia almacenamiento o directamente hacia la molienda, dependiendo del diseño.

Circuitos cerrados de chancado

Los circuitos cerrados son comunes cuando se busca controlar estrictamente la granulometría del producto.

En un circuito cerrado, una zaranda clasifica el producto de la chancadora. La fracción fina continúa hacia la siguiente etapa, mientras que la fracción gruesa retorna a la chancadora.

El principio puede representarse de manera conceptual como:

Chancadora → Zaranda → Producto

con una corriente adicional:

Zaranda → Fracción gruesa → Chancadora.

La cantidad de material que retorna depende de las características de la alimentación, configuración del equipo y eficiencia de clasificación.

El operador debe considerar esta recirculación al evaluar la carga total que maneja la chancadora.

Transporte y almacenamiento

Una vez alcanzada la granulometría requerida para alimentar la molienda, el mineral puede ser transportado mediante fajas hacia un stockpile o tolva de almacenamiento.

El almacenamiento intermedio cumple una función operacional importante porque permite mantener una alimentación relativamente continua a los molinos incluso cuando existen variaciones temporales en el área de chancado.

Las fajas transportadoras y puntos de transferencia forman parte integral del flowsheet.

Los puntos de transferencia deben permitir que el material pase de una faja a otra o de una faja a una tolva sin generar acumulaciones excesivas, derrames o daños.

El operador debe controlar el estado de las fajas, rodillos, poleas, limpiadores, chutes, sensores y sistemas de parada.

Alimentación a molienda

Desde la tolva o stockpile, el mineral es extraído mediante alimentadores y enviado hacia el circuito de molienda.

La alimentación a molienda debe mantenerse relativamente estable porque el molino responde directamente a las variaciones de tonelaje y características del mineral.

La granulometría de alimentación constituye una variable fundamental. Un producto de chancado más grueso de lo establecido puede incrementar el trabajo requerido al molino y modificar su consumo energético.

Por esta razón, el área de chancado y el área de molienda deben considerarse como partes de un mismo sistema.

Molienda

La molienda constituye la etapa posterior de reducción fina.

Dependiendo del diseño, pueden utilizarse molinos SAG, molinos de bolas u otros sistemas. En algunos circuitos, un molino SAG puede recibir directamente el producto del chancado y posteriormente alimentar a molinos de bolas.

En otros diseños, el mineral chancado ingresa directamente a molinos de bolas.

La finalidad es obtener una granulometría suficientemente fina para lograr la liberación de los minerales de interés.

En el flowsheet, el molino aparece como una unidad central del circuito de molienda. Alrededor de él se encuentran sistemas de alimentación, agua, descarga, bombeo y clasificación.

Formación y transporte de la pulpa

En la molienda húmeda, el mineral se mezcla con agua para formar una pulpa.

La pulpa contiene partículas sólidas suspendidas en agua y debe ser transportada hacia el sistema de clasificación.

El control de la cantidad de agua es fundamental porque afecta la densidad de la pulpa y el comportamiento del circuito.

Las bombas de pulpa permiten transportar el material hacia los hidrociclones u otros equipos de clasificación.

En el flowsheet, el flujo puede representarse como:

Molino → descarga → cajón de alimentación → bomba → hidrociclones.

El operador debe comprender que una falla en el sistema de bombeo puede afectar inmediatamente la clasificación y, posteriormente, la estabilidad de la molienda.

Clasificación mediante hidrociclones

Los hidrociclones son utilizados frecuentemente para separar las partículas de acuerdo con su comportamiento dentro de un flujo hidráulico.

La pulpa ingresa al ciclón bajo presión. El equipo produce normalmente dos corrientes principales:

Overflow: corriente que contiene una mayor proporción de partículas finas y que puede avanzar hacia la concentración.

Underflow: corriente con una mayor proporción de partículas gruesas que retorna al molino.

El comportamiento real depende de las condiciones de operación y de las características del mineral.

La clasificación constituye uno de los elementos fundamentales del circuito cerrado de molienda.

Carga circulante

El retorno del underflow al molino genera la carga circulante.

La carga circulante representa material que ya pasó por el molino, fue clasificado como demasiado grueso y debe regresar para continuar su reducción.

En el flowsheet, esta corriente se representa mediante una flecha que conecta la descarga gruesa del clasificador con la alimentación del molino.

El circuito puede representarse de forma simplificada:

Molino → Hidrociclón → Overflow → Concentración

y

Hidrociclón → Underflow → Molino.

Esta configuración permite mantener una granulometría controlada en el producto final.

Producto de molienda

El producto fino obtenido mediante la clasificación puede avanzar hacia las etapas posteriores de concentración.

Dependiendo de la planta, puede dirigirse hacia flotación, concentración gravimétrica, lixiviación u otro proceso metalúrgico.

La granulometría del producto debe cumplir con las condiciones establecidas para la etapa siguiente.

Un producto demasiado grueso puede indicar una liberación insuficiente, mientras que una molienda excesivamente fina puede generar consumo energético innecesario y problemas en determinadas etapas de concentración.

Por esta razón, el control de la granulometría constituye uno de los objetivos principales del circuito.

Corrientes principales del flowsheet

Para interpretar correctamente un flowsheet, el operador debe diferenciar las principales corrientes del proceso.

La primera es la **alimentación fresca**, correspondiente al mineral que ingresa al circuito.

La segunda corresponde a las corrientes internas de recirculación, como el material grueso que retorna a las chancadoras o el underflow de los hidrociclones que retorna al molino.

La tercera corresponde al producto que abandona una determinada etapa y continúa hacia el proceso siguiente.

En los circuitos húmedos se incorpora además el flujo de agua, que participa en la formación y transporte de la pulpa.

Comprender estas corrientes permite interpretar mejor los balances de masa y las variaciones de carga de los equipos.

Flowsheet básico de referencia

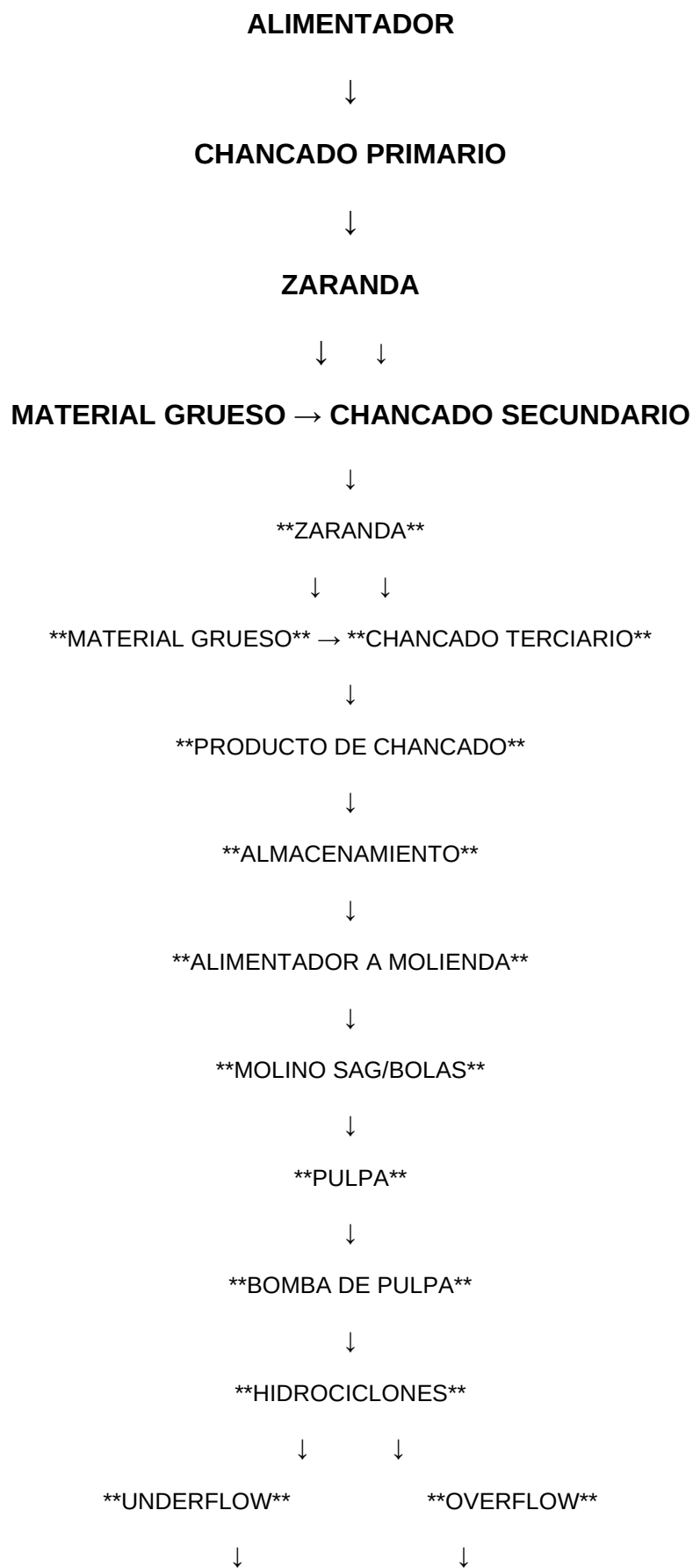
Un esquema académico simplificado del circuito puede expresarse de la siguiente manera:

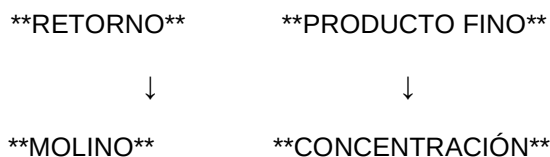
MINERAL DE MINA



TOLVA DE RECEPCIÓN







Este esquema representa una configuración general y no debe interpretarse como un diseño obligatorio para todas las plantas.

Lectura del flowsheet por parte del operador

El operador debe ser capaz de seguir cualquier corriente desde su origen hasta su destino. Al observar una desviación, debe identificar qué equipo está involucrado y qué otras operaciones pueden verse afectadas.

Por ejemplo, si se produce una reducción de la alimentación desde la tolva, el efecto puede observarse posteriormente en la chancadora, las fajas, el almacenamiento y finalmente en el molino.

Si una zaranda presenta una clasificación deficiente, puede aumentar la cantidad de material grueso enviado a la siguiente etapa o producir una granulometría fuera de especificación.

Si disminuye el rendimiento del sistema de bombeo, puede cambiar la presión de alimentación de los hidrociclones y modificar la clasificación.

Si el overflow contiene demasiado material grueso, puede existir una condición de clasificación inadecuada que afecte la liberación y recuperación posteriores.

Por esta razón, el flowsheet constituye una herramienta para interpretar el proceso y no únicamente un dibujo utilizado durante la capacitación.

Relación entre flowsheet y control operacional

El flowsheet permite relacionar los equipos con las principales variables de proceso. En el chancado se controlan principalmente alimentación, granulometría, potencia, abertura de descarga, niveles y condiciones mecánicas.

En las zarandas se controlan alimentación, vibración, distribución del material, humedad y eficiencia de clasificación.

En molienda se controlan tonelaje, potencia, carga, velocidad, agua, densidad y granulometría.

En clasificación se controlan presión, densidad, caudal y características del overflow y underflow.

Esta información permite al operador comprender dónde se origina una desviación y qué parte del circuito puede verse afectada.

Importancia del flowsheet para la seguridad

El conocimiento del flowsheet también tiene importancia para la seguridad. Antes de intervenir una instalación, el operador debe conocer qué equipos están conectados, qué materiales pueden encontrarse en cada punto y qué fuentes de energía están presentes.

Una intervención sobre una faja, chancadora, molino, bomba o hidrociclón no debe realizarse únicamente considerando el equipo individual. Pueden existir energías acumuladas, flujo de material, presión hidráulica, electricidad, movimiento mecánico y otros peligros provenientes de equipos conectados aguas arriba o aguas abajo.

Los procedimientos de bloqueo y etiquetado, aislamiento de energías y autorización de trabajos deben aplicarse de acuerdo con las normas y procedimientos establecidos por la operación.

El flowsheet proporciona una visión general del proceso, pero no reemplaza los procedimientos de seguridad, planos de bloqueo ni documentación técnica específica.

Importancia para la continuidad operacional

Una planta de chancado y molienda funciona como una cadena de operaciones interdependientes. Una interrupción en un equipo puede afectar las etapas anteriores y posteriores.

Por ejemplo, una parada del molino puede provocar acumulación de mineral en el área de almacenamiento. Una falla prolongada de una faja puede detener la alimentación de una chancadora. Una obstrucción en un chute puede detener una línea completa.

El conocimiento del flowsheet permite comprender estas relaciones y actuar de manera coordinada durante arranques, paradas, cambios de alimentación y situaciones anormales.

El operador debe conocer también las secuencias de arranque y parada establecidas por la planta. Generalmente, los circuitos se arrancan considerando el sentido del flujo del producto y las condiciones necesarias para evitar acumulaciones, mientras que las paradas se gestionan de acuerdo con procedimientos destinados a retirar o estabilizar el material del circuito.

Interpretación integral del circuito

El flowsheet debe entenderse como una representación del balance entre **reducción de tamaño, clasificación, transporte y recirculación**.

El chancado prepara el mineral para la molienda. La molienda continúa la reducción hasta alcanzar la liberación requerida. La clasificación separa las partículas según las condiciones del proceso. Las corrientes gruesas retornan cuando es necesario continuar la reducción, mientras que el producto que cumple las especificaciones avanza hacia la concentración.

La eficiencia global depende de la coordinación de todas estas operaciones.

Por ello, el operador debe evitar concentrarse exclusivamente en un equipo. El comportamiento de una chancadora puede estar relacionado con la alimentación de mina; la alimentación del molino depende del producto de chancado; la clasificación depende de la molienda y de las condiciones hidráulicas; y el producto final depende del equilibrio entre molienda y clasificación.

En conclusión, el flowsheet básico de una planta de chancado y molienda constituye una herramienta esencial para comprender la secuencia y relación entre las diferentes operaciones unitarias. Permite identificar el recorrido del mineral, distinguir las corrientes de producto y retorno, comprender la función de los principales equipos y relacionar las variables operacionales con el desempeño del circuito.

Para el operador, dominar el flowsheet significa poder responder tres preguntas fundamentales en cualquier momento de la operación: **de dónde viene el material, qué está ocurriendo con él y hacia dónde debe dirigirse**. Esta comprensión facilita la operación coordinada de chancadoras, zarandas, fajas, tolvas, molinos, bombas y clasificadores, contribuye a detectar desviaciones y permite mantener el circuito dentro de las condiciones establecidas de seguridad, capacidad y granulometría.

El flowsheet, por tanto, constituye la representación conceptual del proceso y sirve como base para comprender los procedimientos de operación, control de variables, identificación de fallas y coordinación entre las diferentes áreas de una planta concentradora.

Módulo 2. Operación de Equipos de Chancado

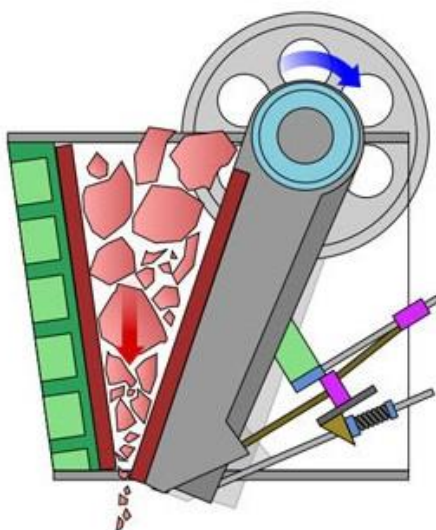
2.1. Chancadoras de mandíbula, giratorias y de cono

Las **chancadoras** son equipos fundamentales en una planta de procesamiento de minerales, ya que reducen el tamaño del mineral mediante esfuerzos mecánicos de **compresión, impacto y cizallamiento**, según el tipo de equipo y las características del material. El objetivo de la etapa de chancado es obtener un producto con una granulometría adecuada para las etapas posteriores, principalmente **molienda, concentración o clasificación**.

En una operación industrial se pueden utilizar diferentes tipos de chancadoras. Entre las más comunes se encuentran las **chancadoras de mandíbula, giratorias y de cono**. Cada una posee características específicas de diseño, capacidad y aplicación, por lo que el operador debe conocer su funcionamiento, principales componentes, variables de operación y condiciones que pueden provocar fallas o pérdidas de eficiencia.

Chancadora de mandíbula

La **chancadora de mandíbula** se utiliza principalmente en la **etapa primaria de chancado**, especialmente cuando se recibe mineral de gran tamaño proveniente de la mina. Su funcionamiento se basa en la compresión del material entre dos superficies: una **mandíbula fija** y una **mandíbula móvil**.



La mandíbula móvil realiza un movimiento de aproximación y alejamiento respecto de la mandíbula fija. Cuando ambas superficies se aproximan, el mineral es comprimido y fracturado. Al separarse, el material triturado descende por gravedad hacia la parte inferior de la cámara de chancado.

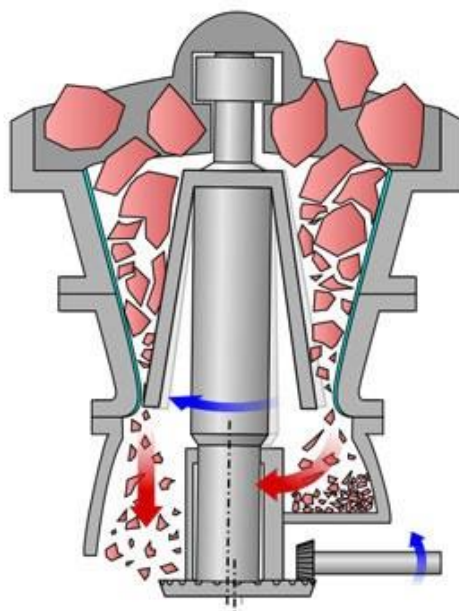
Sus principales componentes incluyen el **bastidor**, **mandíbula fija**, **mandíbula móvil**, **eje principal**, **placas de articulación**, **sistema de accionamiento**, **volante** y **mecanismos de regulación de la abertura de descarga**.

Una variable fundamental es la **abertura de descarga**, que determina en gran medida el tamaño máximo del producto obtenido. Una abertura demasiado grande puede generar un producto excesivamente grueso, mientras que una abertura demasiado pequeña puede aumentar la carga del equipo y favorecer atascos o sobrecargas.

Durante la operación, el operador debe controlar la alimentación, evitar la presencia de objetos metálicos o elementos no triturables y observar posibles señales de sobrecarga, vibraciones anormales, ruidos inusuales y aumento de temperatura en rodamientos.

Chancadora giratoria

La **chancadora giratoria** se utiliza principalmente para **chancado primario de grandes volúmenes de mineral**. Su principio de funcionamiento también se basa principalmente en la compresión, pero su configuración es diferente a la de una mandíbula.



El equipo posee un elemento cónico denominado **manto**, que se encuentra dentro de una superficie cóncava fija. El manto realiza un movimiento giratorio excéntrico, aproximándose progresivamente a la superficie cóncava y provocando la trituración del mineral.

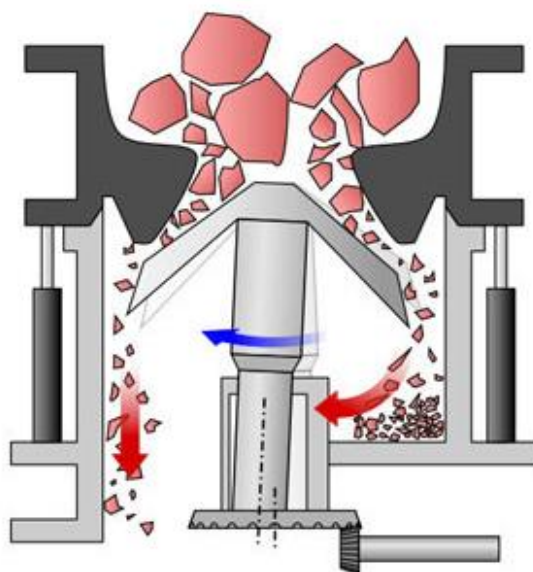
Una característica importante de las chancadoras giratorias es su **alta capacidad de procesamiento**, por lo que son frecuentes en operaciones mineras de gran escala. Pueden recibir grandes cantidades de mineral y trabajar de manera continua.

El operador debe prestar especial atención a la **alimentación uniforme**, evitando condiciones que provoquen acumulación de mineral o sobrecarga. También debe controlar

las variables indicadas por el sistema de instrumentación, como presión del sistema hidráulico, temperatura, lubricación, potencia del motor y posibles alarmas.

Chancadora de cono

La **chancadora de cono** se utiliza normalmente en etapas **secundarias, terciarias o cuaternarias**, dependiendo del diseño de la planta y de la granulometría requerida. Su funcionamiento es similar al de una chancadora giratoria, pero está diseñada para producir una reducción de tamaño más controlada.



El mineral ingresa por la parte superior y queda atrapado entre el **manto y el cóncavo**. El movimiento excéntrico del manto genera sucesivas fuerzas de compresión que fragmentan el mineral mientras este desciende por la cámara.

Entre las variables más importantes se encuentran la **abertura de descarga, velocidad del equipo, carga de alimentación, distribución granulométrica del mineral y potencia consumida**. Una alimentación deficiente o irregular puede reducir la eficiencia del chancado y producir variaciones en el tamaño del producto.

El operador debe verificar que la chancadora trabaje dentro de sus parámetros establecidos y que exista una adecuada lubricación y refrigeración. También debe observar el nivel de carga, las presiones de operación y cualquier vibración o ruido fuera de lo normal.

Criterios básicos de operación

Independientemente del tipo de chancadora, el operador debe comprender que la **alimentación estable y controlada** es esencial para mantener una operación eficiente. La sobrealimentación puede provocar sobrecarga, mientras que una alimentación insuficiente puede disminuir la capacidad y generar una operación inestable.

Antes del arranque se debe realizar una **inspección visual y operacional**, comprobando protecciones, sistemas de lubricación, niveles, correas, tolvas, elementos de transmisión y ausencia de personas en zonas peligrosas. Durante la operación se deben controlar las variables del equipo y comunicar inmediatamente cualquier condición anormal.

La seguridad es prioritaria. **Nunca se debe intervenir una chancadora en movimiento ni intentar retirar material atascado con el equipo energizado.** Toda intervención debe realizarse aplicando los procedimientos establecidos de bloqueo, aislamiento y control de energías peligrosas.

El conocimiento de las diferencias entre las chancadoras de mandíbula, giratorias y de cono permite al operador comprender su función dentro del circuito y mantener una operación **segura, estable y eficiente**, contribuyendo a obtener una alimentación adecuada para las siguientes etapas del procesamiento mineral.

2.2. Componentes, funcionamiento y condiciones de operación

El conocimiento de los **componentes, principios de funcionamiento y condiciones de operación** de las chancadoras es fundamental para que el operador pueda controlar el proceso, identificar desviaciones y actuar oportunamente ante situaciones anormales. Aunque existen diferentes diseños, las chancadoras de mandíbula, giratorias y de cono comparten elementos funcionales relacionados con la alimentación, trituración, descarga, transmisión de potencia, lubricación y protección del equipo.

Componentes principales

En una **chancadora de mandíbula**, los componentes principales son el bastidor, la mandíbula fija, la mandíbula móvil, el eje, el sistema de articulación, las placas de desgaste, el volante y el mecanismo de accionamiento. Las **mandíbulas y placas de desgaste** están sometidas directamente al contacto con el mineral y, por ello, experimentan desgaste progresivo. La abertura entre las mandíbulas determina el tamaño del material descargado.

En las **chancadoras giratorias y de cono**, los elementos fundamentales incluyen el bastidor, eje principal, conjunto excéntrico, manto, cóncavo, sistema de accionamiento y sistemas de lubricación e instrumentación. En estos equipos, el movimiento excéntrico del conjunto de trituración genera la compresión necesaria para fragmentar el mineral.

Los **elementos de transmisión** permiten transferir la potencia del motor al mecanismo de trituración. Dependiendo del diseño pueden incluir acoplamientos, correas, poleas, engranajes y otros componentes. Su correcto funcionamiento es necesario para mantener una velocidad y potencia de operación estables.

Los **sistemas de lubricación** reducen la fricción y el desgaste de rodamientos, engranajes, ejes y otros elementos móviles. La presión, temperatura, nivel y flujo del lubricante deben mantenerse dentro de los valores establecidos por el fabricante. Una falla de lubricación puede provocar rápidamente sobrecalentamiento y daños graves.

Funcionamiento del circuito de chancado

El mineral llega normalmente desde una **tolva de alimentación** y es transportado hacia la chancadora mediante alimentadores o sistemas de transporte. La alimentación debe mantenerse lo más uniforme posible para evitar variaciones excesivas de carga.

Dentro de la cámara de chancado, el mineral queda sometido a fuerzas que producen su fractura. Después de alcanzar un tamaño suficientemente pequeño, el material sale por la abertura de descarga y continúa hacia la siguiente etapa mediante fajas transportadoras, zarandas u otros equipos.

El operador debe comprender que la chancadora no trabaja de manera aislada. Su rendimiento depende también de las condiciones de los equipos **antes y después de ella**. Una alimentación irregular, una zaranda obstruida o una faja transportadora detenida pueden afectar directamente la operación de la chancadora.

Condiciones de operación

Una condición fundamental es mantener una **alimentación adecuada y estable**. La sobrealimentación puede producir aumentos de corriente o potencia, acumulación de material y sobrecarga. Por otro lado, una alimentación demasiado baja puede reducir la capacidad del equipo y afectar la estabilidad del circuito.

La **granulometría del mineral de alimentación** también influye considerablemente. La presencia de bloques excesivamente grandes puede generar atascos o esfuerzos elevados. Asimismo, materiales con características diferentes a las previstas en el diseño pueden modificar el consumo de energía, capacidad y desgaste.

La **abertura de descarga** debe mantenerse de acuerdo con los parámetros establecidos para obtener el tamaño de producto requerido. Su modificación debe realizarse únicamente mediante los procedimientos autorizados y considerando el efecto sobre la capacidad, potencia y granulometría.

El operador debe controlar continuamente las variables disponibles en el panel o sistema de control, incluyendo **corriente o potencia del motor, presión de lubricación, temperaturas, niveles, vibraciones, velocidad y alarmas**. Los valores normales dependen del modelo específico y deben compararse con los límites establecidos por el fabricante y los procedimientos de la planta.

Señales de operación anormal

Algunas señales que requieren atención son **ruidos metálicos inusuales, vibraciones excesivas, aumento de temperatura, caída de presión de lubricación, incremento anormal del consumo de potencia, presencia de humo, fugas de aceite o acumulación de mineral**.

Ante una condición anormal, el operador debe seguir el procedimiento establecido, informar al responsable correspondiente y evitar intervenciones improvisadas. Si existe riesgo para

las personas o posibilidad de daño al equipo, se debe detener la operación conforme al procedimiento de emergencia.

La inspección operacional debe realizarse tanto **antes del arranque como durante el funcionamiento**. El objetivo no es solamente detectar fallas, sino identificar anticipadamente condiciones que puedan evolucionar hacia una avería.

En consecuencia, una operación eficiente de chancado depende de mantener **alimentación estable, parámetros dentro de rango, adecuada lubricación, control del desgaste y coordinación con los equipos del circuito**. El operador cumple un papel esencial al vigilar estas condiciones y comunicar oportunamente cualquier desviación.

2.3. Alimentación, descarga y regulación de la abertura de chancado

La **alimentación, descarga y regulación de la abertura de chancado** son variables fundamentales para controlar el rendimiento de una planta. Una operación adecuada permite mantener una granulometría estable, evitar sobrecargas y aprovechar correctamente la capacidad del equipo. El operador debe comprender la relación entre estas variables y realizar los ajustes siguiendo siempre los parámetros definidos por el fabricante y los procedimientos de la planta.

Alimentación de la chancadora

La alimentación corresponde al ingreso de mineral a la cámara de chancado. Para obtener una operación estable, el mineral debe ingresar de manera **continua, uniforme y dentro de la capacidad diseñada del equipo**.

Una alimentación excesiva puede provocar acumulación de material, aumento de la potencia o corriente del motor, reducción de la capacidad efectiva y sobrecarga de los componentes. En cambio, una alimentación insuficiente puede generar una operación inestable, disminuir la productividad y modificar las características del producto.

También es importante controlar el **tamaño máximo del mineral de alimentación**. Los bloques que superan la capacidad de recepción del equipo pueden producir atascos y esfuerzos excesivos. Por esta razón, la alimentación debe estar previamente controlada mediante tronadura, selección, parrillas, grizzly u otros sistemas disponibles en la planta.

La distribución del mineral dentro de la cámara también es importante. Una alimentación correctamente distribuida permite utilizar de manera más uniforme las superficies de trituración y reduce condiciones de desgaste localizado. En chancadoras de cono y giratorias, una alimentación inadecuada puede afectar la estabilidad de la cámara y la distribución granulométrica del producto.

El operador debe observar continuamente la **tolva, alimentador, nivel de material y comportamiento de la chancadora**, además de controlar las variables indicadas por el sistema de instrumentación.

Descarga del mineral

Después de ser reducido de tamaño, el mineral debe salir de la chancadora sin restricciones. La **abertura de descarga** y la capacidad del sistema posterior deben ser suficientes para evitar acumulaciones debajo del equipo.

Una descarga obstruida puede provocar acumulación de mineral, aumento de carga y condiciones peligrosas para la operación. Por ello, es necesario verificar que las fajas transportadoras, zarandas y otros equipos posteriores estén funcionando correctamente.

La granulometría de descarga constituye uno de los principales indicadores del desempeño del chancado. Si el producto comienza a salir demasiado grueso, puede existir desgaste de los elementos de trituración, modificación de la abertura, alimentación inadecuada u otra condición operacional que debe ser investigada.

El operador debe evitar modificar parámetros únicamente para compensar temporalmente un problema del circuito. Los ajustes deben realizarse considerando el **balance completo de la planta**.

Regulación de la abertura de chancado

La **abertura de descarga** determina en gran medida el tamaño del producto obtenido. Al reducir la abertura, normalmente se obtiene un producto más fino, pero pueden aumentar la carga y el consumo de energía. Al aumentar la abertura, aumenta el tamaño del producto y puede incrementarse la capacidad, dependiendo del equipo y de las condiciones de alimentación.

El método de regulación depende del tipo de chancadora. En una **chancadora de mandíbula**, la abertura puede regularse mediante sistemas mecánicos o hidráulicos según el diseño. En chancadoras de cono, la regulación suele realizarse mediante mecanismos que modifican la posición relativa entre el manto y el cóncavo. Los equipos modernos pueden incorporar sistemas hidráulicos y control automático.

El operador debe conocer la diferencia entre la **abertura nominal o configurada** y la abertura efectiva durante la operación, ya que el desgaste de los revestimientos puede modificar progresivamente las condiciones reales de trituración.

La regulación nunca debe realizarse de manera improvisada. Antes de efectuar cualquier ajuste se deben verificar las instrucciones del fabricante, las condiciones de seguridad y los parámetros establecidos para el circuito. Cuando la regulación requiere intervención física en el equipo, deben aplicarse los procedimientos correspondientes de **aislamiento y bloqueo de energías**.

Control operacional

La alimentación y descarga deben mantenerse coordinadas. Si la alimentación aumenta mientras el sistema de descarga no tiene capacidad suficiente, se puede producir acumulación y sobrecarga. De igual manera, una interrupción de la descarga puede obligar a detener la alimentación y posteriormente la chancadora según la secuencia establecida.

Durante la operación, el operador debe vigilar principalmente **nivel de alimentación, corriente o potencia, presión y temperatura de lubricación, granulometría del producto, vibraciones y alarmas.**

El objetivo no es simplemente obtener el mayor tonelaje posible, sino mantener un equilibrio entre **capacidad, granulometría, consumo energético, desgaste y seguridad.** Una correcta regulación permite que la chancadora trabaje dentro de sus condiciones de diseño y entregue un producto adecuado para la siguiente etapa del proceso.

2.4. Zarandas y clasificación en el circuito de chancado

Las **zarandas** son equipos utilizados para clasificar el mineral según su tamaño y cumplen una función esencial dentro del circuito de chancado. Su operación permite separar las partículas que ya alcanzaron la granulometría requerida de aquellas que todavía necesitan una reducción adicional. De esta manera, se evita enviar material innecesariamente grueso hacia las etapas posteriores y se mejora la eficiencia general del circuito.

La clasificación mediante zarandas se basa principalmente en el **paso de las partículas a través de aberturas de tamaño determinado.** El material que atraviesa la superficie de clasificación corresponde al **undersize o pasante**, mientras que el material que no logra pasar corresponde al **oversize o sobretamaño.**

Tipos y componentes principales

En plantas de chancado son frecuentes las **zarandas vibratorias**, que utilizan un movimiento vibratorio para favorecer la separación de las partículas. Según el diseño, pueden ser inclinadas u horizontales y contar con una o varias superficies de clasificación.



Entre sus principales componentes se encuentran la **caja o bastidor, superficie de clasificación, mallas o paneles, mecanismos de excitación, motores, resortes o elementos de soporte y sistemas de transmisión.** Las superficies pueden fabricarse con diferentes materiales y tamaños de abertura, dependiendo del tipo de mineral y de la granulometría requerida.

El operador debe conocer las características de la superficie instalada, ya que el **tamaño y forma de las aberturas** influyen directamente en la clasificación. Una malla desgastada, rota o deformada puede permitir el paso de partículas demasiado grandes y afectar la calidad del producto.

Funcionamiento dentro del circuito

La zaranda puede instalarse antes o después de una chancadora, dependiendo de la configuración de la planta. Cuando se encuentra antes de una chancadora, puede realizar una **clasificación previa**, retirando el material que ya tiene el tamaño adecuado y evitando que sea chancado nuevamente. Esto se conoce como **chancado en circuito abierto con clasificación previa** o puede formar parte de configuraciones más complejas.

Cuando la zaranda se encuentra después de una chancadora, separa el producto según su tamaño. El material que cumple con la granulometría requerida continúa hacia la siguiente etapa, mientras que el sobretamaño puede ser **recirculado hacia la chancadora** para una nueva reducción. Esta configuración constituye un **circuito cerrado**.

El circuito cerrado permite controlar mejor el tamaño máximo del producto, pero requiere coordinación entre la chancadora, la zaranda y los sistemas de transporte. Una alteración en uno de estos equipos puede afectar rápidamente a todo el circuito.

Variables de operación

Una de las principales variables es la **alimentación de la zaranda**. Una carga excesiva puede reducir la eficiencia de clasificación porque las partículas forman una capa demasiado gruesa y disminuye la posibilidad de que las partículas pequeñas alcancen la superficie de clasificación.

La **humedad del mineral** también puede afectar significativamente el proceso. Los materiales húmedos o arcillosos pueden adherirse a las superficies, obstruir las aberturas y reducir el área efectiva de clasificación. En estas condiciones puede aumentar la cantidad de material fino que termina en el sobretamaño.

La **amplitud y frecuencia de vibración** son otras variables importantes. Los valores adecuados dependen del diseño del equipo y de las características del mineral. Una vibración incorrecta puede producir una clasificación deficiente, desgaste excesivo o problemas mecánicos.

También deben controlarse el **estado de las mallas, distribución de la alimentación, inclinación, carga del equipo, vibraciones, ruidos y condiciones de los soportes y elementos de transmisión**.

Función del operador

Durante la operación, el operador debe verificar que la alimentación esté distribuida correctamente sobre la superficie de clasificación y que no existan acumulaciones de mineral. Debe observar el tamaño del material en las corrientes de **pasante y sobretamaño**, identificando cambios que puedan indicar problemas en la zaranda o en la chancadora.

Entre las condiciones anormales se encuentran **vibraciones excesivas, ruidos inusuales, rotura de mallas, acumulación de material, obstrucción de aberturas, sobrecarga y desplazamiento irregular del mineral**.

Si una malla se rompe, no debe realizarse una reparación con el equipo en funcionamiento. La intervención debe efectuarse aplicando los procedimientos de **detención, aislamiento y bloqueo de energías** establecidos por la operación.

Una correcta clasificación permite que el circuito de chancado trabaje de manera más eficiente. La coordinación entre **alimentación, chancado, zarandeo y recirculación** determina en gran medida la estabilidad del proceso, la granulometría final y el rendimiento de los equipos. Por ello, el operador debe considerar la zaranda no como un equipo independiente, sino como una parte integral del circuito de reducción de tamaño.

2.5. Circuitos abiertos y cerrados de chancado

Los **circuitos de chancado** determinan cómo circula el mineral entre las chancadoras, zarandas, fajas transportadoras y demás equipos del proceso. Las dos configuraciones principales son el **circuito abierto** y el **circuito cerrado**. La selección depende de la granulometría requerida, capacidad de procesamiento, características del mineral y configuración general de la planta.

Circuito abierto

En un **circuito abierto**, el mineral pasa por la chancadora y, después de la reducción de tamaño, continúa directamente hacia la siguiente etapa del proceso sin que exista una clasificación que devuelva el sobretamaño a la misma chancadora.

Una configuración básica puede comprender **tolva → alimentador → chancadora → faja transportadora → siguiente etapa**. También puede existir una zaranda dentro del circuito, pero sin recirculación del material grueso hacia la chancadora.

La principal ventaja del circuito abierto es su **simplicidad operacional**. Requiere menos equipos, tiene menor complejidad de control y puede ser adecuado cuando la granulometría obtenida directamente de la chancadora es suficiente para la etapa siguiente.

Sin embargo, el producto puede presentar una **distribución granulométrica más amplia**, incluyendo partículas relativamente gruesas. Por esta razón, el circuito abierto no siempre es apropiado cuando se necesita controlar estrictamente el tamaño máximo del producto.

El operador debe controlar especialmente la alimentación, abertura de descarga y condiciones de la chancadora, ya que no existe una recirculación que permita una segunda oportunidad de reducción para las partículas que salen demasiado grandes.

Circuito cerrado

En un **circuito cerrado**, el producto de la chancadora pasa por una **zaranda**, que separa el material según su tamaño. El material que cumple con la granulometría especificada continúa hacia la siguiente etapa, mientras que el material de mayor tamaño es **recirculado hacia la chancadora**.

Una configuración típica puede ser:

Tolva → alimentador → chancadora → zaranda → producto final + sobretamaño → recirculación a la chancadora.

La recirculación permite que las partículas que no alcanzaron el tamaño requerido sean sometidas nuevamente al proceso de reducción. Por ello, el circuito cerrado proporciona un **mayor control sobre la granulometría del producto**.

Una ventaja importante es que puede reducir la cantidad de material excesivamente grueso que pasa a la etapa siguiente. Esto resulta especialmente útil cuando la molienda u otra operación posterior requiere una alimentación con características granulométricas determinadas.

Sin embargo, el circuito cerrado es más complejo. La cantidad de material que circula por la chancadora puede ser superior al tonelaje de producto final debido a la **carga circulante**. Por ello, la capacidad de la chancadora, zaranda, fajas y demás equipos debe ser suficiente para manejar este flujo.

Carga circulante y estabilidad del circuito

La **carga circulante** representa el material que retorna desde la clasificación hacia la chancadora. Si aumenta excesivamente, puede producir una acumulación progresiva de material dentro del circuito y provocar sobrecarga de los equipos.

Un incremento de la carga circulante puede estar relacionado con una alimentación demasiado gruesa, desgaste de los elementos de chancado, abertura de descarga incorrecta, problemas de clasificación o condiciones de humedad que dificulten el zarandeo.

El operador debe observar la relación entre la **alimentación fresca, producto final y material recirculado**. Una modificación importante en cualquiera de estas corrientes puede afectar el equilibrio del circuito.

Operación y control

En ambos tipos de circuito es fundamental mantener una **alimentación uniforme** y controlar las variables de la chancadora. En los circuitos cerrados, además, se debe prestar especial atención al funcionamiento de la zaranda y al sistema de retorno del sobretamaño.

Una zaranda sobrecargada o con mallas obstruidas puede reducir la eficiencia de clasificación y aumentar la cantidad de material que retorna. Esto puede elevar la carga de la chancadora y generar mayor consumo energético y desgaste.

El operador debe vigilar **corriente o potencia del motor, niveles de alimentación, granulometría, vibraciones, temperaturas, lubricación y alarmas**, comparando los valores con los rangos establecidos por el fabricante y los procedimientos de la planta.

La elección entre circuito abierto y cerrado no significa que uno sea universalmente mejor que el otro. El **circuito abierto** ofrece simplicidad y puede ser suficiente cuando no se requiere un control granulométrico estricto. El **circuito cerrado** proporciona un control más preciso del tamaño del producto, pero implica mayor complejidad y carga circulante.

En la práctica, el operador debe comprender el circuito completo y reconocer que **la estabilidad de una chancadora depende también de la alimentación, clasificación, transporte y recirculación**. Un buen control de estos elementos permite mantener una operación segura, estable y eficiente.

2.6. Problemas operativos, atascos y acciones correctivas

Durante la operación de una planta de chancado pueden presentarse diferentes **problemas operativos** que afectan la capacidad, granulometría, disponibilidad y seguridad de los equipos. El operador debe reconocer tempranamente estas condiciones, identificar sus posibles causas y aplicar las acciones establecidas en los procedimientos de operación. La prioridad siempre debe ser **proteger a las personas y evitar daños al equipo**, antes que intentar recuperar la producción.

Principales problemas operativos

Uno de los problemas más frecuentes es la **sobrecarga de la chancadora**. Puede producirse por una alimentación excesiva, mineral demasiado grueso, acumulación en la descarga, material húmedo o arcilloso, una abertura de descarga inadecuada o problemas en los equipos posteriores. Normalmente puede observarse mediante un incremento de la corriente o potencia del motor, disminución de la capacidad, vibraciones o activación de alarmas.

Otro problema es la **alimentación irregular**. Una alimentación intermitente puede generar variaciones en la carga y afectar la granulometría del producto. El operador debe verificar el funcionamiento del alimentador, nivel de la tolva y distribución del mineral.

También puede presentarse **producto excesivamente grueso**. Entre las posibles causas se encuentran el desgaste de mandíbulas, manto o cóncavos, una abertura de descarga incorrecta, alimentación fuera de las condiciones previstas o problemas de clasificación. Antes de modificar parámetros, se debe identificar la causa y verificar las condiciones reales del equipo.

Atascos en la chancadora

Los **atascos** ocurren cuando el mineral u otro objeto impide el movimiento normal del material a través de la cámara de chancado. Pueden producirse por bloques sobredimensionados, presencia de objetos metálicos, acumulación de material o problemas en la descarga.

Un atasco puede provocar rápidamente **sobrecarga, aumento de potencia, daños mecánicos y riesgos graves para el personal**. Por esta razón, nunca se debe intentar retirar manualmente el material mientras la chancadora esté funcionando.

Ante un atasco, el operador debe seguir la secuencia definida por la planta. Generalmente implica **detener la alimentación**, detener el equipo según el procedimiento correspondiente, aislar las fuentes de energía y aplicar el sistema de **bloqueo y etiquetado (LOTO)** cuando sea necesaria una intervención.

Solo después de confirmar que el equipo está completamente detenido, aislado y en condiciones seguras, el personal autorizado puede realizar la limpieza o retiro del material utilizando las herramientas y métodos establecidos. **Está prohibido ingresar a la cámara de chancado o introducir manos, barras u otras herramientas mientras exista movimiento o energía peligrosa.**

Atascos en zarandas y descarga

Las zarandas también pueden presentar **obstrucción de las mallas**, acumulación de material o reducción de la capacidad de clasificación. La humedad y presencia de arcillas pueden favorecer el cegamiento de las aberturas, reduciendo el área efectiva de paso.

Una descarga obstruida debajo de la chancadora puede generar acumulación progresiva de mineral y sobrecargar el equipo. Por ello, el operador debe comprobar que las fajas y equipos posteriores estén disponibles antes de aumentar la alimentación.

Acciones correctivas

Las acciones correctivas deben realizarse de acuerdo con la naturaleza del problema. Ante una sobrecarga, puede ser necesario **reducir o detener temporalmente la alimentación**, siempre siguiendo la secuencia operacional establecida. Si existe una falla mecánica, eléctrica o de lubricación, el operador debe detener el equipo cuando corresponda y comunicar la condición al área responsable.

Cuando se detecten ruidos anormales, vibraciones excesivas, aumento de temperatura, fugas de lubricante, pérdida de presión o alarmas, no se debe ignorar la señal ni continuar operando sin evaluación. La información registrada por el operador puede facilitar considerablemente el diagnóstico y mantenimiento posterior.

Después de solucionar el problema, el reinicio debe realizarse siguiendo la **secuencia establecida para el circuito**, verificando primero que no existan personas trabajando en zonas peligrosas, que las protecciones estén instaladas y que los equipos posteriores estén disponibles.

El operador debe comprender que una acción correctiva no consiste simplemente en eliminar el síntoma. Es necesario identificar la **causa del problema** para evitar que vuelva a producirse. Por ejemplo, si una chancadora se sobrecarga repetidamente, aumentar la abertura o reducir la alimentación puede resolver temporalmente la situación, pero también debe investigarse si existe una causa relacionada con la granulometría de alimentación, clasificación, desgaste o capacidad del circuito.

La correcta respuesta ante problemas operativos requiere **observación, comunicación, disciplina operacional y cumplimiento de los procedimientos de seguridad**. Un operador competente no arriesga su integridad para recuperar producción: primero controla la condición peligrosa, luego informa, corrige mediante el procedimiento autorizado y finalmente verifica que el circuito vuelva a operar dentro de sus condiciones normales.

Módulo 3. Operación de Equipos de Molienda y Control del Producto

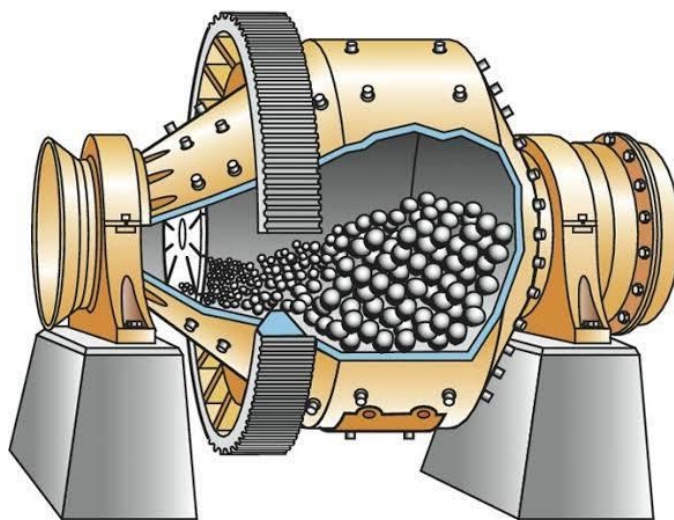
3.1. Molinos de bolas y molinos de barras

Los **molinos de bolas y molinos de barras** son equipos utilizados en la etapa de molienda para reducir el tamaño del mineral después del chancado. Su función es producir un material suficientemente fino para facilitar las etapas posteriores, como **clasificación, flotación, concentración gravimétrica o lixiviación**, según el proceso de la planta.

A diferencia del chancado, donde predominan esfuerzos relativamente intensos sobre partículas de mayor tamaño, la molienda trabaja con partículas más pequeñas y busca una **reducción granulométrica más fina y controlada**. El operador debe comprender el funcionamiento del molino y controlar sus principales variables para mantener una operación estable.

Molinos de bolas

El **molino de bolas** es un cilindro rotatorio parcialmente lleno con **cuerpos molidores esféricos**, normalmente de acero. Al girar el cilindro, las bolas son elevadas por la rotación y posteriormente caen o ruedan dentro del molino, generando fuerzas de **impacto y abrasión** sobre el mineral.



El mineral ingresa al molino junto con agua cuando se trata de molienda húmeda. Durante la rotación, las partículas quedan atrapadas entre los cuerpos molidores y son progresivamente reducidas de tamaño. El material molido sale del equipo y continúa hacia la etapa de clasificación.

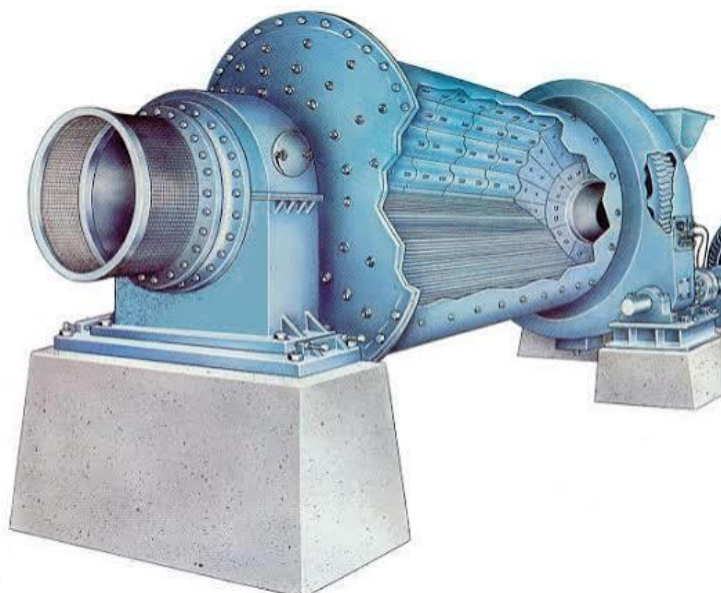
Entre sus principales componentes se encuentran el **casco o cilindro, revestimientos internos, cuerpos molidores, alimentación, descarga, sistema de transmisión, motor,**

reductores o engranajes, cojinetes y sistema de lubricación. Los revestimientos protegen el cilindro contra el desgaste y contribuyen al movimiento adecuado de las bolas y del mineral.

El rendimiento del molino depende de factores como **velocidad de rotación, carga de bolas, nivel de llenado, características del mineral, alimentación y cantidad de agua.** Una operación incorrecta puede provocar molienda insuficiente, exceso de consumo energético, desgaste acelerado o sobrecarga.

Molinos de barras

El **molino de barras** utiliza barras cilíndricas de acero como cuerpos moledores. Su funcionamiento se basa principalmente en la **abrasión y compresión**, aunque también existe impacto durante el movimiento de las barras.



Las barras se desplazan dentro del cilindro y actúan sobre el mineral, produciendo una reducción progresiva del tamaño. Debido a la geometría de los cuerpos moledores, el molino de barras puede generar una distribución relativamente controlada del producto y reducir la tendencia a producir cantidades excesivas de partículas muy finas en determinadas aplicaciones.

Sus componentes principales son similares a los del molino de bolas: **cilindro, revestimientos, barras de acero, sistemas de alimentación y descarga, motor, transmisión, cojinetes y lubricación.**

Los molinos de barras se utilizan principalmente cuando se requiere una molienda relativamente gruesa o como etapa intermedia antes de una molienda más fina. La aplicación concreta depende del diseño del circuito y de las características del mineral.

Diferencias entre ambos equipos

La principal diferencia es el tipo de cuerpo molidor utilizado. El **molino de bolas utiliza bolas**, mientras que el **molino de barras utiliza barras de acero**. Esto modifica el mecanismo de reducción, la distribución del producto y las condiciones de operación.

En términos generales, los molinos de barras suelen emplearse para obtener productos más gruesos, mientras que los molinos de bolas son ampliamente utilizados para **molienda secundaria y fina**. Sin embargo, el tamaño final no depende exclusivamente del tipo de molino, sino también de la configuración del circuito, condiciones de alimentación, clasificación y parámetros operacionales.

Condiciones básicas de operación

El operador debe controlar la **alimentación de mineral**, evitando variaciones bruscas que puedan modificar la carga interna del molino. En molienda húmeda, el **caudal de agua** es especialmente importante porque afecta la densidad de la pulpa, transporte del mineral y comportamiento de la clasificación.

También deben vigilarse la **corriente o potencia del motor, velocidad de rotación, nivel de carga, presión y temperatura de lubricación, vibraciones, ruido y condiciones de los cojinetes o rodamientos**.

Un ruido anormal puede indicar cambios en la carga interna, problemas de revestimientos, condiciones inadecuadas de operación u otras fallas. Asimismo, un incremento anormal de temperatura o una disminución de la presión de lubricación requiere atención inmediata.

La operación debe mantenerse dentro de los parámetros establecidos por el fabricante y por los procedimientos de la planta. **Nunca se debe abrir, ingresar o intervenir un molino mientras exista movimiento o energía peligrosa**. Las inspecciones y trabajos de mantenimiento requieren la correspondiente detención, aislamiento y bloqueo de energías.

En conclusión, los molinos de bolas y de barras constituyen equipos esenciales para la reducción fina del mineral. El operador debe conocer sus componentes, diferencias y variables principales para mantener una molienda **estable, segura y eficiente**, proporcionando un producto adecuado para la clasificación y las etapas posteriores del procesamiento.

3.2. Componentes y funcionamiento de los sistemas de molienda

Los **sistemas de molienda** están formados por un conjunto de equipos que trabajan de manera integrada para reducir el tamaño del mineral y entregar un producto con las características requeridas por las etapas posteriores. El molino es el equipo principal, pero su funcionamiento depende de otros elementos como **alimentación, agua, descarga, clasificación, transporte, lubricación y sistemas de control**.

El operador debe comprender la función de cada componente y la relación entre ellos, ya que una alteración en cualquiera de estos elementos puede modificar el comportamiento del circuito completo.

Componentes principales del molino

El **casco o cilindro** constituye la estructura principal del molino. Es una envolvente cilíndrica que gira alrededor de su eje y contiene el mineral y los cuerpos moledores. En su interior se encuentran los **revestimientos**, cuya función es proteger el casco frente al desgaste y proporcionar una superficie adecuada para levantar y desplazar la carga.

Los **cuerpos moledores** son los elementos encargados de transmitir energía al mineral. En los molinos de bolas se utilizan bolas de acero, mientras que en los molinos de barras se utilizan barras de acero. Su movimiento dentro del molino genera las fuerzas necesarias para producir la fragmentación.

El sistema de **alimentación** permite introducir el mineral al molino de forma controlada. Puede incluir tolvas, alimentadores, canaletas y dispositivos diseñados para distribuir adecuadamente el material.

El sistema de **descarga** permite retirar el producto molido. Dependiendo del diseño, puede utilizar diferentes configuraciones, como descarga por rebose u otros sistemas específicos. Su correcto funcionamiento es esencial para evitar acumulación de material dentro del equipo.

Sistema de accionamiento

El molino necesita una cantidad considerable de energía para mantener la rotación. El **motor eléctrico** proporciona la potencia necesaria y esta se transmite mediante diferentes sistemas, según el diseño del equipo.

Entre los elementos de transmisión pueden encontrarse **acoplamientos, reductores, piñones y coronas dentadas**, aunque algunos molinos modernos utilizan sistemas de accionamiento diferentes. Estos componentes deben mantenerse correctamente lubricados y alineados.

El operador debe observar posibles **ruidos anormales, vibraciones, aumento de temperatura o fugas de lubricante**, ya que pueden indicar problemas en el sistema de accionamiento.

Sistema de lubricación

La lubricación es fundamental para proteger los elementos sometidos a fricción y carga. Dependiendo del molino, puede existir lubricación de **cojinetes, rodamientos, engranajes y otros componentes móviles**.

El sistema puede incluir bombas, depósitos, filtros, intercambiadores de calor, tuberías, sensores de presión y temperatura. El operador debe verificar los niveles, presión, temperatura y flujo del lubricante de acuerdo con los parámetros establecidos.

Una disminución de presión o aumento excesivo de temperatura puede indicar una condición que requiere intervención. **No se debe continuar operando un equipo cuando**

los sistemas de protección indiquen una condición crítica, salvo que el procedimiento operativo autorizado establezca otra acción.

Molienda húmeda y control de la pulpa

En la **molienda húmeda**, el mineral se mezcla con agua para formar una pulpa. La cantidad de agua influye en la densidad, viscosidad, transporte del material y eficiencia general del circuito.

Una cantidad insuficiente de agua puede generar una pulpa demasiado densa, dificultando el movimiento del material y su descarga. Un exceso de agua puede producir una pulpa demasiado diluida y modificar las condiciones de clasificación posteriores.

Por esta razón, el operador debe controlar el **caudal de agua y las características de la pulpa**, utilizando los instrumentos disponibles y los valores establecidos para el proceso.

Clasificación y recirculación

En muchos circuitos, el molino trabaja conjuntamente con un **hidrociclón, zaranda u otro sistema de clasificación**. El clasificador separa el material según su tamaño y permite enviar el producto que cumple con la especificación hacia la siguiente etapa, mientras que las partículas demasiado gruesas pueden retornar al molino.

Esta recirculación genera una **carga circulante**, por lo que la alimentación total que recibe el molino puede ser considerablemente mayor que la alimentación fresca.

Una alteración en la clasificación puede modificar rápidamente la carga del molino. Por ejemplo, una clasificación deficiente puede provocar que partículas gruesas avancen hacia el proceso o que una cantidad excesiva de material retorne al molino.

Control del sistema de molienda

Durante la operación, el operador debe controlar las principales variables del circuito: **alimentación de mineral, agua, potencia o corriente del motor, velocidad del molino, nivel de carga, densidad de pulpa, presión y temperatura de lubricación, condiciones de descarga y comportamiento del clasificador**.

Estas variables están relacionadas entre sí. Por ello, un cambio en una de ellas debe evaluarse considerando sus posibles efectos sobre las demás.

El objetivo del sistema de molienda no es simplemente mantener el molino girando, sino conseguir una **reducción de tamaño estable y eficiente**, utilizando la energía disponible de manera adecuada y entregando un producto con la granulometría requerida.

El operador cumple un papel esencial en este proceso mediante la **observación continua, control de parámetros, detección temprana de desviaciones y comunicación de condiciones anormales**. Una correcta coordinación entre molino, alimentación, clasificación, agua, transporte y lubricación permite mantener un circuito de molienda seguro, estable y productivo.

3.3. Variables de operación: alimentación, carga, velocidad y agua

El rendimiento de un sistema de molienda depende del control adecuado de sus principales **variables de operación**. Entre las más importantes se encuentran la **alimentación de mineral, carga interna del molino, velocidad de rotación y cantidad de agua**. Estas variables están directamente relacionadas y cualquier modificación en una de ellas puede afectar la capacidad, consumo de energía, granulometría y estabilidad del proceso.

Alimentación de mineral

La **alimentación** corresponde al mineral que ingresa al molino por unidad de tiempo. Mantener una alimentación estable es fundamental para evitar variaciones en la carga interna y en las características del producto.

Una alimentación excesiva puede provocar **sobrecarga del molino**, aumento del consumo de potencia, reducción de la eficiencia de molienda y dificultades en la descarga. Por otro lado, una alimentación insuficiente disminuye la capacidad de procesamiento y puede generar condiciones de operación inestables.

También debe controlarse la **granulometría de alimentación**. Si el mineral ingresa con un tamaño mayor al previsto en el diseño, el molino necesitará mayor energía para alcanzar el tamaño requerido. Esto puede aumentar el consumo energético y reducir la capacidad efectiva.

El operador debe observar el funcionamiento de los alimentadores, verificar que el flujo sea uniforme y controlar la corriente o potencia del motor. Las modificaciones importantes en la alimentación deben realizarse de acuerdo con los procedimientos establecidos y considerando la respuesta del circuito completo.

Carga del molino

La **carga del molino** está constituida principalmente por el mineral, agua y cuerpos moledores. La cantidad y distribución de esta carga influyen directamente en la eficiencia de la molienda.

En un molino de bolas, la **carga de bolas** debe mantenerse dentro de los valores establecidos para el equipo. Una cantidad insuficiente puede reducir la capacidad de molienda, mientras que una carga excesiva puede aumentar el consumo energético, desgaste y riesgo de sobrecarga.

En los molinos de barras, la cantidad y condición de las barras también son importantes. El desgaste modifica progresivamente sus dimensiones y puede afectar el comportamiento de la molienda.

El operador no debe determinar visualmente una carga correcta basándose únicamente en el nivel aparente del material. El control debe realizarse mediante los **parámetros operacionales e indicaciones del fabricante**, además de los procedimientos específicos de la planta.

Velocidad de rotación

La **velocidad de rotación** determina el movimiento de los cuerpos moledores dentro del molino. Al girar, las bolas o barras son elevadas por los revestimientos y posteriormente descienden, generando las fuerzas que producen la reducción de tamaño.

Si la velocidad es demasiado baja, los cuerpos moledores pueden desplazarse principalmente por rodadura, reduciendo la intensidad de la molienda. Si la velocidad aumenta excesivamente, puede producirse un comportamiento en el que los cuerpos moledores permanezcan adheridos a la pared del molino durante parte de la rotación, reduciendo la eficiencia de la caída de los cuerpos.

Por esta razón, los molinos operan normalmente dentro de un **rango de velocidad definido por su diseño**. El operador debe evitar modificaciones no autorizadas y vigilar las condiciones indicadas por el sistema de control.

La velocidad también debe analizarse conjuntamente con la carga de cuerpos moledores y las características del mineral. No existe un único valor óptimo aplicable a todos los molinos.

Agua y densidad de pulpa

En la **molienda húmeda**, el agua se utiliza para formar una pulpa y facilitar el transporte del mineral dentro del circuito. El caudal de agua debe mantenerse dentro de los parámetros establecidos porque influye directamente en la **densidad de pulpa y en el comportamiento de la clasificación**.

Una cantidad insuficiente de agua puede producir una pulpa demasiado densa, dificultando el movimiento y descarga del material. También puede aumentar la resistencia al flujo y favorecer condiciones de operación inestables.

Un exceso de agua puede generar una pulpa demasiado diluida. Esto modifica las condiciones de transporte y puede afectar la clasificación posterior, alterando la cantidad y tamaño de partículas que retornan al molino.

Por ello, el operador debe controlar el **caudal de agua y la densidad de la pulpa**, utilizando los instrumentos disponibles. Cuando el proceso lo requiere, pueden realizarse ajustes coordinados entre alimentación de mineral y agua para mantener una condición estable.

Control integrado de las variables

Las cuatro variables deben analizarse como un **sistema interdependiente**. Por ejemplo, aumentar la alimentación sin ajustar las condiciones correspondientes puede elevar la carga del molino. Del mismo modo, modificar el agua puede cambiar la densidad de pulpa y alterar el funcionamiento del clasificador.

Durante la operación, el operador debe controlar **alimentación, potencia o corriente, carga, velocidad, agua, densidad, presión y temperatura de lubricación, descarga y granulometría del producto**.

El objetivo es mantener una operación estable que permita alcanzar la granulometría requerida con un consumo energético razonable y sin someter los equipos a condiciones excesivas.

Una buena operación de molienda no consiste en maximizar individualmente una variable, sino en encontrar y mantener el **equilibrio operacional del circuito**. El operador debe realizar ajustes graduales, observar la respuesta del sistema y comunicar cualquier desviación significativa respecto de los parámetros establecidos.

3.4. Clasificación mediante hidrociclones y zarandas

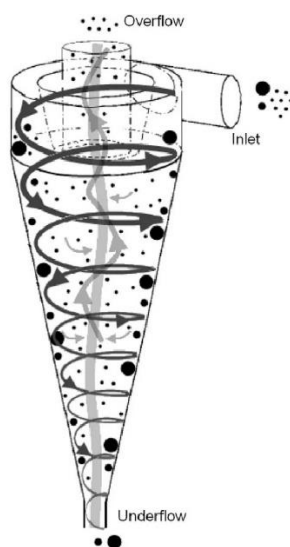
La **clasificación** es una operación que separa las partículas del mineral según su tamaño y comportamiento, permitiendo controlar qué material continúa hacia las siguientes etapas y qué material debe retornar a la molienda. En los circuitos de molienda se utilizan principalmente **hidrociclones y zarandas**, dependiendo de las características del proceso, tamaño de partícula requerido y configuración de la planta.

Una clasificación adecuada es fundamental para evitar que el material grueso avance prematuramente y para mantener una **carga circulante controlada** dentro del circuito.

Clasificación mediante hidrociclones

El **hidrociclón** es un equipo de clasificación hidráulica que utiliza la fuerza centrífuga generada por el movimiento de una pulpa dentro de una cámara de forma cónica. No posee partes móviles internas y normalmente trabaja con pulpa de mineral y agua.

La alimentación ingresa al hidrociclón **tangencialmente y a presión**, generando un movimiento rotacional. Las partículas más gruesas y de mayor velocidad de sedimentación tienden a desplazarse hacia las paredes y descienden hacia el **underflow o descarga inferior**. Las partículas más finas son transportadas hacia la zona central y salen principalmente por el **overflow o descarga superior**.



En un circuito de molienda, el producto fino del overflow puede enviarse a la siguiente etapa del proceso, mientras que el material más grueso del underflow generalmente retorna al molino para continuar su reducción.

Entre los principales componentes se encuentran el **cuerpo cilíndrico, sección cónica, entrada de alimentación, vortex finder y apex o spigot**. El estado y dimensiones de estos elementos influyen en el comportamiento de la clasificación.

Variables de operación del hidrociclón

Una de las variables más importantes es la **presión de alimentación**. Debe mantenerse dentro del rango establecido para obtener una clasificación estable. Una presión demasiado baja puede reducir la eficiencia de separación, mientras que una presión excesiva puede aumentar el desgaste y modificar la distribución del producto.

La **densidad de alimentación** también tiene una influencia importante. Una pulpa demasiado densa puede dificultar la separación de partículas, mientras que una pulpa excesivamente diluida puede modificar las condiciones hidráulicas y afectar el tamaño de corte.

El operador debe observar la apariencia y comportamiento del **overflow y underflow**. Un underflow excesivamente diluido o demasiado compacto puede indicar cambios en las condiciones de operación o problemas en el apex. Asimismo, una variación importante en la densidad o granulometría del overflow puede indicar una clasificación deficiente.

Los componentes de desgaste deben inspeccionarse periódicamente, especialmente el **apex y vortex finder**, debido a que su desgaste modifica las condiciones internas y puede alterar la granulometría del producto.

Clasificación mediante zarandas

Las **zarandas** separan las partículas utilizando una superficie con aberturas determinadas y un movimiento vibratorio. En comparación con el hidrociclón, la separación se realiza principalmente por **tamaño físico**, permitiendo que las partículas menores que las aberturas atraviesen la superficie mientras las mayores continúan hacia la descarga de sobretamaño.

En circuitos de molienda, las zarandas pueden utilizarse cuando las condiciones del proceso lo requieren y también pueden formar parte de sistemas de clasificación y recuperación de material.

La eficiencia depende de factores como **tamaño de las aberturas, alimentación, humedad, amplitud y frecuencia de vibración, inclinación y estado de las superficies de clasificación**.

Uno de los problemas habituales es el **cegamiento de las aberturas**, especialmente cuando el mineral contiene humedad o materiales arcillosos. Esto reduce el área efectiva de clasificación y puede provocar que partículas finas salgan como sobretamaño.

Control operacional

El operador debe controlar la alimentación y observar continuamente las corrientes de producto. En hidrociclones, debe prestar atención principalmente a **presión, densidad de pulpa, caudal y condiciones del overflow y underflow**. En zarandas, debe verificar **alimentación, vibración, estado de las mallas, distribución del material y características del pasante y sobretamaño**.

La clasificación debe analizarse conjuntamente con el molino. Si demasiadas partículas gruesas retornan al molino, puede aumentar la **carga circulante** y producirse una sobrecarga. Si partículas demasiado gruesas pasan hacia el producto final, la etapa posterior puede recibir una alimentación fuera de especificación.

Ante una desviación, el operador debe realizar ajustes graduales y dentro de los parámetros autorizados. No debe modificar simultáneamente múltiples variables sin evaluar la respuesta del circuito, ya que esto dificulta identificar la causa del problema.

En conclusión, los **hidrociclones y zarandas son elementos esenciales para controlar la granulometría del circuito de molienda**. Su correcta operación permite separar eficientemente el material, mantener una carga circulante adecuada y entregar un producto con las características requeridas para las etapas posteriores del procesamiento mineral.

3.5. Circuitos abiertos y cerrados de molienda

Los **circuitos de molienda** determinan la forma en que el mineral circula entre el molino, los equipos de clasificación y las etapas posteriores del proceso. Las dos configuraciones principales son el **circuito abierto** y el **circuito cerrado**. La elección depende de la granulometría requerida, características del mineral, capacidad de procesamiento y diseño de la planta.

El objetivo en ambos casos es conseguir una **reducción de tamaño controlada**, utilizando la energía de molienda de manera eficiente y entregando un producto con las características necesarias para la concentración o tratamiento posterior.

Circuito abierto de molienda

En un **circuito abierto**, el mineral ingresa al molino, es sometido a molienda y sale del equipo sin pasar por una etapa de clasificación que recircule el material grueso hacia el mismo molino.

Una configuración básica puede representarse como:

Alimentación → Molino → Producto → Siguiendo etapa

El material que sale del molino continúa directamente hacia la operación siguiente. Por esta razón, el tamaño del producto depende principalmente de las condiciones de alimentación y de los parámetros de operación del propio molino.

Una de las principales ventajas del circuito abierto es su **simplicidad**. Requiere menos equipos, presenta menor complejidad operacional y puede ser apropiado cuando la granulometría obtenida directamente del molino es suficiente para el proceso posterior.

Sin embargo, presenta una limitación importante: **las partículas que salen demasiado gruesas no son separadas automáticamente para retornar al molino**. Por ello, puede resultar más difícil controlar estrictamente la granulometría del producto.

En este tipo de circuito, el operador debe prestar especial atención a la alimentación, carga del molino, velocidad, agua y condiciones de descarga. Cualquier variación importante puede modificar directamente las características del producto.

Circuito cerrado de molienda

En un **circuito cerrado**, el producto del molino pasa por un equipo de clasificación, normalmente un **hidrociclón**, aunque también pueden utilizarse zarandas u otros clasificadores según el diseño.

El esquema general es:

Alimentación → Molino → Clasificador → Producto fino + Material grueso → Retorno al molino

El clasificador separa el material según su tamaño o comportamiento hidráulico. El producto que cumple con la granulometría requerida continúa hacia la siguiente etapa, mientras que el material que todavía necesita reducción retorna al molino.

Esta configuración permite obtener un **mayor control sobre la granulometría del producto final**. Además, evita que una parte importante del material ya suficientemente fino permanezca innecesariamente dentro del molino.

El circuito cerrado genera una **carga circulante**, debido al retorno del material grueso. Por esta razón, el tonelaje que circula internamente puede ser considerablemente mayor que la alimentación fresca que ingresa al circuito.

Diferencias operacionales

La principal diferencia entre ambos sistemas es la presencia de **clasificación y recirculación**.

En un circuito abierto, el operador controla principalmente las condiciones internas del molino para obtener directamente el producto requerido. En un circuito cerrado, además debe controlar el funcionamiento del clasificador y la cantidad de material que retorna.

El circuito cerrado permite una regulación más precisa, pero también es **más sensible a desequilibrios**. Por ejemplo, si el hidrociclón comienza a enviar una cantidad excesiva de material grueso hacia el molino, aumenta la carga circulante y puede producirse una sobrecarga.

Una clasificación deficiente también puede permitir que partículas demasiado gruesas avancen hacia el proceso posterior. Esto puede afectar operaciones como flotación, concentración gravimétrica o lixiviación.

Carga circulante

La **carga circulante** es un concepto fundamental en los circuitos cerrados. Representa el material que, después de ser clasificado, retorna al molino para continuar su reducción.

Un aumento de la carga circulante puede estar relacionado con diferentes condiciones: alimentación demasiado gruesa, problemas de molienda, cambios en la densidad de pulpa, presión inadecuada del hidrociclón, desgaste de componentes del clasificador o alteraciones en la abertura de clasificación.

El operador debe observar las características del **overflow y underflow** del clasificador y relacionarlas con el comportamiento del molino. Un cambio importante en estas corrientes puede ser una señal de que el equilibrio del circuito se está modificando.

Control del circuito

Para mantener la estabilidad, el operador debe controlar **alimentación de mineral, carga del molino, velocidad, agua, potencia o corriente del motor, densidad de pulpa, presión de clasificación, granulometría del producto y carga circulante**.

Los ajustes deben realizarse de manera gradual y siguiendo los procedimientos establecidos. No es recomendable modificar varias variables simultáneamente sin evaluar la respuesta del circuito, porque puede dificultar la identificación de la causa de una desviación.

El **circuito abierto** ofrece simplicidad y puede ser adecuado cuando no se requiere una clasificación estricta. El **circuito cerrado** proporciona mayor control granulométrico y permite recircular el material grueso, aunque requiere una coordinación más precisa entre molino y clasificador.

En ambos casos, el operador debe buscar un equilibrio entre **capacidad, granulometría, consumo energético, desgaste y estabilidad operacional**, manteniendo siempre los equipos dentro de sus condiciones de diseño y los procedimientos de seguridad establecidos.

3.6. Control de la granulometría y calidad del producto

El **control de la granulometría** es una de las funciones más importantes dentro de la operación de molienda. El objetivo no es simplemente reducir el mineral al menor tamaño posible, sino obtener un **producto con una distribución granulométrica adecuada para la etapa siguiente del proceso**. Una molienda excesiva puede aumentar el consumo de energía y generar lamas o partículas demasiado finas, mientras que una molienda insuficiente puede impedir una adecuada liberación del mineral valioso.

Importancia de la granulometría

La granulometría describe la **distribución de tamaños de las partículas** presentes en el producto. En una planta concentradora, esta característica influye directamente en procesos posteriores como flotación, concentración gravimétrica, separación magnética o lixiviación.

El tamaño requerido depende del tipo de mineral y del proceso. Por ello, la especificación puede expresarse mediante un porcentaje pasante por una determinada abertura de tamiz, por ejemplo, **P80**, que corresponde al tamaño por debajo del cual se encuentra aproximadamente el 80 % del material.

El operador debe conocer la especificación granulométrica establecida para el circuito y comparar periódicamente el producto obtenido con dicha especificación.

Factores que afectan la granulometría

La granulometría del producto depende de varias condiciones de operación. Entre las principales se encuentran la **granulometría de alimentación, velocidad del molino, carga de cuerpos moledores, tiempo de residencia, alimentación de mineral, cantidad de agua y funcionamiento del clasificador**.

Una alimentación con partículas demasiado gruesas puede aumentar la demanda de molienda. Por otro lado, una carga insuficiente o desgastada de cuerpos moledores puede disminuir la capacidad de reducción.

En circuitos cerrados, el funcionamiento del **hidrociclón o sistema de clasificación** tiene una influencia directa. Si el clasificador permite que demasiadas partículas gruesas salgan con el producto, la granulometría final será mayor que la requerida. Si retiene demasiado material fino y lo devuelve al molino, puede aumentar innecesariamente la carga circulante.

Control mediante muestreo

El control de la granulometría requiere realizar **muestreos representativos** del producto. Una muestra aislada o tomada de manera incorrecta puede no representar las condiciones reales del proceso.

Las muestras pueden analizarse mediante **tamizado** u otros métodos de análisis granulométrico. El resultado permite determinar la distribución de tamaños y verificar si el producto cumple con la especificación.



El operador debe registrar los resultados y relacionarlos con las condiciones existentes en el momento del muestreo. Si se detecta una desviación, se debe investigar la causa antes de realizar ajustes importantes.

Producto demasiado grueso

Cuando el producto presenta una granulometría **más gruesa de lo especificado**, pueden existir diferentes causas. Entre ellas se encuentran una alimentación excesivamente gruesa, carga o desgaste inadecuado de los cuerpos moledores, velocidad incorrecta, tiempo de residencia insuficiente o problemas de clasificación.

En un circuito cerrado, también puede ser necesario revisar la presión y condiciones del hidrociclón, así como el estado de sus componentes de desgaste.

Las acciones correctivas deben realizarse de forma gradual, verificando la respuesta del circuito después de cada ajuste. El objetivo es recuperar la granulometría requerida sin provocar sobrecarga ni aumentar innecesariamente el consumo energético.

Producto excesivamente fino

Una molienda excesiva también representa un problema. La generación de una cantidad elevada de **partículas ultrafinas o lamas** puede incrementar el consumo energético y afectar negativamente determinadas operaciones de concentración.

El exceso de finos puede estar relacionado con condiciones de molienda demasiado intensas, tiempos de residencia elevados o problemas de clasificación que permiten que las partículas permanezcan demasiado tiempo dentro del circuito.

Por ello, obtener un producto fino no significa necesariamente obtener un producto de mejor calidad. La calidad está determinada por el **cumplimiento de la granulometría objetivo y su adecuación al proceso posterior**.

Calidad del producto y control operacional

El operador debe relacionar la granulometría con otras características del producto, como **densidad de pulpa, porcentaje de sólidos y comportamiento de la descarga**. En molienda húmeda, estos parámetros pueden influir en la eficiencia de clasificación y, por tanto, en la granulometría final.

El seguimiento debe incluir variables como **alimentación, potencia del molino, velocidad, agua, densidad de pulpa, presión del clasificador y carga circulante**. Los cambios en estas variables deben compararse con los resultados del análisis granulométrico.

Una buena práctica consiste en mantener **registros históricos** de las condiciones de operación y de los resultados de calidad. Esto permite identificar tendencias, anticipar desviaciones y facilitar la toma de decisiones.

En conclusión, el control de la granulometría requiere una combinación de **operación estable, clasificación eficiente, muestreo representativo y seguimiento de los parámetros del circuito**. El objetivo del operador es mantener el producto dentro de las especificaciones establecidas, evitando tanto la molienda insuficiente como la molienda excesiva y contribuyendo a una operación eficiente y estable de todo el proceso.

3.7. Muestreo del mineral y producto del proceso

El **muestreo** es una actividad fundamental para conocer las características reales del mineral y verificar el comportamiento del proceso de chancado y molienda. Una muestra correctamente obtenida debe representar, lo mejor posible, el material del cual fue tomada. Si el muestreo es deficiente, incluso un análisis de laboratorio realizado correctamente puede producir resultados que no representan las condiciones reales de la operación.

En una planta de procesamiento, las muestras pueden utilizarse para determinar **granulometría, humedad, densidad, contenido de sólidos, leyes de elementos de interés y otras características del mineral**. Los resultados permiten evaluar el desempeño de los equipos y tomar decisiones operacionales.

Principios del muestreo

El principio fundamental es obtener una **muestra representativa**. Esto significa que las partículas seleccionadas deben reflejar adecuadamente la composición y distribución del material presente en la corriente.

Una muestra tomada únicamente de la parte superficial de una pila, de una zona lateral de una faja o de un punto donde el material se acumula puede presentar un sesgo importante. Por ello, cuando sea posible, las muestras deben obtenerse mediante procedimientos establecidos que consideren toda la corriente de material.

La frecuencia del muestreo depende del proceso y de los procedimientos de control de la planta. Puede realizarse a intervalos determinados durante la operación o mediante sistemas automáticos de muestreo.

Muestreo en fajas transportadoras

Las **fajas transportadoras** constituyen uno de los puntos habituales para obtener muestras de mineral. El muestreo puede realizarse manualmente o mediante muestreadores automáticos diseñados para tomar una sección representativa de la corriente.

Cuando el procedimiento requiere una muestra manual, debe realizarse utilizando herramientas adecuadas y respetando estrictamente las condiciones de seguridad. **Nunca se debe introducir una pala, recipiente, mano u otra herramienta en una faja en movimiento cuando el procedimiento de la planta no lo permita.**

Cuando sea necesario intervenir físicamente sobre una faja, se deben aplicar los procedimientos correspondientes de detención, aislamiento y bloqueo de energías.

Muestreo del producto de molienda

El producto de molienda suele presentar características diferentes a las del mineral de alimentación. En molienda húmeda, el material se encuentra generalmente como **pulpa**, por lo que el muestreo debe considerar tanto las partículas sólidas como el agua presente en la corriente.

Los puntos de muestreo pueden encontrarse en la descarga del molino, alimentación o descarga del clasificador y otras corrientes del circuito. La ubicación debe seleccionarse de acuerdo con el objetivo del control.

Para evaluar la **granulometría**, la muestra debe conservar adecuadamente las características de la corriente original. Posteriormente puede realizarse un análisis mediante tamizado u otros métodos apropiados.

Reducción y preparación de muestras

Las muestras obtenidas en planta pueden tener un volumen superior al necesario para el análisis. Por ello, deben ser sometidas a procesos de **reducción y preparación**, utilizando métodos que minimicen la posibilidad de introducir sesgos.

Dependiendo del tipo de muestra y análisis requerido, pueden realizarse operaciones como homogeneización, división, secado, trituración, pulverización o tamizado. La preparación debe ejecutarse de acuerdo con el procedimiento establecido para evitar pérdida o contaminación del material.

En muestras destinadas a análisis granulométrico, es especialmente importante evitar que las partículas se pierdan durante la manipulación o que se modifique su tamaño antes del análisis.

Identificación y registro

Cada muestra debe estar **correctamente identificada**. Como mínimo, el registro debe permitir conocer el punto de muestreo, fecha y hora, corriente de proceso y responsable de la toma, de acuerdo con los requisitos de la planta.

Una identificación incorrecta puede provocar que un resultado de laboratorio sea asociado a una corriente equivocada y conducir a decisiones operacionales incorrectas.

También es importante registrar las **condiciones del proceso en el momento del muestreo**, como alimentación, caudal de agua, densidad de pulpa, potencia del molino o presión del hidrociclón, cuando corresponda. Esto permite relacionar los resultados analíticos con las condiciones reales de operación.

Errores frecuentes

Entre los errores más comunes se encuentran tomar muestras de forma ocasional y no sistemática, utilizar recipientes contaminados, perder material durante la manipulación, mezclar muestras de diferentes puntos sin autorización y no identificar correctamente las muestras.

Otro error importante es **tomar una muestra demasiado pequeña** para representar una corriente con gran variabilidad. El tamaño y frecuencia de la muestra deben establecerse considerando las características del material y el objetivo del análisis.

El operador debe comprender que el muestreo no es simplemente recoger una cantidad de mineral. Es una actividad de **control de calidad y control del proceso** que requiere método y disciplina.

Una correcta toma de muestras permite verificar la granulometría y otras características del producto, detectar desviaciones y evaluar el rendimiento del circuito. Por ello, el operador debe cumplir los procedimientos establecidos, mantener una adecuada identificación y trazabilidad y comunicar cualquier condición que pueda afectar la representatividad de la muestra.

3.8. Preparación, identificación y manejo de muestras operativas

La **preparación, identificación y manejo de muestras operativas** son actividades esenciales para garantizar que los resultados obtenidos durante el control del proceso sean confiables y puedan relacionarse correctamente con las condiciones de operación. Una muestra mal identificada, contaminada, alterada o manipulada incorrectamente puede generar resultados erróneos y llevar a decisiones inadecuadas sobre el chancado, molienda o clasificación.

Las muestras operativas pueden utilizarse para controlar **granulometría, humedad, densidad de pulpa, porcentaje de sólidos, características del mineral y otras variables** definidas por la planta.

Preparación de las muestras

Una vez obtenida una muestra representativa, debe prepararse de acuerdo con el análisis que se realizará. El procedimiento puede incluir **homogeneización, reducción de volumen, división, secado, tamizado o acondicionamiento**, dependiendo del tipo de muestra.

La homogeneización permite distribuir de manera más uniforme las partículas antes de reducir la cantidad de material. La reducción debe realizarse mediante métodos adecuados para evitar que determinadas fracciones del mineral queden sobrerrepresentadas o se pierdan durante la manipulación.

En muestras destinadas a análisis granulométrico, debe evitarse modificar artificialmente el tamaño de las partículas. Por ejemplo, una manipulación excesiva puede fracturar partículas y generar una cantidad de finos que no estaba presente originalmente.

Cuando se trabaja con **pulpa**, debe evitarse la sedimentación o separación de las partículas antes de tomar la porción destinada al análisis. El procedimiento debe garantizar que la muestra mantenga, en la medida posible, las características de la corriente original.

Identificación y trazabilidad

Cada muestra debe contar con una **identificación clara y única**. La información dependerá del sistema utilizado por la planta, pero normalmente debe permitir conocer el punto de muestreo, fecha, hora, tipo de muestra y, cuando corresponda, número o código de identificación.

La identificación debe permanecer legible durante todo el proceso de manipulación. No es recomendable depender únicamente de la memoria del operador o de información colocada en un documento separado.

La **trazabilidad** permite relacionar el resultado del análisis con una determinada corriente y con las condiciones existentes en el momento del muestreo. Por ejemplo, una muestra de producto de molienda debe poder relacionarse con el molino, clasificador, fecha y hora correspondientes.

Cuando se realizan muestreos periódicos, es conveniente utilizar una secuencia o código establecido que reduzca la posibilidad de confusión entre muestras.

Recipientes y conservación

Los recipientes utilizados deben ser **adecuados para el tipo de muestra y análisis** y encontrarse limpios para evitar contaminación. No deben utilizarse recipientes que contengan restos de otras muestras o materiales incompatibles.

Las muestras húmedas deben conservarse de acuerdo con el procedimiento correspondiente, especialmente cuando el análisis depende de su contenido de agua o de la condición de la pulpa.

Durante el almacenamiento y transporte deben evitarse **pérdidas de material, contaminación, derrames, exposición innecesaria a condiciones que puedan alterar la muestra y confusión entre diferentes muestras**.

Cuando una muestra requiere secado, el procedimiento debe establecer las condiciones apropiadas. No todos los análisis requieren secado y, en algunos casos, eliminar el agua puede modificar la característica que se pretende medir.

Manejo de muestras durante el proceso

El operador debe manipular las muestras utilizando los **elementos de protección personal** establecidos para el área. Las muestras de mineral pueden contener partículas finas, humedad, sustancias químicas u otros materiales que requieran precauciones específicas.

Las muestras deben mantenerse en un lugar ordenado y protegido, evitando dejarlas en zonas de tránsito, cerca de equipos móviles o en lugares donde puedan mezclarse accidentalmente con otros materiales.

Cuando una muestra se divide en varias porciones para diferentes análisis, cada porción debe mantener una identificación que permita relacionarla con la muestra original.

En caso de derrame, pérdida, contaminación o deterioro de una muestra, el operador debe comunicar la situación y seguir el procedimiento establecido. **No debe sustituirse una muestra perdida por otra tomada posteriormente sin dejar registro**, porque ambas pueden representar condiciones diferentes del proceso.

Registro de información operacional

La muestra adquiere mayor valor cuando se acompaña de información sobre las **condiciones del proceso durante el momento de la toma**. Según el sistema de control utilizado, pueden registrarse alimentación del molino, caudal de agua, densidad de pulpa, potencia, presión del hidrociclón, granulometría u otras variables relevantes.

Estos datos permiten comparar los resultados de diferentes muestras e identificar tendencias. Por ejemplo, si la granulometría del producto se vuelve progresivamente más gruesa, el operador puede relacionar este cambio con modificaciones en la alimentación, carga del molino o condiciones de clasificación.

Buenas prácticas

Una correcta gestión de muestras requiere mantener una secuencia ordenada: **tomar una muestra representativa, identificarla inmediatamente, prepararla correctamente, conservarla adecuadamente, registrar la información y entregarla al análisis correspondiente**.

El operador debe evitar mezclar muestras, utilizar recipientes sucios, manipularlas innecesariamente o modificar sus características antes del análisis.

La calidad del control de proceso depende no solamente de los instrumentos instalados en la planta, sino también de la calidad de las muestras utilizadas para verificar los resultados. Por ello, una correcta **preparación, identificación y trazabilidad** permite obtener información confiable para controlar la molienda, detectar desviaciones y tomar decisiones operativas basadas en datos reales.

3.9. Problemas frecuentes y acciones correctivas

Durante la operación de los circuitos de molienda pueden presentarse diferentes problemas que afectan la **capacidad de tratamiento, granulometría, estabilidad del proceso, recuperación metalúrgica y seguridad operacional**. El operador debe ser capaz de reconocer las señales de una condición anormal, identificar sus posibles causas y aplicar las acciones correctivas que correspondan dentro de sus responsabilidades. Una buena operación no consiste solamente en mantener los equipos funcionando, sino en **detectar oportunamente las desviaciones antes de que se conviertan en fallas o pérdidas de producción**.

Alimentación irregular al molino

Una de las condiciones más frecuentes es una alimentación variable o intermitente. Puede producirse por problemas en las correas transportadoras, alimentadores, tolvas, zarandas o por acumulación de material en puntos del circuito. Cuando la alimentación disminuye, el molino puede trabajar con una carga insuficiente, reduciendo la capacidad de molienda. Cuando la alimentación aumenta bruscamente, puede generarse una sobrecarga, aumento de corriente del motor, disminución de la eficiencia de molienda y producto más grueso.

El operador debe observar la **continuidad y distribución de la alimentación**, evitando cambios bruscos. Si detecta una variación, debe revisar visualmente el flujo de mineral y verificar las condiciones de los equipos anteriores. También debe observar amperaje, nivel de carga, presión o densidad de la pulpa, según el sistema disponible.

Una alimentación estable permite que el molino opere cerca de las condiciones para las cuales fue diseñado. Por ello, no siempre es correcto aumentar la alimentación para incrementar la producción: si el circuito de clasificación no tiene capacidad suficiente, el aumento puede provocar acumulación de material y pérdida de control del proceso.

Producto demasiado grueso

Cuando el producto de molienda presenta una granulometría superior a la especificada, pueden existir varias causas. Entre las más comunes se encuentran **alimentación excesiva, carga incorrecta de medios de molienda, velocidad inadecuada, tiempo de residencia insuficiente, problemas de clasificación o falta de agua en molienda húmeda**.

El operador debe evitar modificar varias variables simultáneamente sin conocer la causa. Primero debe verificar si la alimentación se encuentra dentro de los parámetros establecidos y revisar las condiciones del molino y del clasificador. En un circuito con hidrociclones, un producto grueso puede estar relacionado con una clasificación deficiente, presión incorrecta, desgaste del apex o vortex finder, cambios de densidad o variaciones en el flujo de alimentación.

Si el problema está relacionado con la clasificación, aumentar simplemente el tiempo de operación del molino no necesariamente solucionará la desviación. El material grueso puede estar regresando continuamente al molino como carga circulante, aumentando el consumo de energía y reduciendo la capacidad efectiva del circuito.

Producto demasiado fino

Una molienda excesiva también constituye una condición indeseable. Puede aumentar el consumo energético y generar problemas posteriores, especialmente cuando el proceso requiere una granulometría determinada para concentración, flotación u otra etapa metalúrgica.

El operador debe revisar la **velocidad de alimentación, carga de medios, velocidad del molino y condiciones de clasificación**. También debe verificar si existe una disminución anormal de la alimentación fresca que esté provocando que el molino tenga mayor tiempo efectivo de molienda sobre el material disponible.

La solución no consiste necesariamente en reducir inmediatamente la velocidad del molino. Primero debe determinarse qué variable cambió respecto de las condiciones normales. El operador competente debe comparar las lecturas actuales con los parámetros establecidos y comunicar cualquier desviación significativa.

Densidad de pulpa fuera de rango

En molienda húmeda, la cantidad de agua es una variable fundamental. Una pulpa demasiado densa puede dificultar el transporte del material dentro del molino y afectar la clasificación. Una pulpa demasiado diluida puede modificar las condiciones de molienda y clasificación, además de aumentar el volumen de agua que circula por el circuito.

Cuando la densidad se encuentra fuera del rango operativo, el operador debe comprobar **caudal de agua, alimentación de mineral y comportamiento de la descarga del molino**. No debe corregir la densidad únicamente observando el aspecto visual de la pulpa, especialmente cuando existen instrumentos de medición disponibles.

Los cambios de densidad también pueden afectar directamente a los hidrociclones. Por esta razón, antes de modificar una condición del clasificador es importante verificar si el problema se originó realmente en la clasificación o si fue provocado por una variación en la alimentación o en la cantidad de agua.

Problemas en hidrociclones

Los hidrociclones pueden presentar problemas como **presión inestable, descarga irregular, apex parcialmente obstruido, desgaste del apex o vortex finder y separación deficiente**. Una señal importante es un cambio en la forma o consistencia del underflow. Un underflow excesivamente diluido o con comportamiento anormal puede indicar una condición diferente de la operación habitual.

El operador debe revisar presión de alimentación, densidad de pulpa, estado de las tuberías y comportamiento de las descargas. Si existe obstrucción, no debe intentar intervenir manualmente mientras el sistema se encuentre presurizado. Toda limpieza, desmontaje o cambio de componentes debe realizarse aplicando el procedimiento de seguridad correspondiente.

También es importante comprender que un hidrociclón no “muele” el mineral: **clasifica las partículas según su comportamiento dentro del campo centrífugo**. Por ello, cuando el producto final presenta problemas granulométricos, el operador debe considerar tanto el molino como el sistema de clasificación.

Aumento de corriente o carga del motor

Un aumento anormal del amperaje puede estar asociado con **sobrealimentación, acumulación de material, exceso de carga interna, cambios en la densidad, problemas mecánicos o condiciones anormales de operación**. La corriente del motor constituye una señal importante para detectar cambios en el comportamiento del equipo.

Ante una tendencia creciente, el operador debe evitar continuar aumentando la alimentación. Primero debe verificar las variables disponibles y comunicar la condición según el procedimiento operativo. Si la corriente alcanza una condición de alarma o protección, deben respetarse los sistemas automáticos de seguridad y las instrucciones de operación.

Es importante diferenciar entre un aumento momentáneo y una tendencia sostenida. Una variación breve puede producirse por una condición transitoria, mientras que un incremento continuo puede indicar que el circuito está perdiendo estabilidad.

Vibraciones, ruidos o golpes anormales

Los cambios de ruido y vibración pueden proporcionar información temprana sobre una condición mecánica anormal. Golpes metálicos, vibraciones excesivas, ruidos repetitivos o cambios bruscos en el sonido habitual del molino pueden estar relacionados con **elementos internos, revestimientos, componentes de transmisión, rodamientos u otras partes mecánicas**.

El operador no debe asumir que un ruido anormal es parte normal del funcionamiento. Debe registrar la condición, observar si coincide con cambios de carga o alimentación y comunicarla inmediatamente al personal responsable.

Nunca se debe intentar inspeccionar componentes internos con el equipo en movimiento. Para cualquier intervención se requiere detener el equipo y aplicar el procedimiento de **bloqueo y etiquetado de energías peligrosas (LOTO)** cuando corresponda.

Obstrucciones y acumulación de material

Las obstrucciones pueden producirse en tolvas, chutes, tuberías, bombas, zarandas o puntos de descarga. Sus consecuencias pueden incluir reducción del flujo, acumulación de material, derrames y sobrecarga de equipos.

El operador debe reconocer las primeras señales: disminución del flujo, aumento de nivel en una tolva, cambios de presión, rebalse, variación del amperaje o comportamiento irregular de la descarga.

Una regla fundamental es **no introducir manos, herramientas ni el cuerpo en puntos de atrapamiento para liberar material**. Las obstrucciones deben eliminarse utilizando los

procedimientos y dispositivos diseñados para esa actividad, con el equipo detenido y las energías peligrosas controladas cuando exista riesgo de movimiento inesperado.

Derrames de pulpa y fugas

Los derrames alrededor de molinos, bombas, tuberías y ciclones pueden indicar problemas de sellos, conexiones, desgaste, rebalse o condiciones incorrectas de operación. Además de representar una pérdida de material, pueden generar superficies resbaladizas y aumentar el riesgo de caídas.

El operador debe identificar el origen del derrame y evitar limitarse a limpiar el área sin corregir la causa. Si existe una fuga en una tubería o conexión, debe comunicarse para su reparación. Las tareas de limpieza deben ejecutarse de acuerdo con los procedimientos establecidos, evitando acercarse a líneas presurizadas o componentes en movimiento.

Baja eficiencia de molienda

Cuando el molino trabaja pero el producto no alcanza la granulometría requerida, el operador debe analizar el **circuito completo** y no solamente el molino. La eficiencia puede verse afectada por la granulometría de alimentación, dureza del mineral, carga de medios, velocidad, densidad de pulpa, clasificación y carga circulante.

Una respuesta técnicamente correcta consiste en revisar primero qué variable se modificó respecto de la operación normal. Por ejemplo, si aumentó la dureza del mineral, mantener exactamente la misma alimentación puede generar un producto más grueso aunque el molino no presente una falla mecánica.

Criterio general para aplicar acciones correctivas

Ante cualquier desviación, el operador debe seguir una secuencia lógica:

Detectar → verificar → identificar la causa probable → corregir dentro de su autoridad → observar el resultado → registrar y comunicar.

No debe realizar modificaciones simultáneas sin justificación, porque esto dificulta determinar qué acción solucionó el problema. Las correcciones deben hacerse de forma controlada y considerando el efecto que una variable puede producir sobre las demás.

Un operador competente conoce también sus límites. **No todas las anomalías deben ser solucionadas directamente por el operador.** Las fallas mecánicas, eléctricas, hidráulicas, estructurales o aquellas que impliquen exposición a energías peligrosas deben ser derivadas al personal autorizado.

Finalmente, una condición anormal debe registrarse cuando corresponda, indicando **hora, equipo afectado, síntoma observado, variables relevantes, acción realizada y resultado obtenido**. Esta información permite identificar problemas repetitivos, mejorar la operación y facilitar el trabajo de mantenimiento y supervisión.

El objetivo no es solamente recuperar rápidamente la producción, sino **mantener el circuito estable, seguro y dentro de los parámetros de operación establecidos**. Un operador que comprende las relaciones entre alimentación, molienda, clasificación, densidad, carga, granulometría y comportamiento mecánico puede detectar desviaciones antes de que provoquen una parada, una falla del equipo o una pérdida significativa de eficiencia.

Módulo 4. Instrumentación, Automatización y Control del Proceso

4.1. Instrumentación básica aplicada a chancado y molienda

La instrumentación permite **medir, supervisar y controlar las principales variables del proceso de chancado y molienda**. Para el operador, conocer estos instrumentos es fundamental porque muchas condiciones que no pueden determinarse únicamente mediante observación visual se detectan a través de indicadores, transmisores, alarmas y sistemas de control.

En una planta moderna, la instrumentación no reemplaza la observación del operador, sino que la complementa. El operador debe comprender **qué variable está midiendo cada instrumento, qué significa una lectura normal o anormal y qué acción corresponde ante una desviación**.

Medición de nivel

Los instrumentos de nivel permiten determinar la cantidad de material o pulpa existente dentro de **tolvas, silos, estanques, cajones y otros recipientes**. Dependiendo de la aplicación pueden utilizarse sensores de radar, ultrasónicos, de presión u otras tecnologías.

En chancado, el nivel de las tolvas es especialmente importante. Un nivel demasiado bajo puede provocar interrupciones en la alimentación y funcionamiento irregular del circuito. Un nivel excesivamente alto puede generar acumulación de mineral y riesgo de rebalse o sobrecarga.

En molienda húmeda también puede controlarse el nivel de cajones de alimentación o descarga. Una variación del nivel puede afectar el funcionamiento de las bombas y la estabilidad del circuito.

El operador debe distinguir entre una **lectura real del proceso y una posible falla del instrumento**. Por ejemplo, si el indicador muestra un cambio repentino que no coincide con el comportamiento observado, debe verificarse la condición antes de realizar ajustes importantes.

Medición de flujo

Los medidores de flujo permiten conocer la cantidad de **agua, pulpa u otros fluidos** que circulan por una línea. En molienda, el caudal de agua influye directamente sobre la densidad de la pulpa y, por consecuencia, sobre las condiciones de clasificación.

Un flujo insuficiente de agua puede producir una pulpa demasiado densa, mientras que un flujo excesivo puede diluirla. Por ello, el operador debe observar conjuntamente **caudal, densidad, presión y comportamiento del circuito**, en lugar de analizar una sola lectura de manera aislada.

En sistemas de transporte de pulpa también es importante verificar que exista un flujo suficiente para evitar sedimentación y obstrucciones.

Medición de presión

Los transmisores y manómetros de presión se utilizan en **tuberías, bombas, sistemas hidráulicos, circuitos de lubricación e hidrociclones**.

En los hidrociclones, la presión de alimentación es una variable operacional importante porque influye en el comportamiento de la clasificación. Una presión demasiado baja o inestable puede modificar la separación y afectar la granulometría del overflow y underflow.

En sistemas de lubricación, la presión permite verificar que el aceite esté circulando correctamente. Una caída de presión puede indicar problemas de suministro, obstrucción, fuga u otra condición que requiere atención.

El operador debe reconocer que **una presión fuera de rango no necesariamente significa que el instrumento esté defectuoso**. Primero debe analizarse el comportamiento del sistema y verificar otras variables relacionadas.

Medición de temperatura

La temperatura se controla principalmente en componentes donde el aumento de calor puede indicar una condición anormal, como **rodamientos, motores, reductores y sistemas de lubricación**.

Un incremento progresivo de temperatura puede estar asociado con falta de lubricación, sobrecarga, fricción, desgaste o problemas de alineamiento. Por esta razón, las tendencias de temperatura pueden ser incluso más útiles que una lectura aislada.

El operador debe prestar atención a cambios respecto del comportamiento habitual. Si un rodamiento normalmente funciona dentro de un determinado rango y comienza a aumentar su temperatura de manera sostenida, la condición debe ser comunicada antes de que evolucione hacia una falla.

Medición de corriente y potencia

Los motores eléctricos de chancadoras, molinos, bombas y transportadores están asociados a instrumentos que permiten visualizar **corriente, potencia y otras variables eléctricas**.

El amperaje puede utilizarse como indicador indirecto de la carga del equipo. Un aumento de corriente puede relacionarse con mayor alimentación, acumulación de material, aumento de densidad o una condición mecánica anormal.

Sin embargo, el operador no debe interpretar automáticamente una corriente elevada como una falla. Debe relacionarla con las demás condiciones del proceso. Por ejemplo, un aumento de alimentación puede producir naturalmente un incremento de corriente.

La observación de **tendencias** permite detectar cambios antes de alcanzar una condición de alarma o disparo.

Medición de densidad

En circuitos de molienda húmeda, la densidad de pulpa es una variable especialmente relevante. Puede medirse mediante instrumentos especializados o mediante métodos establecidos por la operación.

La densidad proporciona información sobre la relación entre **sólidos y agua**. Una variación importante puede afectar la molienda, clasificación, transporte de pulpa y operación de bombas.

El operador debe conocer el rango establecido para cada circuito y evitar realizar correcciones sin verificar previamente la causa de la desviación. Un cambio de densidad puede deberse tanto a una variación de agua como a una modificación de la alimentación de mineral.

Medición y control de granulometría

La granulometría normalmente se determina mediante **muestreo y análisis**, aunque algunas plantas pueden disponer de sistemas automáticos de medición de tamaño de partículas.

El objetivo es conocer si el producto de chancado o molienda se encuentra dentro de las especificaciones establecidas. En molienda es común utilizar indicadores como **P80**, que representa un tamaño de referencia correspondiente al 80 % pasante de una distribución granulométrica.

El operador debe comprender que una desviación granulométrica no necesariamente se corrige modificando directamente el molino. Puede tener origen en la alimentación, clasificación, densidad, carga de medios o condiciones del circuito.

Alarmas, indicadores y señales de campo

Los instrumentos envían información a indicadores locales, paneles de control o sistemas como **PLC y SCADA/DCS**, dependiendo de la planta. El operador puede recibir señales de alarma relacionadas con nivel, presión, temperatura, corriente, flujo u otras variables.

Una alarma representa una **condición que requiere atención**, pero no siempre significa que el equipo deba detenerse inmediatamente. El operador debe conocer los procedimientos establecidos para cada alarma y diferenciar entre una alarma de advertencia y una condición de protección o parada automática.

También existen sensores utilizados para detectar condiciones específicas, como velocidad de correas, posición de válvulas, presencia de material, desalineamiento o atascamiento.

Buenas prácticas del operador

El operador debe evitar depender exclusivamente de los instrumentos. La información instrumental debe compararse con la **observación directa del equipo**: ruidos, vibraciones, derrames, flujo de material, comportamiento de la pulpa y condiciones generales.

También es importante identificar instrumentos que presentan lecturas evidentemente anormales, congeladas o contradictorias con el proceso. En estos casos, no se debe modificar el proceso basándose ciegamente en una señal posiblemente incorrecta.

Una operación profesional requiere interpretar las variables **en conjunto**. Por ejemplo, un aumento de corriente acompañado de incremento de alimentación y nivel puede tener una explicación diferente a un aumento de corriente acompañado de vibración y temperatura.

En consecuencia, la instrumentación básica proporciona al operador una herramienta esencial para **detectar desviaciones, anticipar problemas y mantener estable el proceso**. El conocimiento de las variables de nivel, flujo, presión, temperatura, corriente, densidad y granulometría permite tomar decisiones más seguras y fundamentadas, siempre respetando los parámetros operacionales y los procedimientos establecidos por la planta.

4.2. Sensores de nivel, presión, flujo, temperatura y velocidad

Los sensores permiten transformar una condición física del proceso en una **señal que puede ser visualizada, registrada o utilizada por el sistema de control**. En los circuitos de chancado y molienda, su función es fundamental para conocer el estado de los equipos y mantener las variables dentro de los rangos establecidos.

El operador no necesita convertirse en especialista en instrumentación, pero sí debe conocer **qué mide cada sensor, dónde se utiliza, cómo interpretar una lectura y qué señales pueden indicar una condición anormal**. Una lectura instrumental debe analizarse siempre en relación con el comportamiento general del proceso.



Sensores de nivel

Los sensores de nivel se utilizan para conocer la cantidad de material o pulpa presente en **tolvas, silos, estanques, cajones de alimentación y otros recipientes**.

En tolvas de mineral, pueden emplearse sensores de radar, ultrasónicos u otras tecnologías. Estos instrumentos permiten mantener un nivel adecuado de material para asegurar una alimentación estable. Un nivel excesivamente bajo puede provocar interrupciones o alimentación irregular, mientras que un nivel demasiado alto puede generar acumulación, rebalse o sobrecarga.

En molienda húmeda, la medición de nivel de los cajones es especialmente importante porque determina las condiciones de alimentación de las bombas. Un nivel demasiado bajo puede provocar **entrada de aire, pérdida de cebado o funcionamiento inadecuado de la bomba**. Un nivel demasiado alto puede producir rebalse.

El operador debe observar la tendencia del nivel y no solamente el valor instantáneo. Una disminución continua puede indicar que la alimentación de entrada es inferior al flujo de salida. Por el contrario, un nivel que aumenta progresivamente puede señalar una restricción en la descarga, menor capacidad de bombeo o exceso de alimentación.

Si la lectura del instrumento no coincide con la condición física observada, debe considerarse la posibilidad de **ensuciamiento, obstrucción, pérdida de señal o falla del sensor** antes de realizar ajustes importantes.

Sensores de presión

Los sensores de presión permiten controlar la presión existente en **tuberías, bombas, hidroclones, circuitos hidráulicos y sistemas de lubricación**.

En un circuito de molienda, la presión de alimentación de los hidroclones es una variable importante para mantener condiciones de clasificación relativamente estables. Una presión demasiado baja, demasiado alta o fluctuante puede modificar el comportamiento del clasificador y afectar la granulometría del producto.

En sistemas de lubricación, los sensores de presión permiten comprobar que el lubricante esté llegando correctamente a los componentes. Una caída de presión puede indicar problemas de suministro, obstrucción, fuga o una condición anormal que debe ser investigada.

El operador debe diferenciar entre **presión normal, presión de advertencia y presión crítica**, de acuerdo con los parámetros definidos por la planta. Ante una presión anormal, no debe abrir conexiones ni intervenir una línea presurizada. La inspección o reparación requiere procedimientos específicos y control de energías peligrosas cuando corresponda.

También es importante observar si la presión es estable. Una presión que oscila constantemente puede indicar cambios en el flujo, presencia de aire, problemas de bombeo, variaciones de densidad o inestabilidad del proceso.

Sensores y medidores de flujo

Los instrumentos de flujo permiten conocer la cantidad de fluido que circula por una tubería durante un determinado tiempo. En molienda son utilizados principalmente para controlar **agua de proceso, pulpa y otros fluidos**.

El caudal de agua tiene una influencia directa sobre la densidad de la pulpa. Si se incorpora menos agua de la necesaria, la pulpa puede volverse demasiado densa; si se incorpora demasiada, puede diluirse excesivamente. Por ello, el operador debe analizar el flujo conjuntamente con la densidad y las condiciones de clasificación.

En las líneas de pulpa, un flujo insuficiente puede favorecer la sedimentación de sólidos y provocar restricciones u obstrucciones. Un aumento inesperado del flujo también puede indicar cambios en la operación de una bomba o en las condiciones hidráulicas del circuito.

El operador debe prestar atención a **variaciones bruscas, pérdida de señal o valores que permanezcan constantes durante demasiado tiempo**. Una lectura completamente estable puede ser normal, pero también puede indicar que el instrumento dejó de transmitir correctamente la información.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura, como termopares, RTD y otros dispositivos, se utilizan para supervisar componentes donde el incremento de temperatura puede indicar una condición anormal.

En chancado y molienda se pueden encontrar asociados a **rodamientos, motores, reductores, cajas de transmisión y sistemas de lubricación**.

Una temperatura elevada puede estar relacionada con fricción, falta o degradación del lubricante, sobrecarga, desgaste, desalineamiento u otras condiciones mecánicas. Sin embargo, el valor debe interpretarse según el rango normal definido para cada equipo.

Para el operador, resulta especialmente importante observar la **tendencia**. Un aumento gradual y sostenido puede ser más significativo que una lectura puntual ligeramente elevada. Por ejemplo, si la temperatura de un rodamiento aumenta progresivamente durante varias horas mientras las demás variables permanecen constantes, la condición debe comunicarse para su evaluación.

Nunca se debe asumir que un componente está en buenas condiciones únicamente porque la temperatura se encuentra dentro del rango permitido. La temperatura constituye una señal de supervisión que debe analizarse junto con ruido, vibración, lubricación y carga.

Sensores de velocidad

Los sensores de velocidad permiten verificar las revoluciones por minuto de **molinos, motores, correas transportadoras, alimentadores, ventiladores, bombas u otros equipos rotativos**.

En transportadores, por ejemplo, un sensor de velocidad puede detectar una reducción o pérdida de movimiento de la correa. Esto permite activar alarmas o protecciones para evitar acumulación de material y daños mayores.

En molinos, la velocidad de rotación es una variable fundamental porque afecta el movimiento de la carga y de los medios de molienda. Una desviación puede estar relacionada con problemas en el motor, transmisión, acoplamiento o sistema de control.

Los sensores de velocidad también pueden utilizarse para confirmar que un equipo realmente está girando después de recibir una orden de arranque. Esto es importante

porque **una señal de “motor energizado” no necesariamente significa que el equipo esté girando correctamente.**

Interpretación conjunta de las señales

Una de las competencias más importantes del operador es evitar interpretar cada sensor de forma aislada. Las variables están relacionadas entre sí.

Por ejemplo, si en un circuito de molienda **disminuye el flujo de agua, aumenta la densidad de pulpa y cambia la presión del hidrociclón**, existe una relación operacional que debe investigarse. Del mismo modo, si aumenta la corriente del motor y simultáneamente aumenta el nivel de alimentación, puede tratarse de una mayor carga del proceso; si además aparecen vibraciones y aumento de temperatura, la situación requiere una evaluación diferente.

Por esta razón, ante una desviación el operador debe preguntarse:

¿Qué variable cambió? ¿Cuándo cambió? ¿Qué otras variables cambiaron al mismo tiempo? ¿La lectura coincide con lo que estoy observando físicamente?

Este razonamiento permite diferenciar una desviación real del proceso de una posible falla de instrumentación.

Buenas prácticas de operación

El operador debe conocer la ubicación de los principales sensores, sus rangos normales, alarmas y límites operacionales establecidos para cada equipo. También debe reconocer señales de posible falla, como **lecturas congeladas, cambios imposibles, pérdida de señal o valores que contradicen el comportamiento del proceso.**

No corresponde al operador alterar, puentear o desactivar protecciones instrumentales sin autorización. Los sensores asociados a sistemas de seguridad pueden detener automáticamente un equipo cuando se alcanza una condición peligrosa.

La instrumentación proporciona información para operar con mayor precisión, pero la decisión operacional debe considerar **instrumentos, inspección visual, experiencia operativa y procedimientos de la planta.** Un operador competente no solamente observa números en una pantalla: comprende qué representa cada variable y cómo una modificación puede afectar al resto del circuito.

En chancado y molienda, el dominio básico de los sensores de **nivel, presión, flujo, temperatura y velocidad** permite detectar desviaciones tempranas, mantener la estabilidad del proceso y actuar antes de que una condición anormal evolucione hacia una falla, una parada no programada o un riesgo para las personas y los equipos.

4.3. Balanzas y sistemas de medición de alimentación y producción

Las balanzas y sistemas de pesaje permiten determinar con precisión la **cantidad de mineral que ingresa, circula o sale de una etapa del proceso.** En una planta de

chancado y molienda, esta información es fundamental para controlar la capacidad de tratamiento, calcular balances de masa, evaluar el rendimiento de los equipos y mantener una alimentación estable.

Para el operador, conocer estos sistemas no significa solamente observar un valor expresado en toneladas por hora. Es necesario comprender **qué está midiendo la balanza, cómo interpretar sus indicaciones, qué factores pueden afectar la medición y cómo detectar una lectura que no representa correctamente la operación.**

Balanzas de faja transportadora

Las balanzas de faja, también denominadas **balanzas dinámicas o belt scales**, se utilizan para medir el flujo de material transportado por una correa. Normalmente combinan un sistema que detecta la **carga de mineral sobre la faja** con un dispositivo que mide la velocidad de desplazamiento de la correa.



A partir de ambas variables, el sistema calcula el flujo másico, normalmente expresado en **t/h**, y puede acumular la cantidad total transportada durante un período determinado.

La precisión depende de factores como la correcta instalación, alineamiento de la correa, tensión, velocidad, distribución del material, condición de los rodillos y calibración del sistema.

El operador debe verificar que el mineral se encuentre distribuido de manera relativamente uniforme sobre la faja. Una alimentación muy irregular puede generar fluctuaciones en la lectura. También debe observar si existen derrames, acumulaciones de material, vibraciones o problemas mecánicos que puedan afectar la medición.

Medición de la alimentación al proceso

La medición de alimentación permite conocer cuánto mineral está ingresando al chancador, molino u otra etapa. Esta variable es fundamental porque los equipos tienen una **capacidad de diseño y un rango operativo determinado.**

Por ejemplo, aumentar excesivamente la alimentación de un molino puede elevar la carga, incrementar el consumo de energía y afectar la granulometría. Por el contrario, una alimentación demasiado baja puede reducir la productividad y alterar las condiciones normales de operación.

El operador debe procurar una alimentación **estable y controlada**, evitando cambios bruscos salvo que el procedimiento operativo indique lo contrario.

Cuando el sistema automático utiliza la señal de una balanza para regular un alimentador, la medición puede formar parte de un **lazo de control**. El sistema compara el flujo real con el valor establecido y ajusta automáticamente la velocidad del alimentador para acercarse al objetivo.

Toneladas por hora y toneladas acumuladas

Existen dos datos que el operador debe diferenciar claramente:

Toneladas por hora (t/h): indican la velocidad instantánea o promedio de alimentación o producción.

Toneladas acumuladas: indican la cantidad total de material registrada durante un período determinado.

Por ejemplo, una lectura de **250 t/h** significa que el sistema está calculando un flujo equivalente a 250 toneladas por hora en ese momento o durante el intervalo de cálculo. No significa que ya se hayan procesado 250 toneladas en total.

Esta diferencia es importante para interpretar correctamente los registros de producción y realizar balances de masa.

Balanzas en chancado

En los circuitos de chancado, las balanzas pueden instalarse en las correas de alimentación o transferencia. Permiten conocer la cantidad de mineral que pasa por cada etapa y evaluar la **capacidad real del circuito**.

Si una línea está diseñada para trabajar alrededor de una determinada capacidad y la balanza muestra una alimentación significativamente superior, el operador debe verificar que los equipos estén trabajando dentro de sus condiciones permitidas.

También pueden utilizarse varias balanzas para comparar los flujos entre diferentes puntos. Una diferencia importante puede indicar acumulación de material, derrames, problemas de medición o cambios en la configuración del circuito.

Balanzas y alimentación de molinos

En molienda, el control de la alimentación es especialmente importante porque influye directamente sobre la **carga del molino, consumo energético y granulometría del producto**.

Una alimentación excesiva puede provocar sobrecarga y disminuir la capacidad efectiva de molienda. Una alimentación insuficiente puede modificar la carga interna y producir condiciones diferentes a las previstas.

Cuando el mineral se alimenta junto con agua, la operación puede requerir el control separado del **flujo de sólidos y del flujo de agua**. La relación entre ambos determina las condiciones de la pulpa y debe mantenerse dentro de los parámetros establecidos.

El operador debe evitar corregir una desviación de alimentación modificando simultáneamente varias variables. Es preferible identificar primero la causa y realizar ajustes controlados.

Errores y desviaciones de medición

Una balanza puede indicar un valor incorrecto por diferentes motivos. Entre las causas posibles se encuentran **descalibración, acumulación de material, problemas en rodillos, desalineamiento de la correa, cambios de tensión, sensores defectuosos o errores de configuración**.

Una señal importante es cuando la lectura de la balanza no coincide con el comportamiento observable. Por ejemplo, si visualmente existe un flujo importante de mineral pero el instrumento indica un valor anormalmente bajo, debe verificarse la condición antes de utilizar ese dato para tomar decisiones de producción.

También debe prestarse atención a fluctuaciones excesivas. Una lectura que cambia continuamente puede ser consecuencia de una alimentación realmente irregular, pero también puede estar relacionada con condiciones mecánicas o instrumentales.

El operador no debe asumir automáticamente que la balanza está equivocada. Debe comparar la lectura con **otras variables disponibles y con las condiciones reales del proceso**.

Calibración y verificación

Las balanzas requieren procedimientos de **calibración, prueba y verificación** establecidos por la planta. La calibración busca asegurar que la indicación del instrumento corresponda razonablemente con una cantidad conocida o con un método de referencia.

Dependiendo del sistema, pueden utilizarse procedimientos de calibración estática, pruebas dinámicas u otros métodos definidos por el fabricante y el área de instrumentación.

El operador normalmente no realiza intervenciones de calibración sin autorización, pero debe conocer cuándo corresponde informar una posible desviación y verificar que el sistema se encuentre habilitado para operar.

Después de trabajos de mantenimiento sobre la balanza, correa o sensores asociados, es especialmente importante confirmar que el sistema vuelva a entregar una señal confiable.

Uso de los datos para el control de producción

Los datos proporcionados por las balanzas permiten elaborar **registros de producción, balances de masa, indicadores de rendimiento y reportes operacionales**.

El operador puede utilizar esta información para comparar la producción real con el objetivo establecido. Por ejemplo, si la capacidad programada es determinada cantidad de toneladas por hora, una producción inferior debe analizarse considerando disponibilidad del equipo, alimentación, granulometría, dureza del mineral, paradas y otras condiciones del circuito.

También es importante distinguir entre **capacidad nominal, alimentación real y producción efectiva**. Un equipo puede tener una capacidad de diseño determinada, pero la capacidad real dependerá de las características del mineral y de las condiciones de operación.

Buenas prácticas del operador

El operador debe revisar periódicamente las indicaciones de las balanzas y prestar atención a:

- cambios bruscos o injustificados de flujo;
- diferencias importantes respecto de la alimentación esperada;
- lecturas congeladas o sin variación durante períodos anormales;
- acumulación de mineral sobre o alrededor de la faja;
- derrames;
- problemas de alineamiento o velocidad de la correa;
- diferencias entre la lectura instrumental y la condición física observada.

Ante una desviación, debe **registrar, comunicar y verificar** la condición según los procedimientos establecidos. No debe modificar, puentear ni intervenir sensores o sistemas de pesaje sin autorización.

En términos operacionales, la balanza constituye una herramienta fundamental para responder una pregunta básica: **¿cuánto material está entrando y cuánto material está siendo procesado?** Cuando el operador comprende correctamente esta información puede relacionarla con la alimentación, carga de los equipos, consumo de energía, capacidad del circuito y producción acumulada.

Por ello, el dominio de las balanzas y sistemas de medición permite al operador demostrar un conocimiento práctico del proceso: **no solamente sabe operar el equipo, sino que puede interpretar cuantitativamente lo que está ocurriendo en la planta y detectar desviaciones que podrían afectar la productividad y estabilidad del circuito**.

4.4. Variadores de frecuencia (VFD) y control de velocidad de equipos

Los **variadores de frecuencia (VFD, Variable Frequency Drive)** son dispositivos electrónicos utilizados para controlar la velocidad de motores eléctricos mediante la modificación de la frecuencia y tensión suministradas al motor. En plantas de chancado y molienda pueden utilizarse para controlar **alimentadores, correas transportadoras,**

bombas, ventiladores y otros equipos con accionamiento eléctrico, permitiendo adaptar su velocidad a las necesidades reales del proceso.

Para el operador, conocer el funcionamiento básico de un VFD es importante porque una modificación de velocidad puede afectar directamente la **alimentación, capacidad de transporte, flujo de pulpa, presión, nivel y estabilidad general del circuito**. El operador debe comprender qué significa una determinada frecuencia o velocidad y reconocer las principales condiciones de alarma o falla.



Principio básico de funcionamiento

Un VFD recibe la energía eléctrica de alimentación y utiliza electrónica de potencia para generar una salida con frecuencia y tensión controladas. Al modificar la **frecuencia de salida**, se modifica la velocidad de rotación del motor, dentro de los límites establecidos para el equipo.

En términos simples, una frecuencia mayor normalmente permite una mayor velocidad del motor y una frecuencia menor una velocidad inferior. Sin embargo, **la relación no debe interpretarse como una regla absoluta para cualquier condición**, porque existen límites del motor, transmisión, carga y configuración del variador.

El operador normalmente no necesita intervenir en los parámetros internos del VFD. Su función principal es utilizar los comandos y valores permitidos por el sistema de control y observar cómo responde el equipo.

Aplicación en alimentadores

Los alimentadores son uno de los equipos donde el control de velocidad mediante VFD resulta especialmente útil. Al aumentar o disminuir la velocidad del alimentador se puede modificar la **cantidad de mineral enviada hacia el chancador o molino**.

Por ejemplo, si el circuito permite una alimentación determinada y el equipo está trabajando por debajo de su capacidad, puede aumentarse progresivamente la velocidad dentro de los límites establecidos. Si existe una tendencia de sobrecarga, puede reducirse la alimentación.

El operador debe evitar realizar cambios bruscos sin necesidad. Una modificación de velocidad del alimentador puede generar efectos posteriores en el nivel de tolvas, corriente del chancador, carga del molino, flujo de material y clasificación.

Por ello, el control debe realizarse de manera **gradual y observando la respuesta del circuito**.

Aplicación en correas transportadoras

En determinadas instalaciones, las correas transportadoras pueden disponer de VFD para adaptar su velocidad a las condiciones de transporte.

Una mayor velocidad puede aumentar la capacidad de transporte, pero también puede modificar la distribución del material, generar mayor desgaste, polvo o derrames si el sistema no está diseñado para esa condición.

Una reducción excesiva de velocidad puede provocar acumulación de material cuando la alimentación continúa ingresando a un ritmo superior a la capacidad de transporte.

El operador debe considerar siempre la relación entre **velocidad de la correa y flujo de material**. No se trata simplemente de aumentar la velocidad para transportar más mineral: el resto del circuito debe ser capaz de recibir y procesar ese material.

Aplicación en bombas

Los VFD también pueden utilizarse para controlar la velocidad de bombas de pulpa o agua. La modificación de velocidad puede cambiar el **caudal y las condiciones hidráulicas** del sistema.

En un circuito de molienda, esto puede afectar el nivel de un cajón, el flujo hacia los hidrociclones y la presión de alimentación. Por lo tanto, una modificación aparentemente pequeña en la velocidad de una bomba puede generar cambios en varias variables del circuito.

El operador debe observar conjuntamente **velocidad, nivel, flujo y presión**, especialmente cuando la bomba alimenta un sistema de clasificación.

Una bomba no debe operar fuera de las condiciones establecidas por el fabricante y la planta. Además, deben respetarse las condiciones mínimas de operación para evitar problemas como funcionamiento inadecuado o daño del equipo.

Control de velocidad y proceso

Una de las ventajas del VFD es que permite realizar ajustes más precisos que un sistema que solamente dispone de estados de encendido y apagado.

Por ejemplo, el sistema puede mantener un alimentador alrededor de un flujo objetivo utilizando la velocidad como variable manipulada. Si la señal de una balanza indica que el flujo de mineral es inferior al objetivo, el sistema puede aumentar la velocidad del alimentador; si el flujo es superior, puede reducirla.

Esto constituye un **laço de control** en el que una variable medida se utiliza para modificar automáticamente otra variable.

El operador debe comprender que el VFD ejecuta la orden recibida, pero no determina por sí mismo si esa condición es adecuada para todo el circuito. Los límites y estrategias de control son definidos mediante la ingeniería y configuración del sistema.

Arranque y parada mediante VFD

Una característica importante de los VFD es que permiten realizar **arranques y paradas controladas**, reduciendo determinadas solicitaciones eléctricas y mecánicas asociadas con un arranque directo.

Durante el arranque, el variador puede incrementar progresivamente la velocidad hasta alcanzar el valor establecido. Esto es especialmente útil en equipos donde un arranque brusco podría producir esfuerzos mecánicos o alteraciones importantes en el flujo del proceso.

Sin embargo, un arranque controlado no significa que el operador pueda ignorar las condiciones previas. Antes de poner un equipo en marcha deben verificarse las **condiciones de seguridad, disponibilidad del equipo, ausencia de personal expuesto, posición de válvulas cuando corresponda y condiciones del circuito** según el procedimiento de la planta.

Alarmas y fallas frecuentes

Los VFD pueden generar alarmas o disparos debido a condiciones como **sobrecorriente, sobretensión, sobrecarga del motor o problemas de comunicación**, dependiendo del sistema.

Cuando aparece una alarma, el operador debe consultar el código o mensaje correspondiente y seguir el procedimiento establecido. No debe limitarse a reiniciar repetidamente el variador sin determinar la causa.

Un disparo que se repite después de cada reinicio es una señal importante. Puede indicar una condición persistente del motor, equipo mecánico, carga, alimentación eléctrica o propio sistema de accionamiento.

El operador debe registrar la condición y comunicarla al personal correspondiente cuando la falla exceda sus responsabilidades.

Relación entre velocidad y carga del equipo

La velocidad no debe considerarse de forma independiente. Su efecto depende del tipo de equipo y de la condición de carga.

En un alimentador, aumentar la velocidad normalmente incrementa la alimentación. En una bomba, puede modificar el caudal y presión. En una correa, afecta la capacidad de transporte y distribución del material.

Por eso, antes de modificar la velocidad, el operador debe preguntarse:

¿Qué variable estoy intentando controlar? ¿Qué efecto tendrá el cambio sobre el siguiente equipo? ¿Existe algún límite operacional?

Este criterio evita utilizar el VFD simplemente para “subir” o “bajar” velocidad sin comprender las consecuencias.

Buenas prácticas de operación

El operador debe trabajar siempre dentro de los rangos de velocidad establecidos. No corresponde modificar parámetros internos del VFD, eliminar protecciones o cambiar configuraciones sin autorización del personal competente.

También debe observar las tendencias del proceso después de realizar un ajuste. Si se aumenta la velocidad de un alimentador, por ejemplo, debe verificarse posteriormente el **flujo de mineral, corriente del equipo receptor, nivel de tolvas y comportamiento general del circuito**.

Una práctica adecuada consiste en realizar **cambios pequeños, esperar la respuesta del proceso y volver a evaluar**. Esto permite mantener estabilidad y evitar oscilaciones.

El VFD es, por tanto, una herramienta de control que permite adaptar la operación a las condiciones reales de la planta. Un operador que comprende su función puede utilizar correctamente el control de velocidad para **regular la alimentación, estabilizar flujos, mantener niveles y mejorar la continuidad del proceso**, siempre dentro de los parámetros definidos por la operación.

Lo importante no es solamente saber aumentar o disminuir una frecuencia, sino entender **qué consecuencia operacional produce ese cambio y cómo verificar que el circuito haya respondido correctamente**.

4.5. Sistemas de control y monitoreo SCADA

Los sistemas **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** permiten supervisar y, dependiendo de la configuración de la planta, controlar en tiempo real diferentes equipos y variables del proceso de chancado y molienda. A través de una pantalla de operación, el operador puede visualizar el estado de motores, correas, chancadoras, molinos, bombas, zarandas, hidrociclones y otros equipos, además de consultar variables como **nivel, presión, flujo, temperatura, velocidad, corriente y alimentación**.

El SCADA constituye una herramienta de supervisión, pero **no reemplaza el criterio del operador**. Una pantalla puede mostrar que una variable se encuentra dentro de un rango determinado, pero el operador debe relacionar esa información con las condiciones reales del proceso y con las instrucciones de operación.



Arquitectura básica del sistema

Un sistema SCADA recibe información proveniente de sensores e instrumentos instalados en terreno. Estas señales llegan normalmente a sistemas de control como **PLC (Controladores Lógicos Programables)**, que procesan la información y ejecutan las lógicas programadas. Los datos son posteriormente enviados a las estaciones de supervisión donde el operador puede visualizarlos.

En términos simples, el proceso puede entenderse como:

Sensor → PLC/controlador → sistema SCADA → operador

En determinadas instalaciones, el flujo también puede ser bidireccional: el operador introduce una orden desde la interfaz y el sistema de control la ejecuta sobre el equipo correspondiente, siempre que se cumplan las condiciones programadas.

Por ejemplo, el operador puede seleccionar una velocidad determinada para un alimentador mediante el sistema de control. El VFD recibe la referencia y regula la velocidad del motor.

Pantallas de operación

La interfaz SCADA normalmente presenta diferentes pantallas o áreas del proceso. Una pantalla general puede mostrar el **diagrama del circuito completo**, mientras que otras presentan información más detallada de chancado, molienda, clasificación, transporte o servicios auxiliares.

Los equipos pueden representarse mediante símbolos gráficos que indican su condición: detenido, funcionando, en alarma, bloqueado o fuera de servicio, según la configuración del sistema.

El operador debe conocer el significado de los diferentes estados y colores utilizados en la planta. Estos pueden variar según el diseño del sistema, por lo que **no se debe asumir que una determinada representación gráfica tiene el mismo significado en todas las instalaciones.**

Visualización de variables

Una de las funciones principales del SCADA es mostrar las variables medidas por los instrumentos de campo. El operador puede observar, por ejemplo:

- alimentación de mineral en t/h;
- nivel de una tolva o cajón;
- presión de una línea;
- flujo de agua o pulpa;
- temperatura de rodamientos;
- velocidad de motores o equipos;
- corriente eléctrica;
- densidad de pulpa;
- estado de bombas y válvulas.

La utilidad del sistema no está solamente en conocer el valor actual. También permite observar **tendencias históricas**, lo que ayuda a identificar cambios progresivos.

Por ejemplo, una temperatura que aumenta lentamente durante varias horas puede ser más importante que una lectura puntual ligeramente elevada. Del mismo modo, una presión que comienza a fluctuar puede advertir una inestabilidad antes de que se produzca una alarma.

Alarmas y eventos

El sistema SCADA puede generar alarmas cuando una variable alcanza un límite establecido o cuando se produce una condición anormal. Las alarmas pueden estar relacionadas con **alta temperatura, baja presión, nivel elevado, sobrecorriente, pérdida de velocidad, falla de comunicación, disparo de equipos u otras condiciones.**

El operador debe aprender a diferenciar entre una alarma que requiere atención inmediata y una condición que permite continuar temporalmente bajo vigilancia, de acuerdo con los procedimientos de la planta.

Una mala práctica es **reconocer o silenciar una alarma sin investigar su causa.** El objetivo de una alarma es llamar la atención sobre una condición que puede afectar la seguridad, el equipo o el proceso.

Cuando aparecen múltiples alarmas simultáneamente, el operador debe identificar cuál puede ser la condición inicial y cuáles son consecuencias posteriores. Por ejemplo, una falla de alimentación eléctrica puede generar varias alarmas secundarias en diferentes equipos.

Tendencias y análisis del proceso

Las tendencias históricas constituyen una de las herramientas más útiles del SCADA. Permiten observar cómo se comportó una variable durante minutos, horas o períodos definidos.

El análisis de tendencias permite identificar:

incrementos progresivos, fluctuaciones, cambios bruscos, ciclos repetitivos y desviaciones respecto de la operación normal.

En molienda, por ejemplo, el operador puede relacionar la tendencia de alimentación con corriente del molino, densidad de pulpa y presión de hidrociclones. Esta comparación permite comprender mejor cómo responde el circuito ante cambios de operación.

La tendencia también puede servir para detectar problemas antes de que se produzca una parada. Un aumento gradual de temperatura o una disminución progresiva de flujo pueden justificar una revisión preventiva.

Control de equipos desde SCADA

Dependiendo de la configuración, algunos equipos pueden arrancarse, detenerse o regularse desde el sistema SCADA. Sin embargo, una orden de arranque no significa que el equipo vaya a funcionar automáticamente.

Los sistemas de control normalmente incorporan **interbloqueos (interlocks)** y condiciones de permiso. Estos pueden impedir el arranque cuando existe una condición insegura o cuando otro equipo necesario para el proceso no está disponible.

Por ejemplo, una bomba puede requerir que exista un nivel mínimo en el cajón; una correa puede depender del estado de otro transportador; y un equipo posterior puede necesitar estar operativo antes de permitir el arranque del equipo que lo alimenta.

El operador debe comprender estas relaciones para evitar interpretar un bloqueo como una falla sin investigar primero la condición que impide el arranque.

Secuencia de arranque y parada

Los circuitos de chancado y molienda normalmente siguen una determinada **secuencia de arranque y parada**. En muchos casos, los equipos posteriores se ponen en servicio antes que los equipos que los alimentan, evitando acumulaciones de material.

Durante una parada, generalmente se sigue el principio inverso: se detiene primero la alimentación y posteriormente los equipos anteriores, permitiendo que el material restante sea evacuado de manera controlada.

El SCADA puede ayudar a ejecutar estas secuencias mediante lógicas automáticas, pero el operador debe conocerlas. **No debe depender exclusivamente de la automatización**, especialmente cuando existe una condición anormal.

Interbloqueos y protecciones

Los interbloqueos protegen equipos y procesos evitando determinadas acciones cuando no se cumplen condiciones preestablecidas.

Un ejemplo puede ser impedir el arranque de un molino si no se encuentra disponible el sistema de lubricación. Otro puede ser detener un alimentador cuando un equipo aguas abajo presenta una condición de parada.

Estas protecciones son parte fundamental de la seguridad operacional y de la protección de los equipos. El operador **no debe puentear, desactivar ni modificar interbloqueos** sin autorización y sin seguir los procedimientos correspondientes.

Cuando un equipo no arranca, una de las primeras acciones debe ser revisar en el sistema cuál es la condición que está bloqueando el arranque.

Pérdida de comunicación o señal

El SCADA depende de la comunicación entre instrumentos, controladores y estaciones de operación. Una pérdida de comunicación puede producir valores congelados, ausencia de datos, estados incorrectos o alarmas de comunicación.

El operador debe aprender a distinguir entre una **condición real del proceso y una pérdida de información**. Si una variable permanece exactamente igual durante un período inusual o desaparece repentinamente, puede existir un problema de instrumentación o comunicación.

En estos casos, no se debe tomar una decisión crítica basándose exclusivamente en una señal que podría ser incorrecta. Debe verificarse la condición mediante otros instrumentos, observación en terreno o comunicación con el personal correspondiente.

Buenas prácticas del operador SCADA

El operador debe mantener una vigilancia activa del proceso y no limitarse a esperar alarmas. Una buena operación consiste en observar:

estado de los equipos + variables actuales + tendencias + alarmas + respuesta del proceso.

También debe registrar eventos relevantes, especialmente cambios de operación, alarmas importantes, paradas, reinicios y condiciones anormales.

El SCADA proporciona una visión global del proceso, pero la información debe interpretarse correctamente. Un operador competente puede mirar una pantalla y comprender **qué equipo está funcionando, qué variable está desviándose, qué efecto puede producir y qué acción corresponde según el procedimiento**.

Por ello, el conocimiento del SCADA es una competencia esencial en una planta moderna de chancado y molienda. Su utilización adecuada permite **mejorar la estabilidad del**

proceso, detectar desviaciones tempranas, reducir tiempos de respuesta y operar los equipos dentro de condiciones seguras y controladas.

4.6. Alarmas, tendencias y parámetros operativos

Las alarmas, tendencias y parámetros operativos constituyen herramientas fundamentales para mantener **el proceso de chancado y molienda dentro de condiciones seguras, estables y eficientes**. El operador debe aprender a interpretar estas tres fuentes de información de manera conjunta: las alarmas indican que una condición ha alcanzado un límite o requiere atención; las tendencias muestran cómo una variable está evolucionando; y los parámetros operativos establecen los rangos dentro de los cuales debe funcionar cada equipo.

El objetivo no es simplemente reaccionar cuando aparece una alarma, sino **detectar anticipadamente las desviaciones y corregirlas antes de que afecten la producción, el equipo o la seguridad**.

Alarmas de proceso y de equipos

Una alarma se genera cuando una variable o condición alcanza un valor previamente configurado. Puede estar relacionada con **nivel, presión, temperatura, flujo, corriente, velocidad, densidad, vibración u otra condición operacional**.

Por ejemplo, una alarma de alta temperatura en un rodamiento puede indicar una condición que requiere inspección. Una alarma de alto nivel en una tolva puede advertir sobre una acumulación de material. Una alarma de baja presión en un sistema de lubricación puede indicar que el suministro de aceite no está funcionando correctamente.

El operador debe conocer las alarmas principales de los equipos bajo su responsabilidad y comprender **qué significa cada una y qué procedimiento debe aplicar**.

No todas las alarmas tienen la misma importancia. Algunas corresponden a una advertencia que permite continuar temporalmente bajo vigilancia; otras pueden activar automáticamente una protección o detener el equipo. Los límites concretos dependen del diseño y configuración de cada planta.

Respuesta correcta ante una alarma

Cuando aparece una alarma, el operador debe evitar reaccionar de manera automática sin comprender la causa. Una secuencia adecuada consiste en:

identificar la alarma → verificar la variable → revisar otras condiciones relacionadas → determinar la causa probable → aplicar el procedimiento correspondiente → comprobar el resultado.

Por ejemplo, si aumenta la corriente de un molino, no necesariamente debe detenerse inmediatamente. El operador puede revisar simultáneamente alimentación, nivel, densidad, comportamiento del molino y otras variables disponibles.

Si la condición continúa aumentando o alcanza un límite de protección, deben respetarse las instrucciones establecidas para esa situación.

Una práctica incorrecta es **silenciar o reconocer repetidamente una alarma sin investigar por qué aparece**. Una alarma recurrente puede ser una señal de un problema que todavía no ha sido solucionado.

Alarmas múltiples

En una planta automatizada pueden aparecer varias alarmas al mismo tiempo. Esto no significa necesariamente que existan muchas fallas independientes.

Una condición inicial puede generar una cadena de consecuencias. Por ejemplo, la detención de una bomba puede producir cambios de nivel, presión y flujo, generando posteriormente varias alarmas relacionadas.

El operador debe intentar identificar **la primera condición que ocurrió y diferenciarla de las alarmas secundarias**. La revisión de la secuencia temporal de eventos puede ser muy útil.

Este criterio evita intervenir varios equipos innecesariamente y permite concentrarse en la causa principal.

Tendencias de las variables

Una tendencia muestra cómo cambia una variable a lo largo del tiempo. Es una herramienta especialmente útil porque permite observar comportamientos que no son evidentes al mirar solamente el valor instantáneo.

Por ejemplo, una temperatura de rodamiento puede encontrarse todavía dentro del rango permitido, pero si presenta un aumento constante durante varias horas, existe una señal que merece atención.

Lo mismo puede ocurrir con:

- presión de alimentación de hidrociclones;
- corriente del molino;
- flujo de agua;
- densidad de pulpa;
- nivel de cajones;
- alimentación de mineral;
- velocidad de alimentadores;
- temperatura de rodamientos.

El operador debe aprender a diferenciar entre una **variación normal y una tendencia anormal**.

Importancia de las tendencias

Una lectura aislada proporciona información limitada. Una tendencia permite conocer **la dirección y velocidad del cambio**.

Por ejemplo, dos equipos pueden mostrar una temperatura de 65 °C, pero la interpretación puede ser diferente si uno permanece estable durante varias horas y el otro aumentó desde 45 °C hasta 65 °C en poco tiempo.

Por eso, las tendencias permiten trabajar de forma más preventiva. El operador puede detectar una condición que todavía no ha activado una alarma, pero que está acercándose progresivamente a un límite.

Esta capacidad es especialmente importante en equipos críticos, donde una detección temprana puede evitar una parada no programada.

Parámetros operativos

Los parámetros operativos son los valores o rangos utilizados como referencia para trabajar correctamente. Pueden incluir **flujo de alimentación, velocidad, corriente, presión, temperatura, nivel, densidad, granulometría y otros indicadores específicos del circuito**.

Estos parámetros no son necesariamente valores únicos e invariables. El rango adecuado puede depender del tipo de mineral, características del equipo, configuración del circuito y condiciones de operación.

El operador debe conocer los parámetros establecidos para su área y evitar modificar límites o consignas sin autorización.

Es importante diferenciar entre:

valor actual: condición que presenta el proceso en ese momento;

set point o consigna: valor objetivo utilizado por el sistema de control;

límite de alarma: valor a partir del cual el sistema genera una advertencia;

límite de protección: condición que puede provocar una acción automática para proteger el equipo o proceso.

Comprender esta diferencia permite interpretar correctamente la información mostrada en el sistema de control.

Set points y ajustes operativos

En sistemas automatizados, muchos equipos trabajan con valores de referencia o **set points**. Por ejemplo, puede establecerse una determinada alimentación de mineral, velocidad de un alimentador, flujo de agua o presión objetivo.

El operador autorizado puede realizar determinados ajustes dentro de los límites definidos. Sin embargo, cambiar un set point modifica el comportamiento del proceso y puede producir efectos sobre otros equipos.

Por ejemplo, aumentar la alimentación al molino puede elevar la corriente y modificar la granulometría. Aumentar el flujo de agua puede modificar la densidad y posteriormente el comportamiento de los hidrociclones.

Por esta razón, todo ajuste debe realizarse **de forma controlada y observando la respuesta del circuito**.

Relación entre parámetros

Las variables del proceso están interconectadas. Una modificación en una variable puede producir cambios en varias otras.

En molienda, por ejemplo:

alimentación de mineral → carga del molino → consumo de energía → granulometría → clasificación.

De manera similar:

flujo de agua → densidad de pulpa → condiciones hidráulicas → clasificación.

El operador debe desarrollar la capacidad de interpretar estas relaciones. Si observa una desviación en una variable, debe preguntarse **qué otras variables deberían cambiar como consecuencia y cuáles deberían permanecer estables**.

Este razonamiento permite detectar problemas de proceso y también posibles errores de instrumentación.

Alarmas, tendencias y mantenimiento

La información registrada por los sistemas de control también puede ser útil para mantenimiento. Una tendencia creciente de temperatura, presión o vibración puede proporcionar información sobre el deterioro progresivo de un componente.

Por ejemplo, si un rodamiento presenta aumentos repetitivos de temperatura antes de cada parada, el registro histórico puede ayudar al personal de mantenimiento a identificar un patrón.

Por esta razón, el operador debe registrar correctamente **alarmas relevantes, eventos, paradas, anomalías y acciones realizadas**. Un buen registro operativo proporciona información útil para prevenir futuras fallas.

Errores frecuentes del operador

Entre los errores que deben evitarse se encuentran:

ignorar alarmas repetitivas, asumir que una alarma es siempre una falla del instrumento, modificar parámetros sin autorización, cambiar varios valores simultáneamente sin analizar sus efectos, observar únicamente el valor actual y no revisar tendencias, y continuar aumentando la carga de un equipo que ya muestra señales de sobrecarga.

También debe evitarse depender exclusivamente del sistema automático. Una condición mostrada en pantalla debe contrastarse, cuando corresponda, con la **observación en terreno y otras variables del proceso**.

Criterio operacional

Un operador competente no espera necesariamente a que una alarma aparezca para actuar. Si observa una tendencia anormal, puede comunicarla y tomar las medidas preventivas permitidas antes de alcanzar el límite de alarma.

Por ejemplo, si la corriente de un molino presenta un incremento progresivo acompañado de aumento de alimentación, el operador puede controlar la alimentación dentro de los procedimientos establecidos antes de llegar a una condición de sobrecarga.

El principio fundamental es:

alarma = condición que requiere atención; tendencia = información para anticiparse; parámetro operativo = referencia para mantener el proceso bajo control.

El dominio de estas tres herramientas permite al operador demostrar que comprende realmente el funcionamiento del circuito. No se limita a observar una pantalla o responder a una alarma, sino que puede **interpretar la evolución del proceso, reconocer desviaciones, relacionar variables y aplicar acciones correctivas de manera controlada y segura**.

4.7. Interpretación básica de información del sistema de control

El operador de chancado y molienda recibe gran parte de la información del proceso a través de **pantallas de control, indicadores, alarmas, tendencias y estados de equipos**. Saber interpretar esta información es fundamental para tomar decisiones correctas y demostrar que se comprende lo que está ocurriendo en la planta.

El objetivo no es que el operador se convierta en especialista en automatización, sino que pueda responder preguntas básicas pero importantes: **¿qué equipo está funcionando?, ¿qué variable está cambiando?, ¿está dentro de su rango normal?, ¿qué puede estar causando la desviación y qué acción corresponde?**

Lectura general de una pantalla de control

Las pantallas de un sistema SCADA o de control suelen representar gráficamente el circuito de proceso. En ellas pueden visualizarse **chancadoras, zarandas, correas, molinos, bombas, hidrociclones, válvulas, tolvas y estanques**, junto con los principales instrumentos asociados.

El operador debe conocer el sentido del flujo del material y entender qué equipos se encuentran **aguas arriba y aguas abajo**. Esta información es importante porque una condición en un equipo puede afectar a los siguientes.

Por ejemplo, si una correa que alimenta un molino se detiene, el problema no se limita a la correa: posteriormente puede disminuir la alimentación del molino, cambiar su carga y modificar las condiciones de clasificación.

Por ello, al observar una pantalla el operador debe interpretar el **circuito completo**, no solamente un equipo aislado.

Estado de los equipos

Los sistemas de control normalmente muestran si un equipo está **funcionando, detenido, en falla, bloqueado, disponible o en otra condición definida por la planta**.

El operador debe comprender la diferencia entre estas situaciones. Un equipo detenido no necesariamente está fallado. Puede encontrarse detenido porque el circuito no requiere su funcionamiento, porque está esperando una condición de arranque o porque existe un interbloqueo activo.

Cuando un equipo no arranca, no debe intentarse reiniciarlo repetidamente sin revisar primero la causa. Es necesario comprobar las condiciones de permiso, alarmas e interbloqueos.

Por ejemplo, una bomba puede no arrancar porque el nivel del cajón está fuera del rango permitido, porque una válvula se encuentra en una posición determinada o porque otro equipo asociado no está disponible.

Interpretación de valores numéricos

El sistema puede mostrar numerosos valores simultáneamente. El operador debe concentrarse en aquellos que son relevantes para la condición que está evaluando.

Entre los datos habituales se encuentran:

t/h de alimentación, rpm o porcentaje de velocidad, amperaje, presión, temperatura, nivel, flujo, densidad y otras variables específicas del proceso.

No basta con conocer si el número es alto o bajo. Es necesario compararlo con el **rango normal, la consigna y los límites de alarma** establecidos.

Por ejemplo, una corriente elevada puede ser normal cuando la alimentación del equipo también ha aumentado. Sin embargo, si la corriente aumenta mientras la alimentación permanece constante, puede existir otra condición que deba investigarse.

Interpretación de set point y valor real

Una pantalla de control puede mostrar un **set point o consigna** y el valor real de una variable.

El set point representa el valor objetivo que el sistema intenta mantener. El valor real corresponde a la medición obtenida del proceso.

Por ejemplo:

Alimentación objetivo: 300 t/h

Alimentación real: 285 t/h

En este caso existe una diferencia entre el objetivo y la condición real. El operador debe observar si el sistema está intentando corregirla y si la diferencia es normal o requiere intervención.

No debe modificar inmediatamente la consigna solamente porque existe una diferencia. Primero debe determinar si el equipo tiene capacidad para alcanzar el objetivo y si existe alguna condición que esté limitando la operación.

Interpretación de alarmas

Las alarmas deben analizarse dentro del contexto del proceso. Cuando aparece una alarma, el operador debe verificar **qué variable la generó, cuándo apareció y qué otros cambios ocurrieron al mismo tiempo**.

Por ejemplo, una alarma de baja presión en una línea puede estar relacionada con una bomba detenida. Si además aparece una alarma de bajo flujo, ambas señales pueden tener una causa común.

La secuencia temporal es especialmente útil. La primera alarma puede representar la causa y las siguientes ser consecuencias.

Una buena práctica es revisar el historial de eventos cuando esté disponible, en lugar de reaccionar únicamente a la última alarma mostrada.

Uso de tendencias

Las tendencias permiten observar el comportamiento de una variable durante un período determinado. Son especialmente útiles para detectar **cambios progresivos**.

Supongamos que la temperatura de un rodamiento se mantiene normalmente estable, pero comienza a aumentar lentamente. Aunque todavía no haya alcanzado el límite de alarma, la tendencia puede justificar una comunicación preventiva.

Lo mismo ocurre con una disminución gradual del flujo de una bomba, un aumento progresivo de la corriente de un molino o fluctuaciones crecientes de la presión de un hidrociclón.

El operador debe acostumbrarse a preguntar:

¿El valor está estable, aumentando, disminuyendo o fluctuando?

Esta simple interpretación permite pasar de una operación reactiva a una operación más preventiva.

Relación entre variables

La información del sistema de control adquiere mayor valor cuando varias variables se interpretan conjuntamente.

Por ejemplo, en molienda:

aumento de alimentación → aumento de carga → aumento de corriente → posible modificación de granulometría.

Otro ejemplo:

disminución del agua → aumento de densidad → modificación de condiciones hidráulicas → posible cambio en clasificación.

El operador debe reconocer estas relaciones para evitar realizar correcciones equivocadas.

Si el producto está demasiado grueso, por ejemplo, no necesariamente significa que el molino tenga una falla. Puede existir un problema de alimentación, clasificación, densidad o carga circulante.

Reconocimiento de una señal posiblemente incorrecta

El operador también debe ser capaz de detectar cuando una información mostrada en pantalla puede no representar la condición real.

Algunas señales de alerta son:

- valor que permanece exactamente igual durante un período inusual;
- cambio repentino sin explicación operacional;
- lectura incompatible con otras variables;
- pérdida de señal;
- indicación de equipo funcionando cuando existe evidencia de que está detenido;
- valor extremadamente alto o bajo sin cambios correspondientes en el proceso.

Ante una posible falla de instrumentación, el operador debe **verificar mediante otra fuente de información** cuando sea posible y comunicar la condición correspondiente.

Nunca debe asumirse que la pantalla siempre tiene razón.

Interpretación del proceso aguas arriba y aguas abajo

Una de las competencias más importantes consiste en entender la relación entre equipos.

Si aumenta la alimentación de una chancadora, puede aumentar el flujo hacia una zaranda. Si la zaranda no tiene capacidad suficiente, puede acumularse material. Si posteriormente ese material alimenta un molino, pueden cambiar la carga y la corriente del motor.

Por ello, ante una desviación el operador debe mirar **hacia atrás y hacia adelante en el circuito**:

¿Qué está alimentando este equipo? ¿Qué equipo recibe su descarga?

Este criterio permite identificar causas que pueden encontrarse fuera del equipo donde apareció la alarma.

Ejemplo de interpretación operacional

Supongamos que el sistema muestra:

- aumento de alimentación al molino;
- incremento de corriente;
- aumento de nivel en el cajón de descarga;
- presión de hidrociclones fluctuante;
- producto progresivamente más grueso.

Un operador sin criterio puede intentar corregir únicamente la granulometría. Un operador capacitado reconoce que varias variables están relacionadas y considera primero una posible **sobrealimentación o pérdida de estabilidad del circuito de clasificación**.

La respuesta correcta será revisar las condiciones de alimentación, carga, flujo, densidad y clasificación, siguiendo los procedimientos establecidos, antes de realizar modificaciones importantes.

Buenas prácticas frente al sistema de control

El operador debe mantener una vigilancia activa y evitar concentrarse únicamente en una variable. Debe comparar **valores actuales, tendencias, alarmas y estado de los equipos**.

También debe conocer las condiciones normales de su circuito. Sin conocer cómo se comporta normalmente una planta, es difícil reconocer una desviación.

Los cambios realizados deben hacerse de manera controlada y, cuando corresponda, registrarse. Después de una modificación, el operador debe observar si el proceso realmente respondió como esperaba.

La información del sistema de control debe utilizarse para **comprender el proceso y anticipar problemas**, no solamente para reaccionar ante alarmas.

En definitiva, interpretar correctamente un sistema de control significa convertir los datos en una **decisión operacional razonada**. El operador competente puede observar una pantalla, reconocer una desviación, relacionarla con otras variables, identificar una causa probable y determinar si corresponde ajustar una variable, continuar monitoreando, detener el equipo o solicitar intervención de otra área.

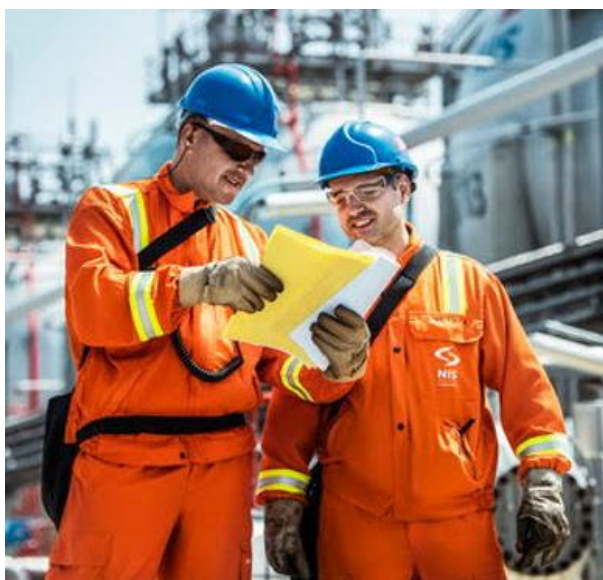
Esta capacidad diferencia a un operador que simplemente “**mira el SCADA**” de uno que realmente **comprende y controla el proceso de chancado y molienda**.

Módulo 5. Seguridad, Mantenimiento Operativo y Gestión de Datos

5.1. Identificación de peligros y evaluación de riesgos en chancado y molienda

Las áreas de chancado y molienda concentran **equipos de gran tamaño, partes móviles, energía eléctrica, material mineral, polvo, ruido, presión, sistemas hidráulicos y superficies de trabajo con diferentes riesgos operacionales**. Por esta razón, la identificación de peligros y evaluación de riesgos constituye una actividad fundamental antes, durante y después de la operación.

El operador no debe limitarse a conocer los procedimientos de seguridad escritos. Debe ser capaz de **reconocer un peligro directamente en el área de trabajo, evaluar qué podría ocurrir y determinar qué controles deben aplicarse antes de continuar la actividad**.



Peligro y riesgo

Es importante diferenciar ambos conceptos.

Un **peligro** es una fuente o situación con capacidad de producir daño. Por ejemplo, una correa transportadora en movimiento constituye una fuente de peligro debido a sus partes móviles.

El **riesgo** corresponde a la combinación entre la posibilidad de que ocurra un evento peligroso y la gravedad de sus consecuencias.

Esta diferencia permite entender que eliminar o controlar el peligro es generalmente más efectivo que depender únicamente del comportamiento del trabajador.

En chancado y molienda pueden encontrarse peligros asociados a **atrapamiento, aplastamiento, golpes, proyección de material, electricidad, energía mecánica,**

presión, ruido, polvo, sustancias químicas, calor, caídas y tránsito de equipos móviles.

Peligros mecánicos

Los equipos de chancado y molienda contienen numerosas partes móviles: **mandíbulas, mantos, ejes, poleas, correas, acoplamientos, engranajes, molinos, bombas y sistemas de transmisión.**

El atrapamiento constituye uno de los riesgos más importantes. Puede ocurrir cuando una persona entra en contacto con una parte móvil o queda atrapada entre componentes.

Las protecciones físicas, guardas, barreras y dispositivos de seguridad deben mantenerse instalados y en condiciones adecuadas. **Nunca se debe retirar una guarda para observar, limpiar o intervenir un equipo en movimiento.**

Los puntos de atrapamiento también pueden encontrarse en correas transportadoras, poleas y rodillos. La proximidad de ropa suelta, herramientas o partes del cuerpo a estos componentes puede provocar accidentes graves.

Energías peligrosas

Un equipo detenido no necesariamente está libre de energía. Puede existir **energía eléctrica, mecánica, hidráulica, neumática, gravitacional, térmica o presión acumulada.**

Por ejemplo, un molino puede detenerse pero mantener componentes con energía potencial o inercia. Una línea hidráulica puede permanecer presurizada. Una correa puede moverse inesperadamente si recibe una orden de arranque.

Por ello, antes de realizar trabajos de limpieza, mantenimiento, desatascos o intervención, debe aplicarse el procedimiento de **bloqueo y etiquetado de energías peligrosas (LOTO)** cuando corresponda.

El principio fundamental es que la persona que interviene debe asegurarse de que las fuentes de energía relevantes estén **aisladas, bloqueadas y verificadas**, según el procedimiento autorizado.

Atascos y desatascos

Los atascos en chancadoras, chutes, tolvas, zarandas y tuberías constituyen una situación particularmente peligrosa porque pueden generar liberación repentina de material.

El operador nunca debe intentar retirar manualmente un material atascado introduciendo las manos, brazos o herramientas en una zona de atrapamiento.

Antes de intervenir, debe detenerse el equipo, aislar las energías correspondientes y verificar que no exista posibilidad de movimiento o liberación inesperada de material.

Además, no se debe asumir que la ausencia de movimiento visible significa ausencia de peligro. **Un bloque de mineral suspendido puede caer repentinamente**, incluso después de que el equipo haya sido detenido.

Peligros eléctricos

Los motores, tableros, centros de control, VFD, cables y otros componentes eléctricos presentan riesgos de **contacto eléctrico, arco eléctrico, cortocircuito y energización inesperada**.

El operador debe limitarse a las tareas para las cuales está autorizado. No debe abrir tableros eléctricos ni intervenir componentes energizados sin las competencias, autorización y controles correspondientes.

Los equipos eléctricos deben mantenerse secos y protegidos contra condiciones que puedan deteriorar el aislamiento. Cables dañados, conexiones expuestas, olor a quemado o disparos repetitivos deben comunicarse inmediatamente.

Polvo y material particulado

El chancado y la transferencia de mineral pueden generar **polvo respirable y partículas en suspensión**. La cantidad depende de las características del mineral, humedad, velocidad de transferencia, diseño del sistema y condiciones ambientales.

Las medidas de control pueden incluir encapsulamiento, sistemas de extracción, supresión de polvo, limpieza industrial y controles administrativos. El uso de protección respiratoria debe formar parte de un programa adecuado cuando corresponda.

El operador debe evitar métodos de limpieza que vuelvan a poner grandes cantidades de polvo en suspensión. La presencia persistente de polvo puede indicar una deficiencia en los sistemas de control que debe ser comunicada.

Ruido y vibraciones

Chancadoras, molinos, zarandas, bombas y otros equipos pueden generar **niveles elevados de ruido y vibración**.

La exposición prolongada al ruido puede afectar la audición, mientras que vibraciones anormales pueden constituir tanto un riesgo para las personas como una señal de deterioro mecánico.

El operador debe utilizar la protección auditiva establecida y respetar las zonas señalizadas. Además, debe prestar atención a cambios en el ruido o vibración de los equipos, ya que pueden indicar una condición que requiere inspección.

Caídas, superficies y derrames

Las áreas de chancado y molienda pueden presentar **pasarelas, escaleras, plataformas, desniveles, superficies húmedas y derrames de mineral o pulpa**.

Un derrame aparentemente pequeño puede generar un riesgo de resbalón, mientras que la presencia de mineral en una pasarela puede dificultar una evacuación.

El orden y la limpieza constituyen controles preventivos importantes. Los derrames deben comunicarse y gestionarse según los procedimientos establecidos, sin exponerse innecesariamente a equipos en movimiento o líneas presurizadas.

Cuando exista trabajo en altura, deben aplicarse los controles específicos establecidos para esa actividad.

Evaluación del riesgo antes de la tarea

Antes de iniciar una actividad, el operador debe preguntarse:

¿Qué puede causar daño? ¿Quién puede estar expuesto? ¿Qué podría ocurrir? ¿Qué controles existen? ¿Los controles están funcionando?

La evaluación debe considerar tanto las condiciones normales como las situaciones anormales: **arranque, parada, limpieza, mantenimiento, desatasco, derrames, fallas de equipos y emergencias.**

Una tarea que normalmente es segura puede adquirir un riesgo elevado cuando cambia una condición. Por ejemplo, limpiar alrededor de una correa durante una operación normal no debe convertirse en una aproximación peligrosa a una polea o rodillo en movimiento.

Jerarquía de controles

Los riesgos deben controlarse siguiendo una lógica preventiva. La **jerarquía de controles** prioriza, en términos generales:

eliminación del peligro → sustitución → controles de ingeniería → controles administrativos → equipos de protección personal.

En una planta, una guarda física constituye un control de ingeniería. Un procedimiento de trabajo seguro constituye un control administrativo. Los guantes, protección auditiva, lentes o respiradores corresponden a equipos de protección personal.

El EPP es importante, pero **no debe considerarse automáticamente como el único control necesario** cuando existen medidas de ingeniería o aislamiento que pueden reducir el peligro directamente.

Reconocimiento de condiciones inseguras

El operador debe desarrollar capacidad para identificar condiciones que requieren atención, como:

- guardas retiradas o dañadas;
- cables o conexiones deterioradas;
- derrames;

- fugas de aceite o pulpa;
- plataformas o barandas defectuosas;
- alarmas o protecciones fuera de servicio;
- ruidos o vibraciones anormales;
- accesos bloqueados;
- acumulación excesiva de mineral;
- presencia de personas en zonas de peligro;
- equipos intervenidos sin aislamiento visible o autorizado.

Estas condiciones deben **comunicarse y corregirse antes de continuar cuando representen un riesgo no controlado.**

Importancia del comportamiento seguro

La experiencia del operador es valiosa, pero nunca debe utilizarse como justificación para omitir controles. Frases como “siempre lo hacemos así” o “solo tomará unos segundos” pueden conducir a accidentes graves.

Una operación profesional significa respetar los procedimientos incluso durante tareas aparentemente simples.

El operador debe detener la actividad cuando identifique una condición que no pueda controlar de forma segura y comunicarla al supervisor o responsable correspondiente.

Criterio práctico del operador

La identificación de peligros debe convertirse en una conducta habitual. Antes de intervenir un equipo, el operador debe conocer **qué puede moverse, qué puede caer, qué puede liberar energía, qué puede estar presurizado y qué partes pueden causar atrapamiento.**

En chancado y molienda, la seguridad depende en gran medida de reconocer que los equipos pueden almacenar o liberar energía incluso cuando aparentemente están detenidos.

Por ello, un operador competente no solamente sabe poner en marcha y detener una máquina. También sabe **identificar peligros, evaluar las consecuencias, verificar los controles, respetar los sistemas de protección y detener una tarea cuando las condiciones dejan de ser seguras.**

La aplicación constante de este criterio permite reducir la probabilidad de accidentes, proteger los equipos y mantener una operación de chancado y molienda **segura, controlada y profesional.**

5.2. Bloqueo y etiquetado de equipos (LOTO)

El **bloqueo y etiquetado de equipos (LOTO, Lockout/Tagout)** es un procedimiento de control de energías peligrosas utilizado antes de realizar actividades de mantenimiento, limpieza, inspección, desatasco o intervención que puedan exponer a una persona al movimiento inesperado o a la liberación de energía de un equipo. En las áreas de chancado

y molienda, el LOTO es especialmente importante debido a la presencia de equipos de gran potencia, elementos móviles, electricidad, presión, energía hidráulica, energía neumática, gravedad y energía almacenada.



Objetivo del procedimiento LOTO

El objetivo principal del LOTO es garantizar que un equipo permanezca **aislado, bloqueado y fuera de operación** mientras una persona realiza un trabajo que implique exposición a una fuente de energía peligrosa. No basta con detener el equipo desde un botón de parada o desde el sistema de control; una orden de parada puede ser modificada, restablecida o incluso fallar, mientras que una fuente de energía aislada y bloqueada impide físicamente su reconexión.

En un circuito de chancado, por ejemplo, detener una chancadora desde el panel de control no necesariamente elimina todos los peligros. Puede permanecer energía eléctrica en determinados componentes, material atrapado dentro del equipo, tensión mecánica en correas, presión hidráulica, energía gravitacional en elementos elevados o movimiento posible de componentes. Por esta razón, el procedimiento debe considerar **todas las fuentes de energía asociadas al trabajo**.

Identificación de las energías peligrosas

Antes del bloqueo se deben identificar las fuentes de energía que pueden provocar lesiones. Entre las más frecuentes se encuentran la **energía eléctrica**, mecánica, hidráulica, neumática, térmica, gravitacional y la energía almacenada.

La energía eléctrica puede estar presente en motores, tableros, variadores de frecuencia, bombas y sistemas auxiliares. La energía mecánica está relacionada con ejes, correas, poleas, acoplamientos, volantes y otros elementos móviles. La energía hidráulica puede encontrarse en sistemas de ajuste o accionamiento, mientras que la neumática puede estar presente en actuadores y sistemas de aire comprimido. También debe considerarse la energía gravitacional de componentes elevados y la presión o tensión acumulada en determinados sistemas.

La identificación debe considerar además el **material contenido en el equipo**. Una chancadora, tolva o molino puede contener mineral que se desplace inesperadamente cuando se libera un bloqueo. Por ello, aislar únicamente la alimentación eléctrica puede no ser suficiente.

Secuencia básica de bloqueo y etiquetado

El procedimiento específico depende del equipo y de los estándares de cada operación, pero normalmente comprende una secuencia ordenada: **preparar, detener, aislar, bloquear, liberar o controlar la energía residual, verificar y realizar el trabajo**.

Primero se debe conocer el equipo que será intervenido, el trabajo que se realizará y las fuentes de energía involucradas. Luego se comunica la detención a las personas afectadas y se realiza la parada normal del equipo, cuando corresponda.

Después se procede al **aislamiento físico de las fuentes de energía** mediante los dispositivos previstos para ello. Sobre los puntos de aislamiento se colocan los dispositivos de bloqueo y las etiquetas correspondientes. El bloqueo debe impedir físicamente que la fuente pueda ser reconectada mientras exista personal expuesto.

Una etapa fundamental es controlar la **energía residual o almacenada**. Dependiendo del equipo, puede ser necesario descargar presión, eliminar energía hidráulica o neumática, esperar la detención completa de partes móviles, asegurar componentes que puedan caer y controlar cualquier otra energía que pueda producir un movimiento inesperado.

Finalmente se realiza la **verificación de aislamiento**. Antes de iniciar el trabajo, debe comprobarse que el equipo no puede ponerse en funcionamiento y que las fuentes peligrosas han sido efectivamente aisladas. Esta verificación debe realizarse de acuerdo con el procedimiento establecido y por personal autorizado.

Candados, etiquetas y responsabilidades

El candado de bloqueo identifica que una persona está protegida y que el equipo no debe ser puesto en servicio. La etiqueta proporciona información adicional, como la identificación del trabajador, advertencias y otras indicaciones establecidas por la organización.

En sistemas de **bloqueo personal**, cada trabajador expuesto coloca su propio candado y es responsable de retirarlo siguiendo el procedimiento correspondiente. En trabajos con varias personas pueden utilizarse sistemas de bloqueo grupal, cajas de bloqueo u otros mecanismos establecidos por la operación.

Un operador no debe retirar el candado de otra persona, puentear un dispositivo de bloqueo ni permitir el arranque de un equipo que se encuentra bajo LOTO. La retirada excepcional de un bloqueo ajeno, cuando sea necesaria, debe realizarse únicamente mediante el **procedimiento formal autorizado por la empresa**, después de verificar las condiciones establecidas.

LOTO durante desatascos, limpieza y mantenimiento

En chancado y molienda, algunas de las situaciones de mayor riesgo son los **desatascos de mineral, limpieza de equipos y eliminación de material acumulado**. Nunca se debe introducir una herramienta, brazo o parte del cuerpo en una chancadora, tolva, zaranda, faja o molino mientras exista posibilidad de movimiento o liberación de energía.

Un equipo aparentemente detenido puede reiniciarse automáticamente mediante una señal del sistema de control, por una acción de otro trabajador o después de recuperar una condición de operación. Por ello, cuando el trabajo implique exposición a partes peligrosas, debe aplicarse el procedimiento de aislamiento correspondiente.

El operador debe conocer la diferencia entre una **parada operacional** y un **aislamiento de energía**. La primera detiene el proceso; el segundo establece una condición segura para intervenir el equipo.

Errores que deben evitarse

Entre los errores más peligrosos se encuentran confiar únicamente en el botón de parada, no identificar todas las fuentes de energía, comenzar el trabajo sin verificar el aislamiento, dejar energía residual sin controlar, utilizar únicamente una etiqueta sin el sistema de bloqueo requerido, retirar el bloqueo de otra persona o asumir que un equipo está seguro porque aparece detenido en el sistema SCADA.

El LOTO debe considerarse una **barrera de seguridad física y procedimental**, no simplemente una formalidad administrativa.

Criterio práctico del operador

El operador debe ser capaz de reconocer cuándo una actividad requiere LOTO, identificar las fuentes de energía involucradas, comunicar la intervención, respetar los puntos de aislamiento establecidos y verificar que ninguna persona trabaje sobre un equipo que pueda energizarse o moverse inesperadamente. Cuando el procedimiento corresponda a personal autorizado de mantenimiento o implique una intervención fuera de sus funciones, el operador debe **detenerse, informar y solicitar la intervención correspondiente**, sin improvisar métodos de bloqueo.

El principio fundamental es simple: **ninguna persona debe quedar expuesta a una energía peligrosa que pueda ser aislada y controlada**. En chancado y molienda, aplicar correctamente LOTO permite transformar una condición de equipo detenido en una condición de trabajo controlada y segura.

5.3. Inspección, limpieza y mantenimiento operativo básico

La **inspección, limpieza y mantenimiento operativo básico** forman parte de las responsabilidades fundamentales del operador de chancado y molienda. Estas actividades permiten detectar oportunamente condiciones anormales, mantener el área de trabajo en condiciones seguras y contribuir a la continuidad del proceso. El operador no reemplaza al

personal especializado de mantenimiento, pero debe conocer el estado normal de los equipos, identificar desviaciones y ejecutar únicamente las tareas autorizadas dentro de sus funciones.

Inspección operacional de los equipos

La inspección debe realizarse de acuerdo con las rondas y frecuencias establecidas por la operación. Antes de revisar un equipo se debe considerar su condición operacional y mantener una distancia segura respecto de partes móviles. Nunca se debe retirar una protección ni acercarse a componentes en movimiento para realizar una inspección que pueda generar exposición.

Durante la ronda se observan aspectos como **ruidos anormales, vibraciones, temperatura, fugas, desgaste visible, acumulación de material, estado de protecciones, correas, poleas, estructuras, pernos, canaletas y sistemas de lubricación**. También se deben revisar los indicadores disponibles en terreno o en el sistema de control, comparando los valores actuales con las condiciones normales conocidas.

En una faja transportadora, por ejemplo, pueden observarse desviaciones de la correa, derrames, daños en empalmes, rodillos con comportamiento anormal o acumulación de material. En una chancadora pueden identificarse ruidos inusuales, vibraciones excesivas, fugas de aceite o problemas de alimentación. En un molino pueden controlarse ruido, vibración, temperatura de rodamientos, lubricación y comportamiento general del equipo.

La inspección no consiste solamente en mirar el equipo. El operador debe **comparar la condición actual con el comportamiento normal** y reconocer cambios que puedan indicar una falla en desarrollo.

Limpieza operacional

La limpieza permite mantener despejadas las áreas de circulación, plataformas, accesos, equipos y puntos de inspección. La acumulación de mineral puede provocar resbalones, tropiezos, obstrucción de pasillos, dificultad para inspeccionar componentes y riesgos adicionales alrededor de equipos móviles.

La limpieza debe realizarse utilizando los métodos y herramientas autorizados. Se debe evitar colocar las manos cerca de partes móviles, introducir herramientas en equipos energizados o utilizar agua en lugares donde pueda existir riesgo eléctrico o donde el procedimiento no lo permita.

En puntos de transferencia, tolvas y fajas es importante controlar la acumulación de material y los derrames. La limpieza debe realizarse de manera planificada y segura, respetando las zonas de exclusión y los procedimientos establecidos. Si para limpiar es necesario retirar una protección, ingresar a una zona peligrosa o intervenir directamente un equipo, **la actividad deja de ser una simple tarea de limpieza operacional y puede requerir aislamiento mediante LOTO y personal autorizado**.

Mantenimiento operativo básico

El mantenimiento operativo básico comprende aquellas tareas simples que el operador está expresamente autorizado a realizar, como determinadas actividades de lubricación, inspección visual, limpieza de componentes accesibles, verificación de niveles, reaprietes menores o controles definidos en las instrucciones del equipo.

La ejecución debe seguir siempre las especificaciones del fabricante y los procedimientos internos. Una tarea aparentemente sencilla puede generar un accidente si se realiza sobre un equipo en movimiento o con energía residual.

Por ejemplo, antes de revisar un nivel de lubricante se debe conocer el procedimiento correcto, utilizar los elementos de protección correspondientes y confirmar las condiciones requeridas para la tarea. No se debe agregar lubricante indiscriminadamente ni mezclar productos sin verificar que sean compatibles.

El operador también debe reconocer los límites de su responsabilidad. **Detectar una falla no significa necesariamente que deba repararla.** Si existe una fuga importante, una vibración anormal, daño estructural, sobrecalentamiento o deterioro de un componente crítico, corresponde informar y solicitar la intervención del personal competente.

Protecciones y dispositivos de seguridad

Durante las inspecciones se debe prestar especial atención a las **guardas, barandas, plataformas, interruptores de emergencia, cables de parada, señalización y accesos**. Estos elementos forman parte del sistema de protección de las personas y no deben ser modificados, retirados ni anulados.

Una guarda suelta o ausente, un cable de emergencia dañado o un acceso bloqueado debe considerarse una condición que requiere atención inmediata. El operador debe informar según el procedimiento establecido y, cuando corresponda, detener el equipo si existe un riesgo que pueda afectar directamente a las personas.

Nunca se deben puentear sensores, interlocks o dispositivos de seguridad para mantener la producción. Una modificación temporal puede eliminar precisamente la barrera diseñada para evitar un accidente.

Detección y comunicación de condiciones anormales

Una buena inspección permite identificar señales tempranas de deterioro. **Un pequeño cambio de ruido, temperatura, vibración, consumo eléctrico o comportamiento del material puede ser una señal importante** cuando se compara con la condición normal del equipo.

Ante una anomalía, el operador debe evaluar si corresponde continuar observando, ajustar una variable dentro de sus funciones, detener el equipo conforme al procedimiento o solicitar asistencia. La decisión debe basarse en procedimientos y límites operativos, no en improvisaciones.

La información comunicada debe ser concreta: equipo afectado, ubicación, condición observada, momento en que apareció y cualquier parámetro relevante. Cuando corresponda, la observación debe registrarse en la bitácora o sistema de mantenimiento para facilitar el seguimiento.

Principio de mantenimiento preventivo

La inspección diaria constituye una primera barrera para evitar fallas mayores. Detectar tempranamente una fuga, un rodamiento que aumenta su temperatura, una correa desalineada o una vibración anormal permite intervenir antes de que el problema provoque una parada no programada o un daño más costoso.

El operador competente debe desarrollar el hábito de **observar, comparar, detectar, comunicar y registrar**. Su función no es reparar cualquier anomalía, sino mantener el proceso dentro de condiciones seguras, reconocer oportunamente los cambios y actuar de acuerdo con su nivel de autorización.

En chancado y molienda, la inspección y el mantenimiento operativo básico deben integrarse a la operación diaria: **un equipo limpio, inspeccionado y correctamente controlado permite trabajar con mayor seguridad, estabilidad y continuidad operacional.**

5.4. Detección de condiciones anormales y comunicación de fallas

La **detección temprana de condiciones anormales** es una de las funciones más importantes del operador de chancado y molienda. Los equipos trabajan de manera continua y bajo cargas elevadas, por lo que una desviación pequeña puede evolucionar rápidamente hacia una falla, una detención del proceso o una condición peligrosa. El operador debe conocer el comportamiento normal de los equipos, reconocer cambios significativos y comunicar oportunamente la información al personal correspondiente.

Reconocimiento de una condición normal y anormal

Para detectar una anomalía es necesario conocer primero cómo funciona normalmente el equipo. El operador debe observar parámetros como **ruido, vibración, temperatura, presión, flujo, nivel, corriente del motor, velocidad y comportamiento del material**. También debe considerar la información disponible en instrumentos, paneles de control y SCADA.

Una condición anormal puede manifestarse mediante un cambio repentino o progresivo. Por ejemplo, un aumento de corriente puede indicar sobrecarga; una vibración creciente puede estar asociada a problemas mecánicos; una temperatura elevada puede señalar dificultades de lubricación o deterioro de un componente; y una reducción del flujo puede relacionarse con una obstrucción o una falla en una bomba.

No todos los cambios significan una falla inmediata. Lo importante es **identificar la desviación, evaluar su tendencia y relacionarla con otras variables del proceso.**

Señales mecánicas y operacionales

Los cambios de **ruido y vibración** son señales especialmente importantes. Un sonido metálico, golpes repetitivos, chirridos o un ruido diferente al habitual pueden indicar desgaste, contacto entre componentes o problemas de transmisión.

La temperatura también proporciona información relevante. Un aumento progresivo en rodamientos, motores, cajas reductoras o sistemas de lubricación puede indicar una condición que requiere revisión. Sin embargo, el operador no debe tocar directamente componentes para comprobar su temperatura; debe utilizar los instrumentos disponibles y respetar las condiciones de seguridad.

En correas transportadoras se deben observar desalineamiento, deslizamiento, derrames, acumulaciones y daños visibles. En chancadoras, cambios en la alimentación, vibraciones, ruidos, presión o corriente pueden indicar sobrecarga o problemas en el circuito. En molinos, variaciones en el sonido, corriente, nivel de carga o comportamiento de la descarga pueden señalar modificaciones en las condiciones de molienda.

Señales del proceso

Una falla no siempre comienza en el equipo mismo. También puede manifestarse mediante cambios en el **flujo de mineral, granulometría, densidad de pulpa, nivel de tolvas o comportamiento de la clasificación**.

Por ejemplo, una disminución de alimentación puede provocar una reducción de carga en un molino, mientras que una alimentación excesiva puede generar aumento de corriente y sobrecarga. Una variación de presión en hidrociclones puede modificar la clasificación y alterar el tamaño del producto. Una zaranda con problemas puede producir acumulación de material y modificar la alimentación de los equipos posteriores.

Por esta razón, el operador debe analizar el circuito como un **sistema conectado**. Una anomalía en un equipo puede ser consecuencia de un problema situado aguas arriba o aguas abajo.

Alarmas y tendencias

Las alarmas del sistema de control constituyen una herramienta importante para identificar desviaciones. El operador debe distinguir entre una alarma momentánea y una condición que permanece o se repite.

Cuando aparece una alarma, no se debe limitar la respuesta a reconocerla o silenciarla. Primero debe verificarse **qué variable generó la alarma, cuál es su valor actual, cómo ha evolucionado y qué otros parámetros están cambiando**.

Las tendencias son especialmente útiles para detectar problemas progresivos. Un aumento lento de temperatura, corriente o vibración puede ser más importante que un valor momentáneamente elevado. La observación de tendencias permite comunicar una condición antes de que alcance un nivel crítico.

Clasificación de la condición y respuesta

Al detectar una anomalía, el operador debe determinar si se trata de una desviación que puede corregirse mediante una acción operacional autorizada, una condición que requiere vigilancia o una situación que exige detener el equipo y solicitar asistencia.

Una secuencia práctica consiste en **detectar la desviación, verificar la información, identificar la causa probable, actuar dentro de la autoridad disponible, observar el resultado y comunicar o registrar la condición.**

Si existe riesgo para las personas, daño importante del equipo, pérdida de una protección, incendio, fuga significativa, vibración severa o posibilidad de una falla catastrófica, no se debe continuar operando únicamente para mantener la producción. Se debe aplicar el procedimiento de emergencia o parada correspondiente.

Comunicación efectiva de fallas

Una comunicación útil debe proporcionar información concreta. Decir simplemente “la chancadora está fallando” no permite al personal de mantenimiento comprender adecuadamente la situación. Es preferible indicar **qué equipo presenta el problema, qué se observó, cuándo comenzó, qué parámetro cambió y qué acciones se realizaron.**

Por ejemplo: “La chancadora presenta aumento progresivo de corriente y vibración desde el último cambio de alimentación; la corriente se mantiene por encima del valor habitual y la descarga está disminuyendo”. Esta información permite orientar rápidamente la revisión.

Cuando corresponda, la anomalía debe registrarse en la **bitácora operacional, sistema de mantenimiento o formato establecido**, indicando fecha, hora, equipo y descripción de la condición.

Relación entre detección y mantenimiento

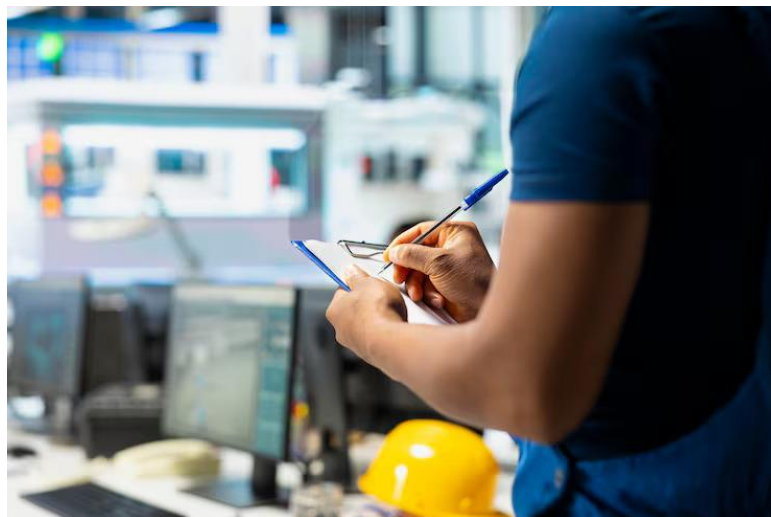
Una comunicación temprana permite que mantenimiento intervenga antes de que una condición menor se convierta en una falla mayor. El operador proporciona información obtenida durante la operación; el personal competente determina posteriormente el diagnóstico y la reparación cuando corresponda.

Por ello, el operador no debe ocultar, minimizar ni modificar una condición anormal para evitar una detención. **La información operacional es parte del control de la confiabilidad del proceso.**

Un operador competente debe ser capaz de reconocer las principales señales de deterioro, diferenciar una variación normal de una desviación significativa, utilizar alarmas e indicadores para confirmar la condición, actuar dentro de sus funciones y comunicar la información de manera clara y oportuna. La capacidad de **detectar temprano y comunicar correctamente** puede evitar accidentes, daños de equipos y pérdidas importantes de producción.

5.5. Bitácora de turno y registro de parámetros operativos

La **bitácora de turno y el registro de parámetros operativos** son herramientas fundamentales para mantener la continuidad, seguridad y estabilidad del proceso de chancado y molienda. Permiten dejar evidencia de las condiciones encontradas, las actividades realizadas, las desviaciones detectadas y las acciones ejecutadas durante cada turno. Un registro correctamente elaborado facilita la comunicación entre operadores, supervisores y personal de mantenimiento, y permite identificar tendencias o problemas repetitivos.



Información básica del turno

Al iniciar un turno, el operador debe revisar la información disponible del turno anterior y conocer el estado de los equipos, trabajos de mantenimiento pendientes, equipos fuera de servicio, restricciones operativas, alarmas relevantes y condiciones especiales del circuito.

La bitácora debe registrar, según el formato utilizado por la operación, **fecha, turno, identificación del operador, equipos involucrados y principales condiciones de operación**. También pueden registrarse cambios importantes en la configuración del circuito, intervenciones de mantenimiento y situaciones que deban ser consideradas por el siguiente turno.

El cambio de turno debe incluir una comunicación clara. No es suficiente entregar una bitácora incompleta esperando que el siguiente operador interprete la situación. Los problemas activos, equipos con comportamiento anormal y trabajos pendientes deben comunicarse directamente cuando corresponda.

Registro de parámetros operativos

Los parámetros registrados deben ser aquellos que permiten evaluar el comportamiento del proceso. En chancado pueden incluirse **alimentación de mineral, corriente del motor, velocidad, abertura de chancado, presión, nivel de tolvas, granulometría y producción**, dependiendo del tipo de instalación.

En molienda pueden registrarse **alimentación, corriente o potencia del molino, velocidad, nivel de carga, flujo de agua, densidad de pulpa, presión de clasificación, flujo de descarga y granulometría del producto.**

No todos los parámetros tienen que registrarse con la misma frecuencia. La frecuencia debe establecerse según los procedimientos de la planta y la importancia de cada variable. Lo importante es que los datos sean suficientes para conocer la evolución del proceso y detectar desviaciones.

Calidad y confiabilidad de los datos

Un registro operacional debe ser **claro, exacto, oportuno y trazable**. El operador debe evitar completar datos de memoria, copiar valores anteriores o registrar información que no haya sido verificada.

Cuando un valor proviene de un instrumento, debe registrarse de acuerdo con la unidad correspondiente. Por ejemplo, no debe confundirse toneladas por hora con toneladas acumuladas, ni presión con flujo. También es importante mantener consistencia en las unidades y horarios.

Si un instrumento presenta una lectura claramente anormal o se encuentra fuera de servicio, no se debe inventar un valor. Debe registrarse la condición del instrumento y comunicarla según el procedimiento establecido.

Los registros manuales deben ser legibles y las modificaciones deben realizarse de acuerdo con las reglas establecidas por la organización. En sistemas digitales, los datos deben introducirse correctamente y evitar duplicaciones o registros fuera del período correspondiente.

Registro de eventos y desviaciones

La bitácora no debe contener únicamente números. También debe registrar **eventos relevantes del proceso**. Por ejemplo, una parada de chancadora, atasco de una faja, cambio de alimentación, sobrecarga de un molino, pérdida de señal de un sensor, variación importante de densidad o intervención de mantenimiento.

La descripción debe indicar qué ocurrió y qué respuesta se realizó. Una anotación como “problema en faja” proporciona poca información. Es más útil indicar que se detectó desalineamiento de la correa, se realizó la acción operacional autorizada y se comunicó la condición a mantenimiento.

Cuando una desviación se repite, los registros permiten identificar patrones. Varias observaciones de aumento de temperatura en un mismo rodamiento, por ejemplo, pueden proporcionar información importante para una inspección de mantenimiento.

Uso de tendencias para la toma de decisiones

Los registros adquieren mayor valor cuando se comparan en el tiempo. Un único dato puede parecer normal, mientras que una serie de datos puede mostrar una **tendencia creciente o decreciente**.

El operador puede comparar los parámetros del turno actual con valores de turnos anteriores, condiciones normales de operación y límites establecidos. Esta comparación permite reconocer cambios progresivos en la carga, alimentación, presión, temperatura, densidad u otras variables.

La información histórica también ayuda a evaluar si una acción correctiva produjo el resultado esperado. Por ejemplo, después de ajustar una condición de alimentación, los registros pueden mostrar si disminuyó la corriente del equipo y si la granulometría volvió al rango establecido.

Comunicación entre turnos

La bitácora debe facilitar la **continuidad operacional**. Al finalizar el turno, el operador debe dejar claramente identificados los equipos que operan normalmente, las condiciones que requieren seguimiento, las fallas pendientes, los trabajos realizados y cualquier situación que pueda afectar al siguiente turno.

La comunicación debe diferenciar entre una condición ya solucionada y una condición que permanece activa. También debe indicarse cuando existe una restricción operacional o una instrucción especial.

Una buena entrega de turno evita que el operador siguiente tenga que reconstruir la situación a partir de información incompleta y reduce el riesgo de repetir errores o ignorar problemas previamente detectados.

Principales errores en los registros

Entre los errores frecuentes se encuentran registrar datos sin verificar, utilizar unidades incorrectas, omitir la hora, dejar espacios sin completar, registrar únicamente las condiciones normales y no documentar desviaciones, copiar valores anteriores o describir los problemas de forma demasiado general.

Otro error importante es registrar solamente la falla sin indicar **qué ocurrió después**. Si se realizó una acción operacional autorizada, debe quedar constancia de ella y de su resultado cuando corresponda.

La bitácora tampoco debe utilizarse para sustituir los procedimientos de reporte de incidentes, fallas críticas o emergencias. Cuando una situación requiere un reporte específico, este debe realizarse adicionalmente conforme al sistema de la organización.

Criterio práctico del operador

El operador competente debe comprender que la bitácora no es simplemente un requisito administrativo. Es una **herramienta de control operacional, comunicación y seguimiento**. Un buen registro permite saber qué ocurrió, cuándo ocurrió, bajo qué condiciones y qué acciones fueron realizadas.

Por ello, durante cada turno debe desarrollar el hábito de **observar, medir, registrar, comparar y comunicar**. Los datos deben reflejar fielmente la operación y servir para anticipar desviaciones, apoyar el mantenimiento y mantener la continuidad segura del proceso.

5.6. Reportes de producción, incidencias y consumo de insumos

Los **reportes de producción, incidencias y consumo de insumos** permiten transformar la información obtenida durante el turno en datos útiles para la supervisión, planificación y control del proceso. En las áreas de chancado y molienda, estos registros ayudan a conocer cuánto mineral fue procesado, qué problemas afectaron la operación, cuánto tiempo estuvieron disponibles los equipos y qué recursos fueron utilizados.

El operador participa principalmente en la **recopilación, verificación y comunicación de información operacional**, de acuerdo con los formatos y procedimientos establecidos por la planta.

Reporte de producción

El reporte de producción debe reflejar el comportamiento real del proceso durante el período correspondiente. Dependiendo de la operación, puede incluir **toneladas alimentadas, toneladas procesadas, horas de operación, horas de parada, granulometría del producto y principales condiciones del circuito**.

Es importante diferenciar entre producción instantánea y producción acumulada. Una balanza puede indicar, por ejemplo, una alimentación de toneladas por hora, mientras que el total procesado durante el turno corresponde a las toneladas acumuladas durante determinado período.

Los datos deben relacionarse con los equipos y etapas correspondientes. Una diferencia importante entre la alimentación registrada en chancado y la alimentación hacia molienda puede requerir una revisión de las mediciones, inventarios intermedios, acumulación de mineral o condiciones de operación.

El operador debe evitar modificar los datos para que coincidan con una meta de producción. **El reporte debe representar la realidad operacional**, incluso cuando el resultado sea inferior al objetivo establecido.

Registro de incidencias

Una incidencia es cualquier evento que afecte o pueda afectar la **seguridad, continuidad, calidad o rendimiento del proceso**. Puede incluir atascos, derrames, fallas de equipos, alarmas repetitivas, pérdida de instrumentos, interrupciones de alimentación, problemas de clasificación o condiciones anormales detectadas durante la operación.

El reporte debe describir el evento de forma objetiva. Es recomendable indicar **qué ocurrió, en qué equipo, a qué hora, cuánto tiempo afectó la operación, cuál fue la condición observada y qué acción se realizó**.

Por ejemplo, no es suficiente registrar “parada de faja”. Una descripción más útil sería: “Faja detenida por activación del sistema de emergencia; se verificó la zona, se identificó acumulación de mineral en el sector de transferencia y se comunicó la condición para inspección”.

Cuando se desconoce la causa definitiva, no se debe presentar una suposición como diagnóstico confirmado. El operador puede registrar la condición observada y señalar que la causa se encuentra pendiente de evaluación por el personal correspondiente.

Tiempos de parada y disponibilidad

Los reportes también deben permitir diferenciar entre **tiempo de operación y tiempo de parada**. Una parada puede ser programada, operacional, por mantenimiento, por falta de alimentación o causada por una falla.

Registrar correctamente estos tiempos ayuda a determinar dónde se producen las principales pérdidas de disponibilidad. Una serie de pequeñas detenciones puede representar una pérdida significativa aunque ninguna individualmente haya sido prolongada.

El operador debe registrar los horarios de inicio y finalización de las detenciones cuando el sistema o procedimiento lo requiera. Esta información puede utilizarse posteriormente para analizar la confiabilidad de los equipos y establecer acciones de mejora.

Consumo de insumos

En chancado y molienda se utilizan diferentes insumos y recursos, dependiendo del proceso. Entre ellos pueden encontrarse **agua de proceso, lubricantes, grasas, medios de molienda y otros materiales auxiliares**. En circuitos posteriores pueden existir además reactivos, pero su control debe realizarse según los procedimientos específicos de cada planta.

El registro debe indicar, cuando corresponda, la cantidad utilizada, unidad de medida, período y equipo o área asociada. El operador debe distinguir entre **consumo real, reposición y existencia disponible**.

Por ejemplo, agregar lubricante a un sistema no significa necesariamente que todo el volumen constituya consumo del proceso; puede tratarse de una reposición relacionada con

mantenimiento. Esta diferencia es importante para evitar errores en los balances de materiales e insumos.

Control del agua de proceso

El agua tiene una influencia directa sobre la molienda y clasificación. Una variación en su suministro puede modificar la **densidad de pulpa, viscosidad, transporte de sólidos y comportamiento de los hidrociclones**.

Por ello, cuando corresponda, deben registrarse los flujos o consumos de agua relevantes. Una disminución de agua puede aumentar la densidad de pulpa, mientras que un exceso puede diluirla y modificar las condiciones de clasificación.

El operador debe relacionar el consumo con las condiciones del proceso y comunicar desviaciones significativas, especialmente cuando puedan afectar la estabilidad de la molienda o la calidad del producto.

Consumo de medios de molienda y lubricantes

En molinos de bolas o barras, los medios de molienda presentan desgaste progresivo y requieren reposición según el programa establecido. El registro de las adiciones permite controlar el consumo y relacionarlo con la cantidad de mineral procesado.

Los lubricantes y grasas también deben controlarse. Un consumo superior al habitual puede ser una señal de fugas, problemas de lubricación o condiciones anormales. Sin embargo, el operador debe evitar sacar conclusiones definitivas sin la evaluación correspondiente.

La comparación entre **consumo de insumo y toneladas procesadas** puede proporcionar indicadores útiles para evaluar la eficiencia operacional.

Verificación antes de informar

Antes de entregar un reporte, el operador debe comprobar que los datos sean coherentes con la bitácora, instrumentos y sistemas de control disponibles. Las diferencias importantes deben investigarse o comunicarse, no corregirse arbitrariamente.

Los reportes de producción e incidencias deben mantener una **trazabilidad básica**, permitiendo relacionar los datos con el turno, período, equipo y condición operacional correspondiente.

Criterio práctico del operador

Un operador competente debe ser capaz de recopilar información de producción, registrar incidencias de manera objetiva, controlar los consumos de insumos bajo su responsabilidad y comunicar desviaciones relevantes. Debe distinguir entre **dato observado, acción realizada y diagnóstico técnico**, evitando confundirlos.

El principio fundamental es que un reporte debe ser **exacto, claro, oportuno y verificable**. La calidad de estos registros permite a supervisión y mantenimiento analizar pérdidas,

controlar costos, planificar recursos y mejorar el desempeño del circuito de chancado y molienda.

5.7. Indicadores básicos de operación y desempeño del proceso

Los **indicadores de operación y desempeño** permiten evaluar si los circuitos de chancado y molienda funcionan de manera estable, segura y eficiente. Para el operador, estos indicadores sirven principalmente para comparar la condición actual con los valores normales o establecidos, detectar desviaciones y comunicar oportunamente problemas que puedan afectar la producción.

Un indicador no debe analizarse de manera aislada. Una producción elevada, por ejemplo, no significa necesariamente una buena operación si se obtiene con sobrecarga, mala granulometría, alto consumo de energía o frecuentes detenciones.

Producción y tasa de alimentación

Uno de los indicadores fundamentales es la cantidad de mineral procesado, expresada normalmente en **toneladas por hora (t/h)** o toneladas acumuladas durante un período.

La tasa de alimentación permite conocer la carga que recibe un equipo o circuito. Una alimentación demasiado baja puede reducir la capacidad productiva, mientras que una alimentación excesiva puede provocar sobrecarga, aumento de corriente, problemas de clasificación y deterioro del producto.

El operador debe comparar la alimentación real con el rango operativo establecido y observar su estabilidad. Una alimentación fluctuante puede ser más problemática que una alimentación ligeramente inferior pero constante.

También debe distinguirse entre **capacidad nominal y capacidad real de operación**. Que un equipo tenga una capacidad determinada por diseño no significa que deba operar permanentemente en ese valor. Las características del mineral, humedad, granulometría, dureza y configuración del circuito pueden modificar la capacidad efectiva.

Granulometría del producto

La **granulometría** es uno de los principales indicadores del desempeño de chancado y molienda. Permite verificar si el material obtenido cumple con las características requeridas para la siguiente etapa del proceso.

En chancado, una granulometría demasiado gruesa puede indicar problemas de alimentación, desgaste de componentes, regulación incorrecta de la abertura o deficiencias en la clasificación. En molienda, un producto demasiado grueso puede indicar insuficiente reducción de tamaño, problemas de carga, velocidad, agua o clasificación.

El operador debe considerar la granulometría junto con las condiciones del circuito. Un cambio en el tamaño del producto puede ser una señal temprana de una desviación operacional.

Carga y consumo de los equipos

La **corriente eléctrica, potencia o carga del motor** proporciona información sobre el esfuerzo al que está sometido un equipo. En términos generales, un aumento de carga puede estar relacionado con mayor alimentación, material más resistente, acumulación o una condición mecánica anormal.

El operador debe conocer los rangos normales establecidos para cada equipo y prestar atención a cambios persistentes. Una corriente elevada acompañada de vibración o ruido anormal requiere una evaluación diferente a un aumento temporal causado por una variación conocida de alimentación.

No debe utilizarse la corriente por sí sola para diagnosticar una falla. Es necesario relacionarla con alimentación, descarga, vibración, temperatura y demás variables disponibles.

Disponibilidad y tiempo de operación

La **disponibilidad operacional** representa, de manera general, cuánto tiempo un equipo estuvo disponible para cumplir su función respecto del período considerado. Las detenciones por fallas, mantenimiento, falta de alimentación u otras causas reducen el tiempo efectivo de operación.

Para el operador es importante registrar correctamente las horas de funcionamiento y las paradas, diferenciando cuando corresponda entre **paradas programadas y no programadas**.

La repetición de pequeñas detenciones también debe considerarse. Un equipo que se detiene frecuentemente durante pocos minutos puede generar una pérdida acumulada significativa y afectar la estabilidad de todo el circuito.

Consumo específico de energía

En procesos de reducción de tamaño, el consumo de energía puede expresarse como energía utilizada por cantidad de mineral procesado, por ejemplo **kWh/t**. Este indicador permite relacionar el consumo eléctrico con la producción.

Un aumento del consumo específico puede estar asociado a cambios en las características del mineral, menor eficiencia del circuito, problemas mecánicos, condiciones inadecuadas de operación o reducción de la tasa de alimentación.

Sin embargo, el operador debe interpretar este indicador considerando las condiciones reales del mineral. No siempre un aumento significa una falla del equipo, ya que minerales más duros pueden requerir mayor energía para alcanzar el mismo tamaño de producto.

Consumo de agua y densidad de pulpa

En molienda húmeda, el consumo y flujo de **agua de proceso** influyen directamente sobre la densidad de pulpa y el comportamiento de la clasificación.

Una densidad demasiado elevada puede dificultar el transporte de la pulpa y afectar la clasificación, mientras que una pulpa excesivamente diluida puede modificar el funcionamiento de los hidrociclones y las características del producto.

Por ello, el operador debe observar conjuntamente **flujo de agua, densidad, presión de clasificación y granulometría** cuando estos parámetros estén disponibles.

Estabilidad del proceso

Además de los valores individuales, un indicador importante es la **estabilidad operacional**. Un circuito que mantiene alimentación, carga, presión, flujo y granulometría dentro de rangos relativamente constantes normalmente resulta más controlable que uno con fluctuaciones continuas.

Las variaciones repetitivas pueden indicar problemas de alimentación, regulación, instrumentación, clasificación o coordinación entre equipos.

El operador debe prestar atención especialmente a las tendencias y no únicamente al valor instantáneo. Una variable que permanece dentro del límite pero muestra una tendencia continua hacia él puede requerir atención antes de alcanzar una condición crítica.

Interpretación conjunta de indicadores

Los indicadores adquieren mayor utilidad cuando se analizan en conjunto. Por ejemplo, **aumento de alimentación + aumento de corriente + aumento de presión + producto más grueso** puede indicar que el circuito está acercándose a una condición de sobrecarga.

En cambio, una reducción de alimentación acompañada de disminución de corriente y producción puede tener una causa diferente y requerir revisión del suministro de mineral.

El operador debe evitar interpretar automáticamente cada desviación como una falla. Su función es **detectar relaciones, reconocer condiciones fuera de lo normal y comunicar información suficiente para la toma de decisiones**.

Criterio práctico del operador

Los indicadores básicos permiten responder preguntas fundamentales: **¿cuánto estamos procesando?, ¿cómo está funcionando el equipo?, ¿el producto cumple la condición requerida?, ¿el proceso está estable?, ¿existen pérdidas o desviaciones?, ¿el consumo es razonable?**

Un operador competente debe conocer los principales indicadores de su circuito, comprender qué representa cada uno, reconocer sus rangos normales y relacionarlos con las demás variables del proceso.

El objetivo no es memorizar números, sino desarrollar criterio operacional: **medir, comparar, identificar desviaciones, analizar tendencias y comunicar oportunamente**. De esta manera, los indicadores se convierten en una herramienta práctica para mantener la seguridad, continuidad y eficiencia del proceso de chancado y molienda.

Este curso ha sido desarrollado por **INFOSET** con el objetivo de proporcionar a trabajadores, operadores, técnicos y profesionales las **competencias fundamentales para la operación segura y eficiente de equipos de chancado y molienda**, necesarias para desenvolverse adecuadamente en plantas y circuitos de procesamiento de minerales en el Perú.

Creemos firmemente que una **operación segura, ordenada y técnicamente correcta** es fundamental para proteger a las personas, conservar los equipos y mantener la continuidad del proceso. El desempeño de una planta no depende únicamente de la capacidad de sus equipos, sino también de operadores que comprendan su funcionamiento, reconozcan condiciones anormales y actúen de acuerdo con los procedimientos establecidos.

Este curso busca **acercar los conocimientos técnicos de chancado y molienda a la realidad cotidiana del operador**. A través de un lenguaje claro y práctico, se abordan conceptos relacionados con la reducción de tamaño, funcionamiento de chancadoras y molinos, clasificación, variables operativas, instrumentación, automatización, control del proceso, inspección, mantenimiento operativo básico, seguridad y gestión de información operacional.

Es fundamental que los participantes **comprendan y apliquen lo aprendido durante sus actividades diarias**, desarrollando la capacidad de observar el comportamiento de los equipos, controlar las principales variables del proceso, identificar desviaciones y comunicar oportunamente fallas o condiciones inseguras. Una operación eficiente requiere no solo conocer los equipos, sino también comprender la relación entre alimentación, carga, granulometría, agua, clasificación y desempeño del circuito.

El curso también enfatiza la importancia de la **seguridad operacional**, incluyendo la identificación de peligros, control de energías peligrosas mediante LOTO, inspección de equipos, limpieza, prevención de accidentes y actuación frente a condiciones anormales. El operador debe conocer los límites de sus funciones y reconocer cuándo una condición requiere la intervención de personal autorizado.

La difusión de este contenido está **permitida siempre que se mantenga el reconocimiento a INFOSET** como entidad autora. Compartir este conocimiento forma parte de nuestra misión: **democratizar el acceso a la capacitación profesional y contribuir al desarrollo de trabajadores y organizaciones del sector minero**.

Agradecemos a cada participante por su interés, tiempo y compromiso con su desarrollo profesional. Con cada operador que fortalece sus conocimientos y aprende a trabajar de manera más **segura, responsable y técnicamente fundamentada**, las operaciones mineras avanzan hacia procesos más eficientes, confiables y sostenibles.

Administración de INFOSET