

APUNTES DEL MÓDULO 1

Seguridad Industrial y Fundamentos Operacionales



Mantenimiento Industrial de Plantas de Chancado, Correas y Equipos de Proceso

Material de estudio

Módulo 1

Contenido del módulo

- 1 **El desafío operacional: seguridad como cimiento del mantenimiento**
- 2 **Riesgos críticos en plantas de chancado y procesamiento**
- 3 **Procedimiento LOTO: bloqueo y etiquetado de energías peligrosas**
- 4 **Funcionamiento general de equipos de chancado y trituración**
- 5 **Sistemas de transporte: correas transportadoras y componentes críticos**
- 6 **Equipos de clasificación y bombeo: harneros, bombas y ciclones**

La seguridad industrial y el conocimiento operacional de los equipos de chancado y transporte de mineral son la base sobre la cual se construye toda estrategia de mantenimiento efectiva en la industria minera. Este módulo te preparará para reconocer los riesgos críticos presentes en plantas de procesamiento de mineral, aplicar procedimientos de bloqueo y etiquetado de energías peligrosas, y comprender el funcionamiento general de los equipos que mantendrás a lo largo de tu carrera. No se trata de conocimientos separados: la seguridad y la operación están entrelazadas, porque no puedes mantener de forma segura aquello que no comprendes, ni comprender sin respetar los procedimientos que protegen tu vida y la de tus compañeros.

1

El desafío operacional: seguridad como cimiento del mantenimiento

Roberto Figueroa, supervisor de mantenimiento en Minería Andina del Pacífico, enfrenta un problema que se repite en plantas de todo el mundo: en las últimas 8 semanas, su planta de chancado sufrió 6 paradas no programadas que costaron 47 horas de producción. La gerencia exige mejoras, pero Roberto comprende que antes de diagnosticar fallas o planificar mantenimiento preventivo, su equipo debe dominar dos fundamentos inseparables: **los procedimientos de seguridad industrial y el conocimiento del funcionamiento de los equipos**.

La planta procesa 800 toneladas diarias de mineral de cobre y molibdeno en operación continua 24/7. Los equipos principales incluyen chancadores primarios y secundarios, correas transportadoras, harneros vibratorios, bombas Warman e hidrociclones. Cada parada imprevista genera costos de mantenimiento reactivo, afecta la moral del equipo y, lo más crítico, **incrementa el riesgo de accidentes cuando se trabaja bajo presión** para restablecer la producción rápidamente.

En plantas de chancado, los riesgos son múltiples y constantes: **atrapamiento** en equipos en movimiento (correas, poleas, chancadores), **caídas** desde plataformas de inspección, **golpes** por proyección de material, **contacto eléctrico** durante intervenciones sin bloqueo adecuado, y **exposición a ruido y polvo** en zonas de trituración.

El segundo pilar es comprender cómo funciona el sistema completo: cómo fluye el mineral desde la tolva de alimentación hasta la descarga, qué componentes críticos intervienen en cada etapa, cuáles son los puntos de riesgo mecánico y operacional, y qué señales indican operación normal versus síntomas de falla. **No se trata de convertirse en operador, sino de entender el contexto en que trabajas**, para que cada intervención de mantenimiento sea informada, planificada y segura.

Ejemplo del ámbito laboral: Un mecánico experimentado en otra industria ingresó a trabajar en mantenimiento de chancadores sin conocer el flujo del proceso. Durante una inspección rutinaria, abrió una compuerta de descarga sin verificar si había material acumulado aguas arriba. El mineral represado se liberó súbitamente, causando una lesión grave. El conocimiento del proceso habría evitado ese error.



Planta de chancado primario con sistemas de transporte por correa. Observa los puntos críticos de riesgo: chancador, poleas y áreas de inspección donde se aplican procedimientos LOTO.

✓ Puntos clave

- La seguridad industrial no es un trámite burocrático, es la condición que permite trabajar de forma sostenible y volver a casa cada día.
- No puedes mantener de forma segura lo que no comprendes, ni comprender sin respetar los procedimientos que protegen tu vida.
- El conocimiento del flujo del proceso y los puntos críticos de cada equipo es esencial para planificar intervenciones sin exponerse a riesgos innecesarios.
- Las paradas no programadas aumentan el riesgo de accidentes porque el trabajo bajo presión favorece atajos y omisión de procedimientos.

 Para reflexionar

- ¿Qué riesgos específicos de tu planta podrían aumentar si el equipo de mantenimiento trabaja bajo presión por una parada no programada?
- ¿Cómo explicarías a un nuevo integrante del equipo por qué debe conocer el funcionamiento de los equipos antes de intervenir en ellos?
- ¿Has presenciado alguna situación donde la falta de conocimiento del proceso generó un incidente o cuasi-accidente?

2 Riesgos críticos en plantas de chancado y procesamiento

En el entorno de una planta de chancado convergen múltiples fuentes de riesgo que deben ser reconocidas, evaluadas y controladas antes de cada intervención. Los riesgos críticos en estas instalaciones se clasifican en cinco categorías principales:

Tipo de riesgo	Fuente del peligro	Consecuencia potencial
Atrapamiento	Correas en movimiento, poleas, chancadores operando, rodillos de retorno	Lesiones graves, amputaciones, fatalidad
Caída de altura	Plataformas de inspección, escaleras de acceso, pasarelas sobre correas	Fracturas, traumatismos, fatalidad
Golpe por objetos	Proyección de mineral, desprendimiento de piezas desgastadas, caída de material acumulado	Contusiones, heridas, traumatismo craneal
Contacto eléctrico	Motores, tableros, cableado sin bloqueo adecuado, trabajo en equipos energizados	Quemaduras, paro cardíaco, fatalidad
Exposición a agentes	Ruido de trituración, polvo de mineral, vibraciones, químicos en pulpas	Hipoacusia, enfermedades respiratorias, fatiga crónica

Riesgos específicos por tipo de equipo:

- **Chancadores primarios y secundarios:** Atrapamiento en cámara de trituración durante limpieza de atascos, proyección de rocas al abrir compuertas de inspección, ruido superior a 95 dB en zona de operación, vibraciones que pueden aflojar pernos y causar desprendimientos.
- **Correas transportadoras:** Atrapamiento en puntos de pellizco (correa-polea, correa-rodillo), caída desde pasarelas de inspección lateral, contacto con rodillos en movimiento durante limpieza, arranque inesperado si no se aplica bloqueo LOTO.
- **Harneros y clasificadores:** Exposición a vibraciones intensas durante inspección de mallas, caída de material acumulado al abrir compuertas, contacto con superficies calientes en motores vibradores.
- **Bombas Warman e hidrociclones:** Proyección de pulpa a presión durante desconexión de tuberías, contacto con bordes cortantes en impulsores desgastados, exposición a químicos en pulpas con reactivos de flotación.

La jerarquía de controles en mantenimiento: No todos los controles de riesgo son igual de efectivos. Roberto enseña a su equipo a aplicar la jerarquía de controles, ordenada de mayor a menor efectividad:

1. **Eliminación:** Rediseñar el proceso para eliminar el peligro (ejemplo: automatizar limpieza de correas para eliminar exposición humana).
2. **Sustitución:** Reemplazar por alternativa menos peligrosa (ejemplo: usar herramientas extensibles en lugar de acceso directo a zonas de riesgo).
3. **Controles de ingeniería:** Instalar barreras físicas como guardas, enclavamientos, sensores de proximidad que detengan equipos ante presencia humana.

4. **Controles administrativos:** Procedimientos escritos, permisos de trabajo, capacitación, señalización, rotación de personal.
5. **EPP (Equipos de Protección Personal):** Casco, guantes, protección auditiva, arnés, protección respiratoria.

Ejemplo del ámbito laboral: En una planta de procesamiento, un trabajador sufrió atrapamiento al intentar retirar material acumulado en una correa en movimiento, confiando solo en su EPP (guantes). Si se hubiera aplicado la jerarquía correctamente, el control de ingeniería (detener y bloquear la correa) habría eliminado el riesgo en su fuente. **El EPP es el último recurso, no el primero.**

✓ Puntos clave

- Los cinco riesgos críticos en plantas de chancado son: atrapamiento, caída de altura, golpe por objetos, contacto eléctrico y exposición a agentes.
- Cada tipo de equipo presenta peligros específicos que deben ser reconocidos antes de planificar cualquier intervención de mantenimiento.
- La jerarquía de controles prioriza eliminar o sustituir el peligro antes que proteger al trabajador con EPP.
- El EPP es el último recurso, no el primero: antes de confiar solo en equipos de protección personal, pregúntate si el trabajo puede hacerse de forma más segura cambiando el método o usando controles de ingeniería.

Para reflexionar

- ¿Cuál de los cinco riesgos críticos consideras más frecuente en tu área de trabajo y por qué?
- ¿Puedes identificar un ejemplo en tu planta donde se esté aplicando un control de ingeniería efectivo para reducir riesgos?
- ¿Has participado en alguna situación donde se confió solo en el EPP sin considerar controles de mayor jerarquía? ¿Qué se podría haber hecho diferente?

3

Procedimiento LOTO: bloqueo y etiquetado de energías peligrosas

LOTO (Lockout/Tagout, o Bloqueo y Etiquetado) es el procedimiento que garantiza que un equipo no pueda arrancar inesperadamente mientras se realiza mantenimiento. En Minería Andina, Roberto exige que LOTO se aplique en el 100% de las intervenciones en equipos con fuentes de energía peligrosa: eléctrica, mecánica, hidráulica, neumática, térmica o gravitacional.

El objetivo de LOTO es simple pero crítico: **aislar todas las fuentes de energía y asegurar que nadie pueda reactivarlas hasta que el trabajo esté completo y el personal esté fuera de la zona de riesgo.** Los accidentes más graves en mantenimiento industrial ocurren por arranques inesperados de equipos que el trabajador creía apagados.

Los 6 pasos del procedimiento LOTO:

1. **Preparación:** Identificar todas las fuentes de energía del equipo (eléctrica, mecánica residual, presión hidráulica, aire comprimido, gravedad) y los dispositivos de aislamiento (interruptores, válvulas, desconectores). Revisar los diagramas eléctricos e hidráulicos del equipo.
2. **Notificación:** Informar a operadores y personal afectado que se realizará mantenimiento y que el equipo será bloqueado. Coordinar con sala de control para evitar intentos de arranque remoto.
3. **Apagado:** Detener el equipo usando el procedimiento normal de parada (no apagado de emergencia, salvo necesidad). Esto evita daños en componentes y deja el sistema en estado seguro para aislamiento.
4. **Aislamiento:** Desconectar todas las fuentes de energía usando los dispositivos de aislamiento. Abrir interruptores, cerrar válvulas, desconectar líneas de aire comprimido, desenergizar circuitos de control.
5. **Bloqueo y etiquetado:** Colocar candados personales en cada dispositivo de aislamiento (un candado por cada trabajador que intervendrá el equipo). Instalar etiquetas con nombre del trabajador, fecha, motivo del bloqueo y advertencia de no operar. **La etiqueta informa, el candado protege.**
6. **Verificación:** Intentar arrancar el equipo desde el panel de control para confirmar que está efectivamente aislado. Liberar energía residual: descargar condensadores eléctricos, purgar líneas de presión, bloquear partes móviles con cuñas mecánicas, drenar tanques elevados.

Reglas de oro del bloqueo:

- **Un candado por persona:** Cada trabajador coloca su propio candado. Solo él puede retirarlo al terminar su tarea.
- **Candado personal e intransferible:** Nadie más tiene copia de tu llave. Si pierdes la llave, se corta el candado con autorización de seguridad y supervisión.
- **Etiqueta siempre visible:** La etiqueta informa a otros el motivo del bloqueo y a quién contactar. Nunca retires una etiqueta ajena.
- **Verificación obligatoria:** Antes de tocar el equipo, verifica que el bloqueo es efectivo intentando arrancar desde el control y midiendo ausencia de voltaje con instrumentos calibrados.

- **Retiro solo por quien bloqueó:** Solo el trabajador que colocó el candado puede retirarlo, una vez completada su tarea y confirmado que está fuera de la zona de riesgo.

Energías residuales: el peligro invisible. Bloquear la fuente de energía principal no es suficiente. Muchos equipos almacenan energía que puede liberarse después del aislamiento: condensadores que retienen carga eléctrica, cilindros hidráulicos que mantienen presión, resortes comprimidos, volantes de inercia que siguen girando, material acumulado que puede caer por gravedad. **La verificación incluye identificar y liberar todas estas energías residuales antes de iniciar el trabajo.**

Ejemplo del ámbito laboral: Un electricista bloqueó el interruptor principal de un motor de correa transportadora, pero no descargó los condensadores del variador de frecuencia. Al abrir el tablero para realizar mediciones, recibió una descarga de 400V que estuvo almacenada en los condensadores. El protocolo correcto incluye cortocircuitar los condensadores con una pértiga aislada después del bloqueo, para descargar energía residual de forma segura.



Aplicación correcta del procedimiento LOTO: múltiples candados personales en dispositivo de aislamiento, cada uno con su etiqueta identificatoria. Solo quien colocó el candado puede retirarlo.

✓ Puntos clave

- LOTO es el procedimiento que protege de arranques inesperados durante mantenimiento, y debe aplicarse en el 100% de las intervenciones con fuentes de energía peligrosa.
- Los 6 pasos son: preparación, notificación, apagado, aislamiento, bloqueo y etiquetado, verificación.
- Cada trabajador coloca su propio candado personal e intransferible, y solo él puede retirarlo al terminar su tarea.
- Las energías residuales (presión, carga eléctrica, inercia, gravedad) deben ser identificadas y liberadas durante la fase de verificación antes de tocar el equipo.

Para reflexionar

- ¿Qué energías residuales podrían estar presentes en los equipos que mantienes habitualmente en tu planta?
- ¿Has presenciado alguna situación donde no se aplicó LOTO correctamente? ¿Qué consecuencias tuvo o pudo haber tenido?
- ¿Cómo explicarías a un compañero nuevo por qué no puede retirar un candado ajeno, incluso si ese trabajador ya terminó su turno?

4 Funcionamiento general de equipos de chancado y trituración

Los **chancadores** son equipos diseñados para reducir el tamaño del mineral mediante aplicación de fuerza mecánica. En plantas de procesamiento de mineral, el chancado es la primera etapa de conminución y se divide típicamente en tres niveles: primario, secundario y terciario, según el tamaño de alimentación y producto final.

Chancador primario: Recibe mineral de gran tamaño (hasta 1 metro de diámetro) directamente desde camiones o trenes. Los tipos más comunes son chancadores de mandíbulas y giratorios. El **chancador de mandíbulas** utiliza dos placas de acero (una fija y una móvil) que comprimen el mineral en ciclos repetitivos. El **chancador giratorio** tiene un cono central que gira excéntricamente dentro de una carcasa, triturando el mineral continuamente. El producto típico del chancado primario es mineral de 15 a 30 cm.

Chancador secundario: Recibe el producto del primario y lo reduce a tamaños entre 3 y 10 cm. Los tipos comunes son chancadores de cono y de impacto. El **chancador de cono** funciona similar al giratorio pero con geometría optimizada para tamaños menores y mayor velocidad. El chancador de impacto utiliza martillos o barras que golpean el mineral a alta velocidad, causando fractura por impacto en lugar de compresión.

Componentes críticos de un chancador:

- **Cámara de trituración:** Zona donde ocurre la reducción de tamaño. Es el punto de mayor riesgo de atrapamiento y debe inspeccionarse solo con equipo bloqueado.
- **Revestimientos (liners):** Placas de acero al manganeso o hierro fundido blanco que protegen la estructura del chancador del desgaste. Se reemplazan periódicamente según programa de mantenimiento.
- **Eje principal y excéntrica:** Transmiten el movimiento de trituración. Las fallas en rodamientos de estos componentes generan vibraciones anormales y ruido característico.
- **Sistema de lubricación:** Crítico para vida útil de rodamientos. Debe monitorearse presión, temperatura y nivel de aceite constantemente.
- **Ajuste de descarga (setting):** Determina el tamaño del producto final. Se ajusta según requerimientos del proceso y desgaste de revestimientos.

Señales de operación normal versus síntomas de falla:

Parámetro	Operación normal	Síntoma de falla
Ruido	Constante, característico de trituración	Golpes metálicos, chirridos, cambios súbitos de intensidad
Vibración	Constante, dentro de rangos especificados	Aumento progresivo, vibración errática, frecuencias anormales
Temperatura rodamientos	60-80°C, estable	Aumento progresivo sobre 90°C, puntos calientes localizados

Parámetro	Operación normal	Síntoma de falla
Presión de lubricación	Según especificación del fabricante	Caída de presión, fluctuaciones, fugas visibles
Consumo de corriente	Estable, dentro del rango de diseño	Picos frecuentes, consumo por debajo de lo normal (alimentación insuficiente) o por encima (sobrecarga, atasco)

Ejemplo del ámbito laboral: En una planta de procesamiento, el equipo de mantenimiento detectó aumento progresivo de temperatura en rodamiento inferior de chancador de cono, pasando de 72°C a 88°C en dos semanas. Al inspeccionar durante parada programada, encontraron contaminación del aceite con partículas metálicas por falla incipiente de sello. El reemplazo preventivo evitó una falla catastrófica que habría costado tres días de producción y daño severo al eje principal.

✓ Puntos clave

- El chancado se divide en primario (reducción de 1m a 15-30cm), secundario (reducción a 3-10cm) y terciario según tamaño de producto final.
- Los componentes críticos son: cámara de trituración, revestimientos, eje principal, sistema de lubricación y ajuste de descarga.
- Las señales de operación normal incluyen ruido constante, vibración dentro de rangos, temperatura de rodamientos 60-80°C y presión de lubricación estable.
- Los síntomas de falla incluyen cambios en ruido, aumento de vibración, temperatura de rodamientos sobre 90°C y fluctuaciones en presión de lubricación o consumo de corriente.

Para reflexionar

- ¿Qué parámetros de operación monitoreas regularmente en los chancadores de tu planta?
- ¿Podrías identificar a partir de qué valor de temperatura de rodamientos se debería generar una alerta de mantenimiento en tus equipos?
- ¿Qué consecuencias operacionales y de seguridad tendría una falla catastrófica de rodamiento en el eje principal de un chancador primario?

Sistemas de transporte: correas transportadoras y componentes críticos

Las **correas transportadoras** son el sistema de transporte más utilizado en plantas de chancado y procesamiento de mineral. Mueven material desde tolvas de alimentación, entre etapas de chancado, y hacia pilas de acopio o siguiente proceso. Una planta típica puede tener docenas de correas operando continuamente.

Componentes principales de una correa transportadora:

- **Banda transportadora:** Elemento flexible de caucho reforzado con lonas de tela o cables de acero. El grosor y tipo de refuerzo depende del peso del material, distancia de transporte y ángulo de inclinación. Las bandas se dañan por desgarre, corte, descentralización y envejecimiento del caucho.
- **Poleas:** Motrices (conectadas al motor, transmiten movimiento a la banda) y de retorno o cola (guían la banda en su recorrido). Los puntos de contacto banda-polea son zonas críticas de riesgo de atrapamiento.
- **Rodillos:** Soportan la banda a lo largo de su recorrido. Los rodillos superiores (de carga) tienen configuración en artesa (tres rodillos formando una V) para centrar material. Los rodillos inferiores (de retorno) son rectos. Las fallas de rodillos generan descentralización de banda, acumulación de material y desgaste acelerado.
- **Sistema motriz:** Motor eléctrico, reductor de velocidad, acoplamiento y freno. Dimensionado según longitud de correa, capacidad de transporte y diferencia de altura.
- **Sistema de limpieza:** Raspadores primarios (en polea motriz) y secundarios que remueven material adherido a la banda, evitando acumulación y derrame.
- **Sistema de tensado:** Mantiene tensión adecuada de la banda para transmitir potencia y evitar deslizamiento. Puede ser por gravedad (contrapeso) o tornillo tensor.
- **Estructura de soporte:** Marcos metálicos que sostienen rodillos y banda. Incluye pasarelas de inspección y mantenimiento.

Puntos críticos de riesgo en correas: Los **puntos de pellizco** (banda-polea, banda-rodillo) son las zonas de mayor peligro de atrapamiento. El **arranque inesperado** es el riesgo fatal: una correa que arranca mientras un trabajador limpia rodillos o ajusta raspadores puede causar atrapamiento con consecuencias fatales. Por esto, **toda intervención en correa requiere LOTO sin excepción**, incluso tareas aparentemente menores como limpieza de derrames.

Fallas comunes en correas y su diagnóstico:

- **Descentralización de banda:** La banda se desplaza lateralmente, rozando estructura. Causas: rodillos desalineados, acumulación de material en rodillos, banda mal empalmada, carga descentrada. Consecuencia: desgarre de banda, derrame de material, daño a estructura.
- **Deslizamiento en polea motriz:** La banda patina sobre la polea sin avanzar. Causas: baja tensión, polea contaminada con aceite, desgaste del recubrimiento de la polea. Consecuencia: bajo rendimiento, calentamiento de banda, pérdida de producción.

- **Falla de rodillos:** Rodillos trancados que no giran. Causas: falla de rodamientos, acumulación de material que bloquea giro. Consecuencia: desgaste localizado de banda, generación de puntos calientes que pueden causar incendio en bandas con superficie de caucho.
- **Rotura de banda:** Desgarro transversal o longitudinal. Causas: impacto de material de gran tamaño, objeto cortante atrapado, desgaste extremo, empalme defectuoso. Consecuencia: parada prolongada, pérdida de producción, riesgo de lesiones si ocurre durante operación.

Ejemplo del ámbito laboral: En una planta de chancado, un operador reportó que la correa CV-102 tenía derrame de material en el sector sur. Un ayudante de mantenimiento subió a la pasarela de inspección, identificó acumulación en un rodillo y decidió limpiarlo con una espátula **sin aplicar LOTO, confiando en que podía hacerlo rápido**. Al acercar la espátula, esta fue atrapada por el rodillo en movimiento, arrastrando su mano. El trabajador sufrió fractura de muñeca y contusiones graves. La investigación determinó que la causa raíz fue omisión del procedimiento LOTO por percepción de tarea menor y rápida.

✓ Puntos clave

- Las correas transportadoras son el sistema de transporte más utilizado en plantas de procesamiento, con componentes críticos: banda, poleas, rodillos, sistema motriz, limpieza, tensado y estructura.
- Los puntos de pellizco (banda-polea, banda-rodillo) son zonas de mayor riesgo de atrapamiento, y todo trabajo en correa requiere LOTO sin excepción.
- Las fallas comunes incluyen descentralización de banda, deslizamiento en polea motriz, falla de rodillos y rotura de banda, cada una con causas y consecuencias específicas.
- Incluso tareas aparentemente menores como limpieza de derrames deben realizarse con la correa bloqueada, nunca con equipo en movimiento.

Para reflexionar

- ¿Has identificado correas en tu planta con problemas recurrentes de descentralización? ¿Qué causas podrían estar generando esa condición?
- ¿Qué consecuencias operacionales tendría una rotura de banda en una correa crítica de tu proceso?
- ¿Cómo podrías convencer a un compañero que quiere hacer una limpieza rápida sin LOTO de que ese atajo puede costarle la vida?

Además del chancado y transporte, las plantas de procesamiento de mineral utilizan equipos de clasificación por tamaño y bombeo de pulpas. Estos equipos completan el circuito de conminución y preparación del mineral para procesos posteriores como flotación o lixiviación.

Harneros vibratorios: Equipos que clasifican material por tamaño mediante vibración. Una malla o parrilla con aberturas de tamaño específico permite el paso de partículas finas (pasante o undersize) mientras retiene las gruesas (rechazo u oversize). Los harneros pueden ser de movimiento circular, lineal o elíptico, generado por motores vibradores eléctricos o excéntricas mecánicas. **Componentes críticos:** mallas de clasificación (se desgastan y deben reemplazarse periódicamente), motores vibradores (sus rodamientos fallan por fatiga), estructura y resortes de soporte (sufren fatiga por vibración constante). **Riesgos específicos:** exposición a vibración intensa durante inspección, caída de material acumulado al abrir compuertas, contacto con superficies calientes de motores.

Bombas Warman (bombas centrífugas de pulpa): Diseñadas para bombear mezclas de agua y mineral (pulpas) con alto contenido de sólidos abrasivos. Utilizan impulsores de caucho o metal duro resistente a la abrasión. **Principio de funcionamiento:** el impulsor giratorio acelera la pulpa centrífugamente, aumentando su presión y enviándola por tuberías a siguiente proceso. **Componentes críticos:** impulsor (se desgasta por abrasión), carcasa (también se desgasta), sello mecánico (evita fugas entre zona de alta presión y ambiente), rodamientos (soportan cargas radiales y axiales). **Fallas comunes:** desgaste de impulsor y carcasa (reducen eficiencia, aumentan consumo de corriente), falla de sello (genera fugas, permite ingreso de contaminantes al aceite de rodamientos), cavitación (formación y colapso de burbujas por baja presión de succión, genera ruido característico y daña impulsor).

Hidrociclones: Equipos de clasificación que separan partículas por tamaño utilizando fuerza centrífuga. La pulpa ingresa tangencialmente bajo presión, creando un vórtice. Las partículas gruesas son arrojadas a la pared por fuerza centrífuga y descargan por la parte inferior (descarga o underflow), mientras las finas son arrastradas al centro por flujo secundario y salen por la parte superior (rebose u overflow). No tienen partes móviles, pero el desgaste interno (en zona de alimentación y ápice de descarga) afecta su eficiencia de clasificación. **Riesgos específicos:** proyección de pulpa a presión durante desconexión de tuberías, contacto con bordes cortantes en revestimientos desgastados.

Integración en el circuito de procesamiento: Un circuito típico de chancado y molienda funciona así: el mineral chancado se mezcla con agua formando pulpa, que se bombea (bombas Warman) hacia molinos de bolas o SAG. El producto del molino pasa por harneros o hidrociclones que separan el material fino (que va a siguiente proceso) del grueso (que retorna al molino en circuito cerrado). Este control del tamaño de producto es crítico para eficiencia de procesos posteriores.

Mantenimiento preventivo en estos equipos:

- **Harneros:** Inspección semanal de tensión y estado de mallas, verificación de torque de pernos de fijación (la vibración los afloja), medición de vibración y temperatura de motores, verificación de estado de resortes.
- **Bombas Warman:** Medición de consumo de corriente (indica desgaste de impulsor), inspección de fugas en sello, medición de temperatura de rodamientos, análisis de vibraciones, verificación de

alineación motor-bomba.

- **Hidrociclones:** Inspección visual de patrón de descarga (indica desgaste interno), medición de presión de alimentación, inspección de desgaste en ápice y vortex finder, verificación de hermeticidad en bridas.

Ejemplo del ámbito laboral: En una planta concentradora, el rendimiento de clasificación de una batería de hidrociclones disminuyó progresivamente, enviando más material grueso al overflow (rebose) de lo especificado. Esto generó sobrecarga en el circuito de flotación aguas abajo. Al inspeccionar durante parada de planta, encontraron que el ápice (orificio de descarga inferior) se había desgastado, pasando de 50mm a 85mm de diámetro. Esto alteró el balance hidráulico interno del ciclón. El reemplazo del ápice desgastado corrigió la clasificación y recuperó el rendimiento del circuito.

✓ Puntos clave

- Los harneros clasifican material por tamaño mediante vibración y mallas con aberturas específicas, con componentes críticos: mallas, motores vibradores, estructura y resortes.
- Las bombas Warman son bombas centrífugas diseñadas para pulpas abrasivas, con componentes críticos: impulsor, carcasa, sello mecánico y rodamientos.
- Los hidrociclones clasifican partículas por tamaño usando fuerza centrífuga, sin partes móviles, pero el desgaste interno afecta su eficiencia.
- El mantenimiento preventivo de estos equipos incluye inspecciones periódicas, mediciones de parámetros operacionales y reemplazo programado de componentes de desgaste.

Para reflexionar

- ¿Qué síntomas operacionales indicarían desgaste severo del impulsor de una bomba de pulpa en tu planta?
- ¿Cómo impactaría una falla de clasificación en harneros o ciclones al proceso aguas abajo en tu circuito?
- ¿Qué parámetros medirías o monitorearías para detectar deterioro progresivo en estos equipos antes de una falla?

Mapa conceptual del módulo

Seguridad como cimiento operacional

La seguridad industrial y el conocimiento del funcionamiento de equipos son inseparables: no puedes mantener de forma segura lo que no comprendes.

Identificación de riesgos críticos

Cinco categorías principales: atrapamiento, caída de altura, golpe por objetos, contacto eléctrico y exposición a agentes. Cada equipo presenta peligros específicos.

Jerarquía de controles y LOTO

Aplicar controles de mayor efectividad (eliminación, sustitución, ingeniería) antes que EPP. LOTO es el procedimiento crítico que protege de arranques inesperados.

Funcionamiento de chancadores

Equipos de reducción de tamaño por fuerza mecánica: primario, secundario, terciario. Componentes críticos: cámara de trituración, revestimientos, eje, lubricación, ajuste.

Sistemas de transporte por correas

Componentes: banda, poleas, rodillos, sistema motriz, limpieza, tensado. Puntos de pellizco son zonas críticas de atrapamiento. Toda intervención requiere LOTO.

Equipos de clasificación y bombeo

Harneros vibratorios clasifican por tamaño mediante vibración. Bombas Warman mueven pulpas abrasivas. Hidrociclones clasifican por fuerza centrífuga sin partes móviles.

En síntesis. Has completado el módulo de Seguridad Industrial y Fundamentos Operacionales, la base sobre la cual construirás todas tus competencias de mantenimiento industrial en plantas de chancado y procesamiento de mineral. Ahora comprendes por qué Roberto Figueroa insiste en que la seguridad y el conocimiento del funcionamiento de equipos son inseparables: cada procedimiento de bloqueo, cada inspección preventiva, cada diagnóstico de falla se apoya en este conocimiento fundamental. En los próximos módulos profundizarás en técnicas específicas de inspección, diagnóstico y mantenimiento de cada tipo de equipo, pero siempre sobre esta base: **primero la seguridad, siempre el conocimiento del proceso, nunca atajos que pongan en riesgo tu vida o la de tus compañeros.** La diferencia entre un técnico de mantenimiento competente y uno excepcional no está solo en sus habilidades técnicas, sino en su capacidad de tomar decisiones seguras incluso bajo presión operacional.