

# Optimización del molino agitado: ¿aprovecho al máximo mi molino?

**Andrew Swann<sup>1</sup>, Scott Martin<sup>2</sup> e Ion Gurnett<sup>1</sup>**

1. *Glencore Technology, Australia*
2. *Glencore Technology, Canadá*

Con el tiempo, los fundamentos y los conocimientos institucionales sobre el funcionamiento de los equipos críticos tienden a perderse debido a la rotación de personal y a que la atención se enfoca en el siguiente "cuello de botella". Finalmente, el desarrollo de las condiciones de la planta (mineralogía, rendimiento, distribución del tamaño de partículas, etc.) cambia la filosofía de operación de cualquier concentradora, y una operación deficiente o no optimizada de los equipos clave puede convertirse en la práctica estándar de funcionamiento. Utilizando IsaMill™ como un estudio de caso para prevenir este escenario tan familiar, los autores han preparado un plan para auditar su molino agitado existente y asegurar que pueda sacarle el máximo partido.

Las áreas clave que los autores explorarán son: cómo evaluar IsaMill™ correctamente; optimizar su selección de medios; optimizar su densidad de operación; cómo comparar su molino con el diseño; y estrategias típicas para minimizar el desgaste dentro de IsaMill™. Al seguir estos pasos, los sitios de operación deberían poder asegurar que su molino agitado esté completamente optimizado.

Palabras clave: IsaMill™, Optimización de molino agitado, Auditoría de proceso

## 1.0 INTRODUCCIÓN

A finales de la década de 1980, Mount Isa Mines (MIM) realizó un importante trabajo de pruebas para intentar aplicar a la industria minera el pequeño molino de bolas horizontal de Netzsch, que funcionaba con productos de pintura, para abordar problemas complejos de liberación. MIM realizó un importante trabajo modificando el mecanismo del molino para que funcionará en entornos de minería continua a gran escala con bajos costos de operación. El resultado fue la instalación del primer IsaMill™ interno en Mount Isa en 1994. La comercialización externa del IsaMill™ se produjo a principios de la década de 2000 y dio paso a más de 145 instalaciones en todo el mundo y a su aceptación como el molino agitado líder en el sector minero mundial.

El documento tiene como objetivo destacar los fundamentos de la operación del molino y proporcionar una guía para entender sus IsaMills™ y cómo evaluar las condiciones de operación para lograr el mejor rendimiento. El objetivo es permitir a los usuarios de cualquier planta en operación que utilice un IsaMill™ pueda auditar, solucionar problemas y optimizar su molino utilizando las mejores prácticas.

## 2.0 QUÉ OCURRE DENTRO DEL ISAMILL

El IsaMill™ es un molino horizontal agitado de alta intensidad que contiene discos giratorios revestidos de caucho montados sobre un eje en voladizo. Dentro del molino se utilizan bolas de molienda de cerámica que recirculan entre los discos giratorios. La molienda de la pulpa de alimentación se produce mediante mecanismos de atrición y abrasión. En las figuras Figura 1 y Figura2 se muestra una configuración simplificada del interior del molino.

La alimentación se bombea hacia la cámara del molino, que contiene el eje horizontal con los discos montados sobre él, girando a una velocidad periférica aproximada de 15 a 20 m/s. Los discos proporcionan el entorno de mezcla de alta intensidad de los medios de molienda cerámicos y la pulpa. Las partículas más gruesas y los medios de molienda tienden a centrifugarse hacia la circunferencia del molino, mientras que las partículas más finas se desplazan hacia el eje y descienden por éste hacia el extremo de descarga del molino. En el extremo de descarga, el separador de producto clasifica las partículas finas y gruesas, es exclusivo del IsaMill™ y clave para la distribución precisa del tamaño del producto.

Varias configuraciones internas, incluyendo la cantidad de discos y el diámetro de los mismos, pueden ajustarse para considerar las condiciones específicas de la operación.

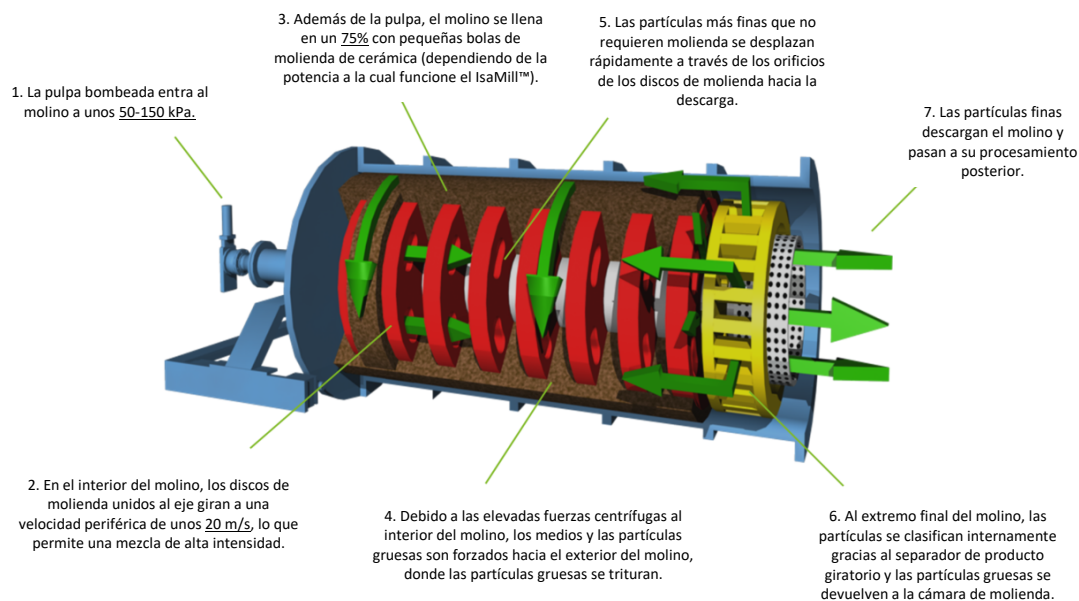


Figura 1: Mecanismo interno de un IsaMill™ (Gurnett et al., 2021)

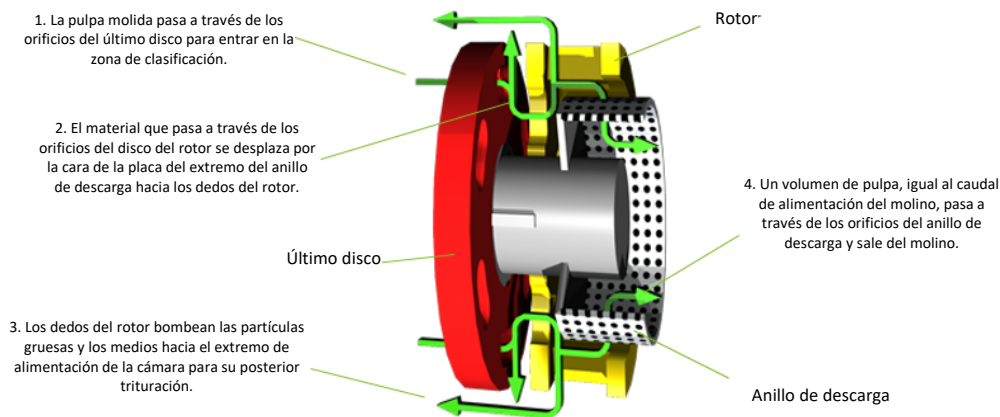


Figura2: Clasificación interna del IsaMill™ (Gurnett et al, 2021)

### 3.0 ENERGÍA ESPECÍFICA

#### 3.1 PAPEL DE LA ENERGÍA

El propósito del IsaMill™ es lograr la reducción de tamaño y mejorar la liberación de minerales. La potencia en cualquier aplicación de molienda es uno de los parámetros más importantes para entender y cuantificar correctamente en base a un rendimiento definido.

La potencia es la tasa a la cual el motor del IsaMill™ aplica energía a la carga (pulpa y medios), medida en kW.

El rendimiento, una función de la tasa de flujo de la alimentación fresca del circuito (m<sup>3</sup>/h) y la densidad (kg/m<sup>3</sup>), es la tasa a la cual el material de alimentación es suministrado al circuito IsaMill™, generalmente medido en toneladas por hora (t/h). La reducción de tamaño es una función de la entrada de energía a cada tonelada procesada, definida como la energía específica del IsaMill™.<sup>1</sup>

$$\text{Energía Específica} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Rendimiento}} = \text{kWh/t}$$

La distribución de la alimentación (tamaño de partícula), el rendimiento y la densidad suelen estar sujetos a límites de funcionamiento bastante estrictos y suelen estar fijados por las unidades de operación aguas arriba. Por lo tanto, el control primario del tamaño del producto del IsaMill™ es el consumo de potencia del IsaMill™, controlado a través de la adición intermitente de medios para lograr un punto de ajuste de potencia de operación objetivo.

#### 3.2 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA

La energía específica se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\text{Energía Específica} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right) = \frac{\text{Potencia neta absorbida por el IsaMill (kW)}}{\text{Circuito de alimentación fresca} \left( \frac{\text{t}}{\text{h}} \right)}$$

$$\text{Potencia neta absorbida por el IsaMill} = \text{Potencia bruta absorbida por el IsaMill} - \text{Potencia en vacío}$$

La Energía Específica es independiente de la Tasa de Flujo de Alimentación del IsaMill™ (flujo directo al molino);

<sup>1</sup>La eficiencia de la molienda aumentará a medida que aumente la densidad de operación hasta que se alcance un límite superior.

depende solo del consumo de energía (neta) del IsaMill™ y de la tasa de alimentación fresca del circuito. Aumentar o disminuir la tasa de flujo de alimentación directa del IsaMill™ solo variará la cantidad de descarga reciclada.

La Energía Específica también es independiente de la disposición del circuito de clasificación. Un error común dentro de la industria es el escalado del Signature Plot (la caracterización de la energía específica al tamaño de molienda) a tamaños de plantas completas donde el molino se puede instalar en un circuito cerrado o abierto. En la Figura3 se muestra un ejemplo simplificado.

El escalado a partir de muestras de "alimentación del circuito" en la base de datos Signature Plot se ha utilizado de forma fiable para verificar que los requisitos específicos de energía para un conjunto determinado de condiciones de molienda objetivo son independientes de la configuración de clasificación abierta o cerrada.

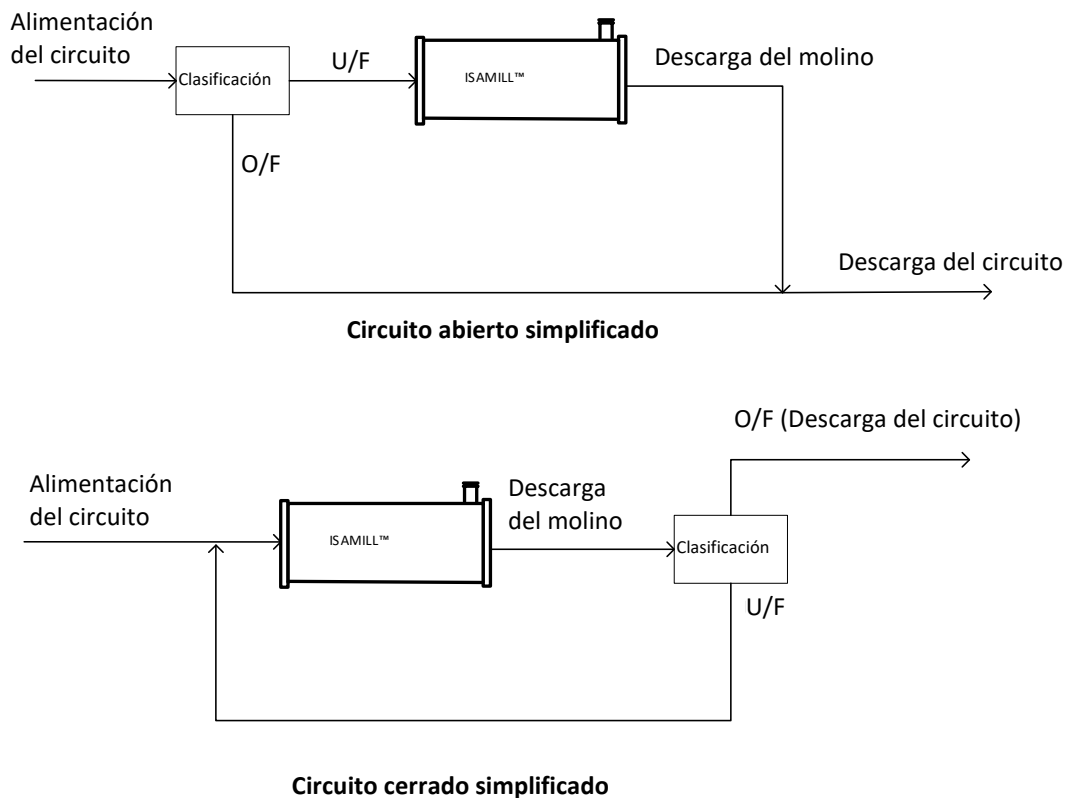


Figura3: Circuitos operativos simplificados del IsaMill™ (Gurnett et al., 2022)

En circuitos abiertos con clasificación ciclónica de la alimentación, el material más grueso llega al IsaMill™ a una tasa de tonelaje reducida (en comparación con la alimentación del circuito). El flujo inferior del ciclón requerirá más aporte de energía (por unidad de masa), debido a la alimentación más gruesa, con la compensación a tasas de masa más bajas. Esto se demuestra de forma más sencilla para un circuito abierto en el ejemplo de la Figura 4 a continuación.

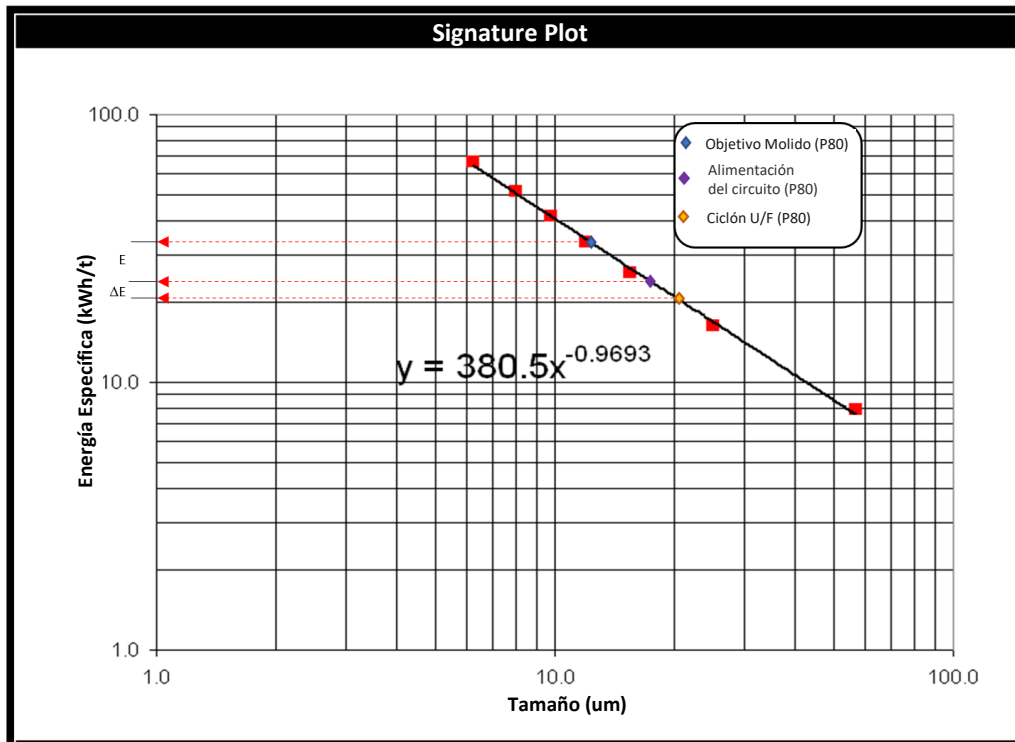


Figura 4: Aplicación de Signature Plot a la clasificación ciclónica de la alimentación (Gurnett et al., 2022)

Sobre la base de un historial de escalado exitoso desde los trabajos de prueba hasta las instalaciones a escala real, se mantiene la siguiente relación:

$$E \times T_{\text{circuito}} \approx (E + \Delta E) \times T_{\text{CiclónUF}}$$

donde,

$E$  = energía específica del circuito, tarea basada en la alimentación del circuito al tamaño de molienda objetivo [kWh/t]

$\Delta E$  = energía específica, tarea adicional basada en la reducción del flujo inferior del ciclón más grueso al tamaño de alimentación del circuito [kWh/t]

$T_{\text{circuito}}$  = caudal de sólidos del circuito [t/h seco]

$T_{\text{CiclónUF}}$  = caudal de sólidos del flujo inferior de clasificación [t/h seco].

Si se considera un circuito cerrado, la tasa de alimentación específica al molino aumentará con la mayor carga circulante proveniente de la clasificación. Hay que considerar que la alimentación fresca es la misma en todas las disposiciones. Cualquier material fino (por debajo del tamaño de molienda objetivo) que recircule no afecta los requisitos de energía generales. Debido a la clasificación interna dentro del IsaMill™, la fracción gruesa se someterá preferentemente a molienda, mientras que los finos idealmente pasarán por alto las zonas de molienda dentro del molino.

Por ello, la energía específica siempre se calcula en base a la potencia apropiada aplicada a la "alimentación fresca" del circuito.

## 4.0 MEDIOS CERÁMICOS

### 4.1 SELECCIÓN Y CONSUMO DE MEDIOS

A diferencia de la mayoría de los molinos alternativos, que utilizan bolas de acero, el IsaMill™ usa bolas de cerámica de alta calidad, y la selección de los medios correctos permite mejorar significativamente la eficiencia de la molienda y, por lo tanto, los costos de operación. La eficiencia de la molienda se ve afectada por varias variables relacionadas con la selección de los medios, siendo las más significativas su diámetro y densidad.

Al seleccionar los medios adecuados, éstos deben proporcionar suficiente energía de rotura para reducir las partículas más gruesas de la alimentación a la velocidad a la que entran en el molino. Glencore Technology (GT), que posee los derechos del IsaMill™, recomienda una relación de reducción ( $F80 \div P80$ ) de menos de 8 por tipo de medio (rango de diámetro, es decir, 1,5 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, etc.) para un IsaMill™. Para fines comparativos, GT también recomienda los siguientes medios para seleccionar el tamaño superior de los medios como punto de partida para la optimización.

		Tamaño de alimentación, F80 (µm)											
Tamaño de producto F80 (µm)		<20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-100	100-130	130-160	160-200	200-250	>250
		1.5	1.5	1.5-2	1.5-2	2	2	2.5	3	4	4.5	4.5	6
7-11	2	2	2	2	2	2	2	2.5	3	4	4.5	4.5	6
11-15	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.8	3	4	4.5	4.5	6
15-20	2.5	3	3	3	3	3	3	3.5	3.5-4	4.5	4.5	4.5	6
20-25	x	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5-4	4.5	4.5	4.5	6
25-30	x	x	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4	4	4.5	4.5	4.5	6
30-35	x	x	x	4	4	4	4.5	4.5	4.5	5	5	5	6
35-40	x	x	x	4.5	4.5	5	5	5	5	5.5	5.5	5.5	6
>40	x	x	x	5	5	5	5	5	5.5	5.5	5.5	5.5	6

Figura 5: Matriz de selección de medios (Gurnett et al., 2021)

Recientemente, a medida que más proveedores de medios cerámicos están entrando en el mercado, la introducción de medios de mayor densidad (SG) está más fácilmente disponible, centrándose particularmente en el mercado de molinos verticales agitados. En configuraciones de molienda horizontales, como con el IsaMill™, se encontró que los medios de mayor SG tenían eficiencias de molienda reducidas mientras que el desgaste de los componentes internos aumentaba. Se entiende que las mejoras en la vida útil de los medios solo son estadísticamente perceptibles una vez que la SG aumenta por encima de 5.

Un conocido proveedor de medios de molienda proporcionó a GT los costos de medios cerámicos para diferentes densidades, para investigar el impacto de la SG en los costos de operación. Se desarrolló un modelo de costos de operación para un IsaMill™ operando a 2.500 kW, con un consumo de medios promedio de 12 g/kWh. La selección de la SG preferencial de 3,7 para el IsaMill™ por sobre un medio de SG alta de 4,5, mostró que durante dos años de operación, el ahorro de costos en medios (US\$0,7M comparado con US\$2,1M) fue equivalente al valor de un segundo IsaMill™ de M10.000.

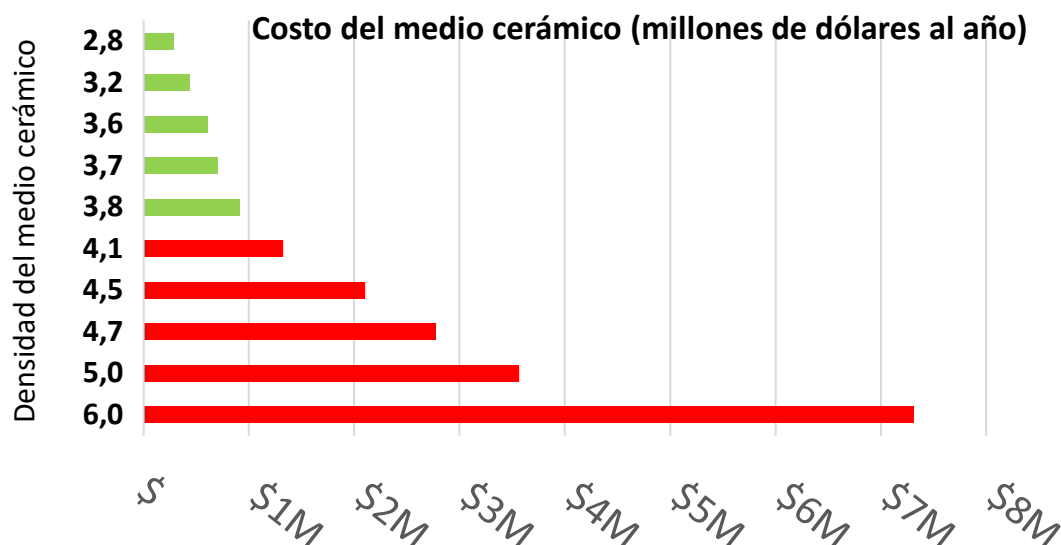


Figura 6: Costos comparativos de distintos medios SG (Gurnett et al., 2021)

## 4.2 CONSUMO DE MEDIOS

La adición de medios al IsaMill™ ocurre automáticamente a través de una lógica programada para enfocarse a un consumo de energía específico. Es crítico para los equipos de operaciones no solo comprender sus tasas de consumo de medios, sino monitorear activamente los medios mismos. La métrica más confiable para el consumo de medios de molienda es gramos de medios/IsaMill™ kWh. Los medios de molienda de buena calidad deben desgastarse a una tasa cercana a 12 g/kWh o menos.

Existen algunas comprobaciones críticas que se pueden realizar de forma regular para identificar si el desgaste/consumo de medios está afectando negativamente al rendimiento del molino y a los costos de funcionamiento:

- *¿Sus medios son una mezcla de dos proveedores o productos diferentes?*  
Es esencial evitar la mezcla de tipos de medios. Los tipos de medios mezclados (de diferente dureza) tendrán propiedades de molienda diferentes, y los medios más blandos básicamente serán triturados por los más duros, lo que provocará mayores índices de consumo y mayores costos de operación asociados innecesarios.

Incluso diferentes formulaciones del mismo proveedor suponen este riesgo.

- *¿Mi proveedor me entrega material de buena calidad?*  
Las bolas de buena calidad se desgastan uniformemente, como muestra la Figura 7, manteniendo su esfericidad y eficacia de molienda. Las bolas de menor calidad pueden desgastarse en diferentes "formas", como en la Figura 8, y tener un efecto perjudicial en la tasa general de desgaste de los medios, pero también pueden afectar la tasa de desgaste de los componentes internos del IsaMill™. Las bolas de menor calidad también se pueden romper, dejando finos fragmentos de cerámica que pueden causar un desgaste significativo de los componentes internos del molino.

Cada vez que sea posible, debe comprobarse la forma de los medios recuperados durante la parada.

- *¿Se producen pérdidas de bolas en el flujo del producto de descarga?*  
En la mayoría de los casos, esto se debe a una combinación de flujo elevado, consumo elevado de potencia (carga de medios) y configuración del molino.

Secuencias de arranque incorrectas también pueden causar pérdidas inadvertidas de medios en el producto. Los medios pueden salir a través de la línea de descarga a medida que el eje del IsaMill™ alcanza su velocidad máxima en el arranque. Por lo tanto, la secuencia de arranque del IsaMill™ debe programarse para estar en modo de reciclado total (válvula de reciclado 100% abierta) durante el arranque del motor.



Figura 7: Desgaste uniforme de los medios de molienda (Glencore Technology, 2018a)



Figura 8: Desgaste no uniforme de los medios de molienda Angular (izquierda), Plano (derecha) (Glencore Technology, 2018a)

## 5.0 RELACIONES ENTRE PROCESOS

### 5.1 ¿QUÉ CONTROLLO?

Entender cómo interactúan todas las relaciones interconectadas del proceso proporcionará la mejor oportunidad para operar su IsaMill™ en sus condiciones óptimas. Muchas variables del proceso interactúan, y modificar una puede tener un impacto significativo en varias otras. Las variables aguas arriba de la planta también afectarán la operación del IsaMill™. En la Figura 9 se muestra una útil regla general para verificar la salud del molino.

- ¿Qué variables puedo controlar dentro del circuito del IsaMill™?



	Molienda más fina	Molienda más gruesa
Raramente se controlan	↓ Dureza del mineral	↑ Dureza del mineral
	↓ Tamaño de la alimentación	↑ Tamaño de la alimentación
A veces se controlan	↓ Rendimiento	↑ Rendimiento
	↑ % Sólidos	↓ % Sólidos*
Generalmente se controlan	↑ Consumo de potencia	↓ Consumo de potencia

Figura 9: Factores que afectan el rendimiento del IsaMill™ (Glencore Technology, 2018b)

\*La eficacia de trituración aumenta a medida que aumenta la densidad de operación hasta que se alcanza un límite superior. Esto tiene relación con la viscosidad y se tratará más adelante.

La revisión de las tendencias de los datos de los procesos por turnos y de forma semanal permitirá identificar las respuestas específicas de un proceso a las variaciones. Los cambios repentinos pueden indicar problemas eléctricos o de los instrumentos, mientras que los cambios más lentos a lo largo del tiempo generalmente están relacionados con el proceso. Muchas alteraciones del proceso a corto plazo se resolverán por sí solas con la ayuda de sistemas de control automático, pero se recomienda realizar revisiones periódicas de los datos del proceso en tendencias de mayor duración, por ejemplo, 6 meses.

## 5.2 DENSIDAD

El diseño del IsaMill™ generalmente opera bajo condiciones de alimentación de 18 a 20 % de sólidos (v/v) para aplicaciones de remolienda. A medida que aumenta la densidad de sólidos, la producción adicional de material más fino de la acción de molienda aumenta subsecuentemente el área superficial total de las partículas. Los impactos de viscosidad dentro del molino tienen una mayor probabilidad de producirse a mayores áreas de superficie expuestas. Estas condiciones de operación pueden hacer que el molino deje de actuar como un entorno de molienda agitado y altamente turbulento y se convierta en un tapón viscoso giratorio de medios y material mezclados. Este "bloqueo" de la carga puede provocar que el consumo de potencia disminuya considerablemente. La relación entre densidad/viscosidad y eficiencia se describe en la Figura 10.

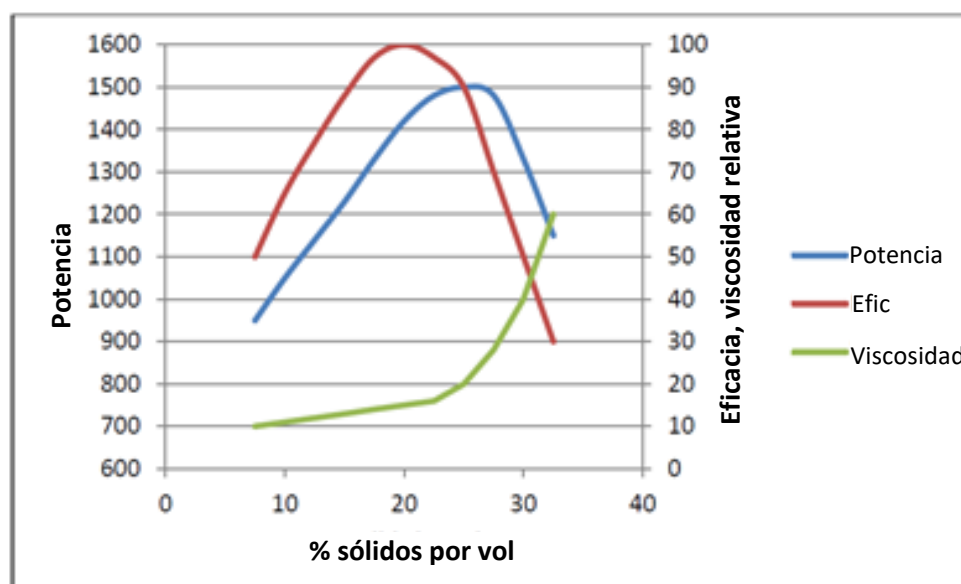


Figura 10: Efecto de la densidad en la eficiencia de molienda dentro del IsaMill™. (Gurnett et al., 2021)

De este modo, para ayudar a diagnosticar los problemas de densidad, se desarrolló el siguiente diagrama de flujo que se muestra en la Figura 11 para comprobar las condiciones del proceso que pueden diagnosticar un problema de densidad. Si existe un problema de densidad, se recomienda diluir la alimentación con agua de

proceso si hay suficiente capacidad in situ.

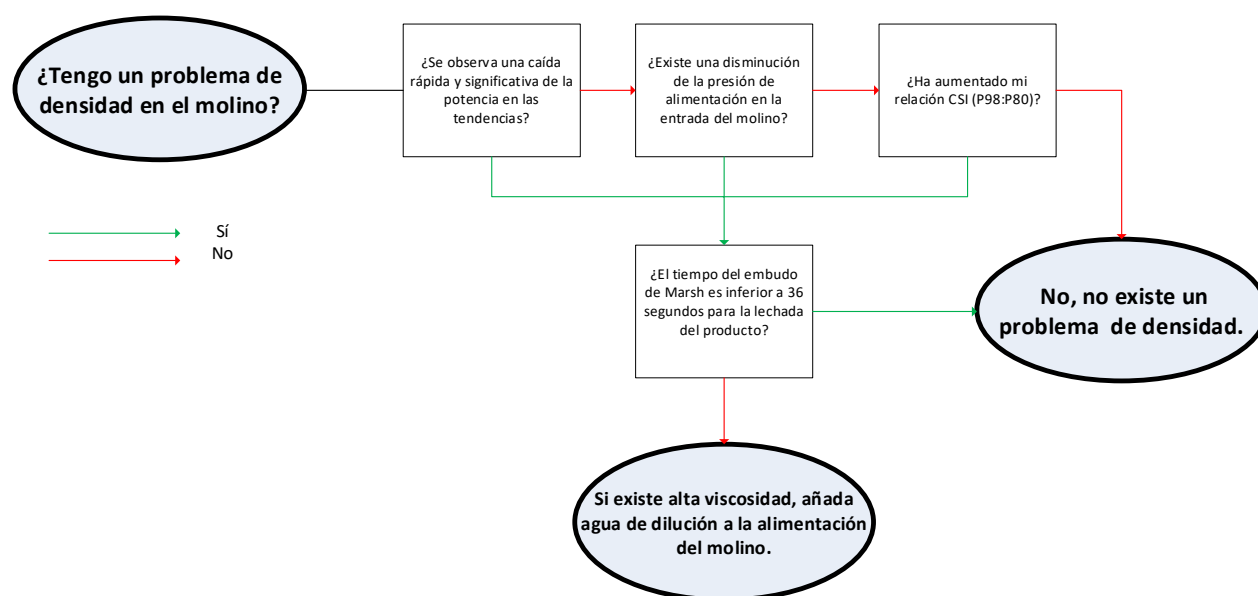


Figura 11: Diagnóstico de problemas de densidad

De este modo, para mitigar este problema en el proceso de diseño, se recomienda operar los IsaMills™ a 20% de sólidos (v/v). El propósito de lo anterior es limitar los impactos de la viscosidad en la eficiencia de la molienda. La Tabla 1 y la Tabla 2, se refieren a varias condiciones de SG y densidad.

La superficie de las partículas sólidas también es un aspecto importante de la viscosidad. A medida que las partículas sólidas reducen su tamaño (diámetros de partícula pequeños), aumenta la superficie total de partículas sólidas dentro de la cámara de molienda del mismo volumen y, por tanto, aumenta la viscosidad aparente. Generalmente, para la mayoría de los tipos de minerales probados dentro del IsaMill™, la concentración volumétrica de sólidos (una buena representación del área superficial total) de aproximadamente 20 sólidos (v/v) es un buen punto de partida para operar el molino. Factores como la rugosidad de la superficie y la forma de las partículas también pueden contribuir a los efectos de viscosidad en el molino y pueden requerir la optimización del % objetivo de sólidos de alimentación para un tipo específico de mineral.

Tabla 1: Tabla de conversión de densidad de sólidos

SG de sólidos	% de sólidos (v/v)	% de sólidos (w/w)
2.6	20%	39,4%
2.8	20%	41,2%
3.0	20%	42,9%
3.2	20%	44,4%
3.4	20%	45,9%
3.6	20%	47,4%
3.8	20%	48,7%
4.0	20%	50,0%
4.2	20%	51,2%

Tabla 2: Referencia de la densidad de sólidos

	SG de sólidos								
	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2
% de sólidos (w/w)	% de sólidos (v/v)								
30,0%	14,2%	13,3%	12,5%	11,8%	11,2%	10,6%	10,1%	9,7%	9,3%
32,5%	15,6%	14,7%	13,8%	13,1%	12,4%	11,8%	11,2%	10,7%	10,3%
35,0%	17,2%	16,1%	15,2%	14,4%	13,7%	13,0%	12,4%	11,9%	11,4%
37,5%	18,8%	17,6%	16,7%	15,8%	15,0%	14,3%	13,6%	13,0%	12,5%
40,0%	20,4%	19,2%	18,2%	17,2%	16,4%	15,6%	14,9%	14,3%	13,7%
42,5%	22,1%	20,9%	19,8%	18,8%	17,9%	17,0%	16,3%	15,6%	15,0%
45,0%	23,9%	22,6%	21,4%	20,4%	19,4%	18,5%	17,7%	17,0%	16,3%
47,5%	25,8%	24,4%	23,2%	22,0%	21,0%	20,1%	19,2%	18,4%	17,7%
50,0%	27,8%	26,3%	25,0%	23,8%	22,7%	21,7%	20,8%	20,0%	19,2%
52,5%	29,8%	28,3%	26,9%	25,7%	24,5%	23,5%	22,5%	21,6%	20,8%
55,0%	32,0%	30,4%	28,9%	27,6%	26,4%	25,3%	24,3%	23,4%	22,5%

Para convertir % de sólidos (v/v) por masa a % de sólidos (v/v) por volumen. También se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de sólidos (vol)} = \frac{\% \text{ Sólidos (masa)} \times \text{SG de pulpa}}{\text{SG de sólidos}}$$

Si se observan desviaciones en la densidad de la alimentación, el equipo de operaciones debe revisar lo siguiente:

#### Procesos aguas arriba

- ¿Ha cambiado significativamente el tonelaje/caudal?
- ¿Han cambiado las condiciones de flotación?

#### Rendimiento del ciclón

- ¿Cuál es la presión del ciclón?
- ¿Hay ciclones que se acordonan o se bloquean?
- ¿Ha cambiado la densidad o el caudal de alimentación del ciclón?

#### Adición de agua al circuito

- ¿Ha cambiado la adición de agua al circuito?
- ¿Se ha iniciado la adición de agua de reposición por alguna razón?
- ¿El control del agua de dilución no funciona?
- ¿Se ha puesto en marcha una bomba de pozo de derrames?

#### Lectura manual

- ¿Existe alguna discrepancia entre la lectura manual y el densímetro?

### **5.3 POTENCIA Y TEMPERATURA**

El aumento de energía específica da como resultado un producto más fino, pero también temperaturas de descarga más altas. A temperaturas más altas, las propiedades del caucho comienzan a degradarse, y las partes internas de caucho del IsaMill™ son mucho más susceptibles al desgaste acelerado. GT ha realizado pruebas de caucho durante décadas para mejorar las características de desgaste a altas temperaturas, pero aun así, el IsaMill™ tiene un enclavamiento de la temperatura de descarga que lo apagará (70°C) para evitar daños en el caucho. El operador debe monitorear la temperatura de descarga e investigar cualquier cosa que haga que aumente significativamente.

A medida que disminuye la alimentación fresca al circuito del IsaMill™ (aumenta la energía específica), aumentará el reciclado y se elevará la temperatura de descarga. Una reducción en la tasa de alimentación fresca es a menudo la causa del aumento de las temperaturas de descarga. La Figura 12 muestra la relación entre densidad de alimentación, consumo de potencia y temperatura de descarga.

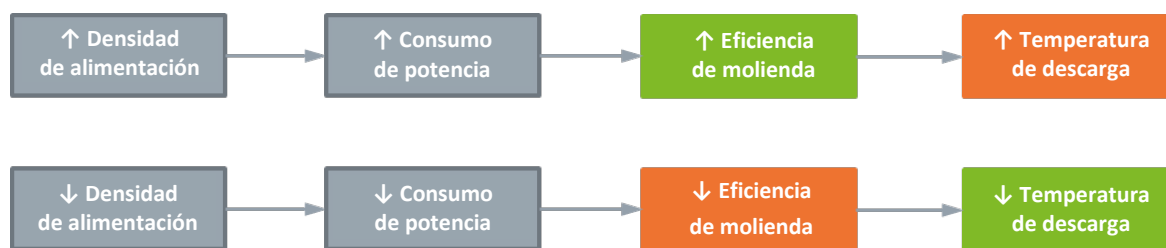


Figura 12: Energía y temperatura (Glencore Technology, 2018b)

Si la lectura de consumo de potencia se comporta de forma inesperada, compruebe lo siguiente:

- **Densidad de la alimentación:** Generalmente el consumo de potencia aumenta con la densidad de la pulpa. ¿La densidad está dentro de los rangos normales de operación?
- **Caudal de alimentación del IsaMill™:** Si el caudal de alimentación del molino es demasiado alto, existe la posibilidad de pérdida de medios en el flujo de descarga del molino. Los medios en el área del rotor causarían un aumento en el consumo de potencia hasta que los medios comiencen a pasar hacia el flujo de descarga. ¿El caudal está dentro de los rangos normales de operación?
- **Carga de medios:** Si la tolva de medios está vacía, el sistema IsaCharger™ continuará funcionando, pero no se enviarán medios al molino.
- **Viscosidad:** Si la viscosidad interna del IsaMill™ se ha vuelto demasiado alta, el consumo de potencia puede disminuir drásticamente debido a un efecto de "giro libre". ¿Cuándo fue la última vez que se hizo una revisión del Embudo de Marsh?
- **Distribución de los medios:** Los medios en el área del rotor pueden hacer que el motor principal del IsaMill™ consuma más potencia. ¿Se ha completado recientemente el perfil térmico del molino (imagen de cámara térmica)?
- **Acumulación de Partículas Gruesas:** ¿Se ha engrosado significativamente la alimentación del circuito del IsaMill? ¿Cómo están funcionando los ciclones?
- **Funcionamiento de la bomba de pozo:** Si la bomba de pozo de derrames del área del IsaMill™ se pone en marcha, cualquier medio en el depósito será bombeado a la caja de la bomba de alimentación y posteriormente hacia el molino, dando como resultado una mayor carga de medios y consumo de potencia.

#### 5.4 MEDICIÓN DEL TAMAÑO DEL PRODUCTO

La información correcta sobre el tamaño del producto es fundamental para determinar si el molino está cumpliendo su función. Las herramientas estándar para medición del tamaño de las partículas incluyen tamices o cribas, análisis de imágenes y unidades de análisis láser del tamaño de partículas (por ejemplo, Malvern Mastersizer). Es importante considerar que, cuando se utiliza un medidor láser, se utiliza el método de la "esfera equivalente", que suele dar resultados más gruesos si se compara directamente con un método de tamizado, ya que se supone que el volumen de la partícula es una esfera. La forma de las partículas puede influir significativamente en los resultados de la herramienta de medición utilizada y, por tanto, en la interpretación de los datos operativos de la planta.

Un ejemplo de cómo la forma influye en el valor informado, como se muestra en la Figura 13, se observa cuando una partícula de 100 µm de longitud y 20 µm de ancho podría pasar potencialmente a través de un tamiz de 21 µm de abertura, pero se mediría como una partícula de 39 µm en el clasificador láser Malvern.

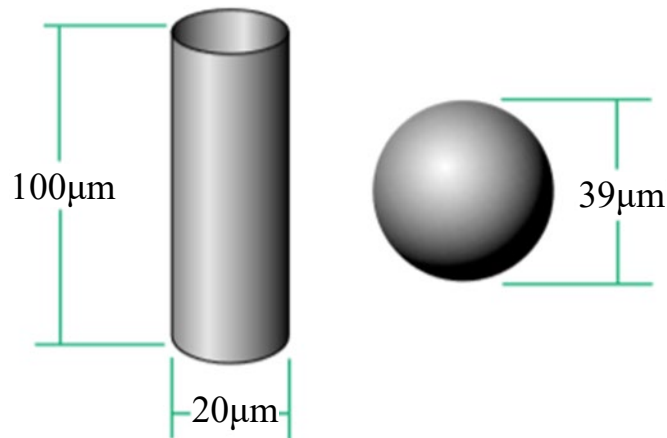


Figura 13: Efecto de la forma de las partículas en la medición (Malvern, 2014)

Dado que la forma es un factor importante en el método de análisis, cuando se miden muestras y se entiende que contienen un mayor grado de partículas no esféricas, por ejemplo, silicatos micáceos, se exagerará la "grosor" del Malvern en comparación con los resultados de la clasificación por tamizado. Esto puede crear un entorno engañoso en el que puede ser necesaria una energía específica más alta dependiendo del método de análisis de partículas. Por lo tanto, si esto se conoce, se recomienda hacer el dimensionamiento y tamizado por láser y permitir que el encargado del trabajo de prueba determine qué método se usará para todos los análisis de partículas. Cuando se realicen estudios en los flujos de alimentación y descarga del IsaMill™, se debe usar una herramienta de medición estándar comparada con el trabajo de prueba original.

## 6.0 CICLONES

### 6.1 RENDIMIENTO DEL CICLÓN

Los ciclones en aplicaciones de remolienda son comúnmente operados para alcanzar un punto de ajuste de presión de alimentación que se mide en el cabezal de alimentación del ciclón, ya sea por el número de ciclones en operación o ajustando la velocidad de la bomba en base a preferencias específicas del sitio. En la Tabla 3 se proporciona una regla general de alto nivel para el funcionamiento de los ciclones y su relación con el proceso.

Tabla 3: Regla general para funcionamiento de ciclones (Magee, 2004)

	Tamaño de corte	Carga en recirculación	Eficiencia del ciclón
▲ Presión	▼	▲	▲
▲ Densidad de alimentación	▲	▼	▼
▲ Tamaño del caño	▼	▲	▲
▲ Tamaño del tubo central	▲	▼	▼

Las inspecciones visuales periódicas de los ciclones pueden mejorar el rendimiento de la molienda al identificar las condiciones de desajuste. En la Figura14 se muestra un esquema simplificado de la descarga del flujo inferior del ciclón.

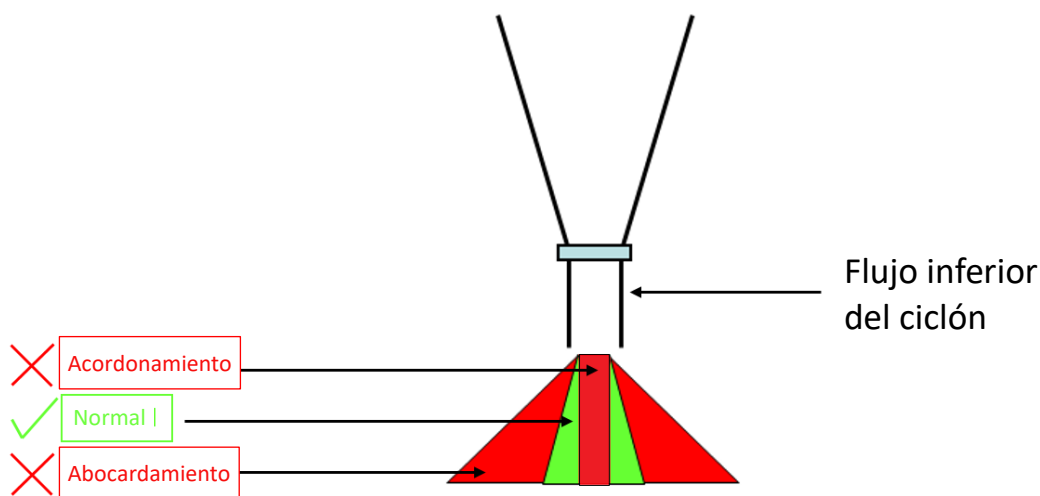


Figura14: Comportamiento del flujo inferior del ciclón (Magee, 2004)

El personal de operaciones debe tener en cuenta lo siguiente:

- Abocardamiento, lo que provoca la presencia de material fino en el flujo inferior y una menor densidad de flujo inferior.
  - La abertura del caño es demasiado grande para el volumen de sólidos que pasan al flujo inferior.
  - Comprobar que los parámetros de funcionamiento están dentro del rango (velocidad de alimentación, densidad, presión).
  - Cerrar un ciclón en grupo para aumentar la presión de alimentación.
- Acordonamiento, que provoca la presencia de material grueso en el rebose y una mayor densidad en el flujo inferior.
  - La abertura del caño es demasiado estrecha para el volumen de sólidos que pasa al flujo inferior.
  - Comprobar que los parámetros de funcionamiento están dentro del rango (velocidad de alimentación, densidad, presión).
  - Abrir un ciclón en grupo para disminuir la presión de alimentación.
  - Comprobar si hay obstrucciones en los caños de otros ciclones.
- No hay flujo, todo el material sale por el rebose.
  - Objetos extraños pueden estar bloqueando el caño o el acordonamiento ha enarenado el ciclón.
  - Aislar el ciclón inmediatamente cerrando la válvula de alimentación y abriendo otra.
  - Eliminar la obstrucción del caño.

Los ciclones deben inspeccionarse periódicamente, y las condiciones deben registrarse como parte de los controles estándar del operador. El operador debe preguntarse:

- ¿Los caños se están acordonando o abocardando?
- ¿Hay fugas en alguna parte del cuerpo del ciclón?
- ¿La presión de alimentación del ciclón es anormalmente baja o alta?
- ¿Detecto vibraciones anormales en el ciclón?

Durante el mantenimiento rutinario, los tubos centrales y los caños deben medirse y registrarse como parte de las prácticas de mantenimiento estándar (inspecciones por número de horas de funcionamiento, por ejemplo, 500 horas). Los componentes desgastados deben sustituirse para garantizar el mejor funcionamiento y deben realizarse inspecciones rutinarias del ciclón para evaluar el rendimiento del proceso.

## 6.2 REBOSE DE CICLÓN FRENTE A DESCARGA DEL ISAMILL™

En el caso de configuraciones IsaMill™ de circuito abierto, los estudios de circuito deben incluir una comparación entre el rebose del ciclón de clasificación y la descarga de producto del IsaMill™. La evidencia anecdótica ha demostrado que cuando existe una diferencia de más de 20  $\mu\text{m}$  entre la descarga del IsaMill™ y los flujos de rebose del ciclón, los procesos aguas abajo pueden estar sujetos a una alimentación bimodal afectando a los procesos de flotación de limpieza o de lixiviación.

- ¿El flujo de descarga del molino y el rebose del ciclón  $P_{80}$  tienen una diferencia menor a 20  $\mu\text{m}$ ?  
Considere si las condiciones de funcionamiento de los ciclones dan lugar a un rebose más grueso de lo deseado.

## 7.0 CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DEL DESGASTE

### 7.1 PERFILES DE TEMPERATURA Y CONTROL DEL DESGASTE

Como en todos los molinos agitados, los componentes de desgaste son una parte considerable de los gastos de operación. Asegurarse de que el molino está configurado para minimizar el desgaste es beneficioso para reducir el costo de las piezas de repuesto y limitar las paradas de mantenimiento innecesarias y las pérdidas de producción. Las imágenes térmicas, similares al ejemplo en la Figura 15, de la superficie externa del IsaMill™ pueden ayudar a monitorear el estado de desgaste (o eventos potenciales de desgaste) del revestimiento de la carcasa y/o la distribución de los medios a lo largo de la longitud del molino.

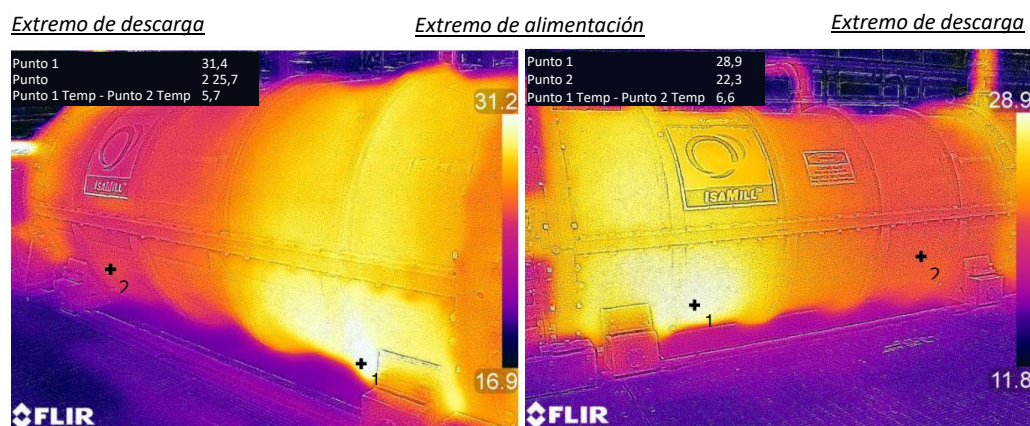


Figura 15: Estudios térmicos de un IsaMill™ (Glencore Technology, 2018c)

Las regiones de mayores temperaturas indican compactación de los medios (comportamiento no fluidificado) y/o un mayor desgaste del revestimiento de la carcasa. Los perfiles térmicos del revestimiento del molino son un excelente indicador de los perfiles de desgaste observados cuando se abre el molino para inspecciones de mantenimiento. La identificación de las posibles zonas de desgaste permitirá a los equipos de mantenimiento y producción ajustar su planificación para abordar los problemas de desgaste. Si se observan estrías en el revestimiento de la carcasa, se recomienda realizar perfiles térmicos rutinarios mientras el molino está en funcionamiento.

La comparación de los perfiles térmicos entre las ventanas de mantenimiento permitirá a los equipos de operaciones identificar el impacto de los cambios de proceso en el desgaste del molino. Los perfiles se verán afectados por la posición del sol sobre la carcasa, por lo que las mediciones deben realizarse a la misma hora todos los días. Como regla general:

- $\Delta T > 5^{\circ}\text{C}$  entre puntos adyacentes o
- $\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$  en todo el molino,

muestra que los diferenciales de temperatura empiezan a aumentar demasiado, lo que sugiere que se están formando zonas de compactación de medios.

La Figure 16 muestra varios perfiles de temperatura de un IsaMill™ M10.000 operando bajo diferentes condiciones y configuraciones internas. Las temperaturas exteriores de la carcasa se midieron en 14 puntos equidistantes a lo largo de la dirección axial del molino y luego se graficaron. El impacto de la configuración



interna en la distribución de los medios y el subsiguiente perfil de desgaste de los componentes internos es evidente.

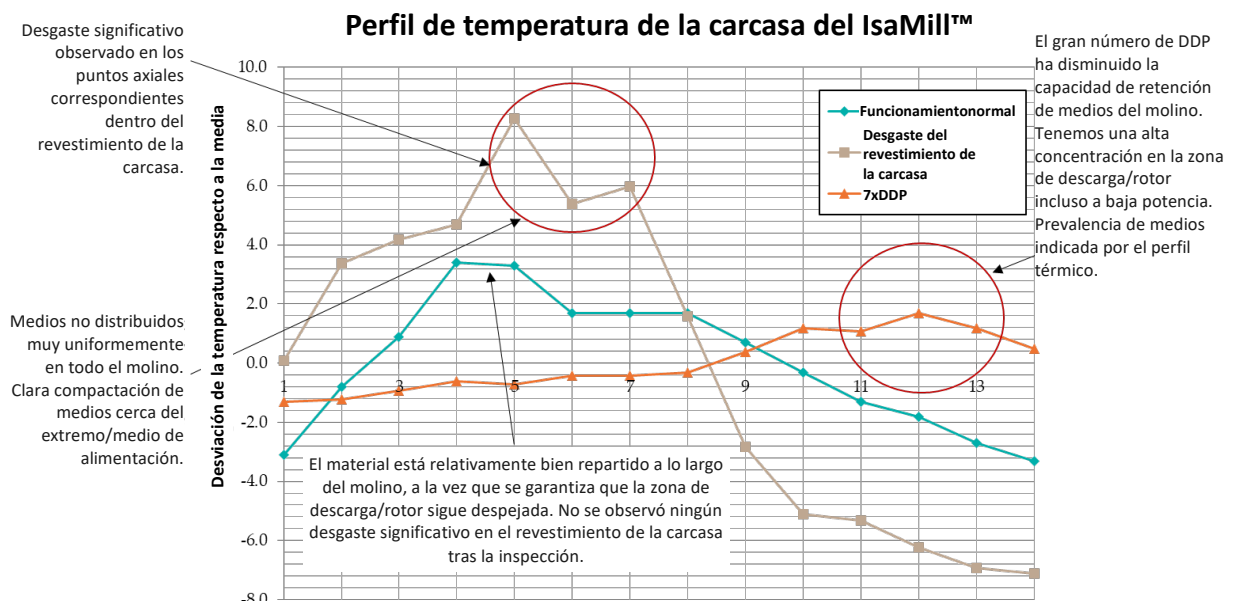


Figure 16: Estudios térmicos del IsaMill™ M10,000 (Glencore Technology, 2018c)

Existen estrategias para manipular las condiciones de operación del proceso y modificaciones a los componentes internos del IsaMill™ para desplazar la carga de medios dentro del molino. La Figura 17 muestra los factores que afectan la distribución de medios (a lo largo de la carcasa).

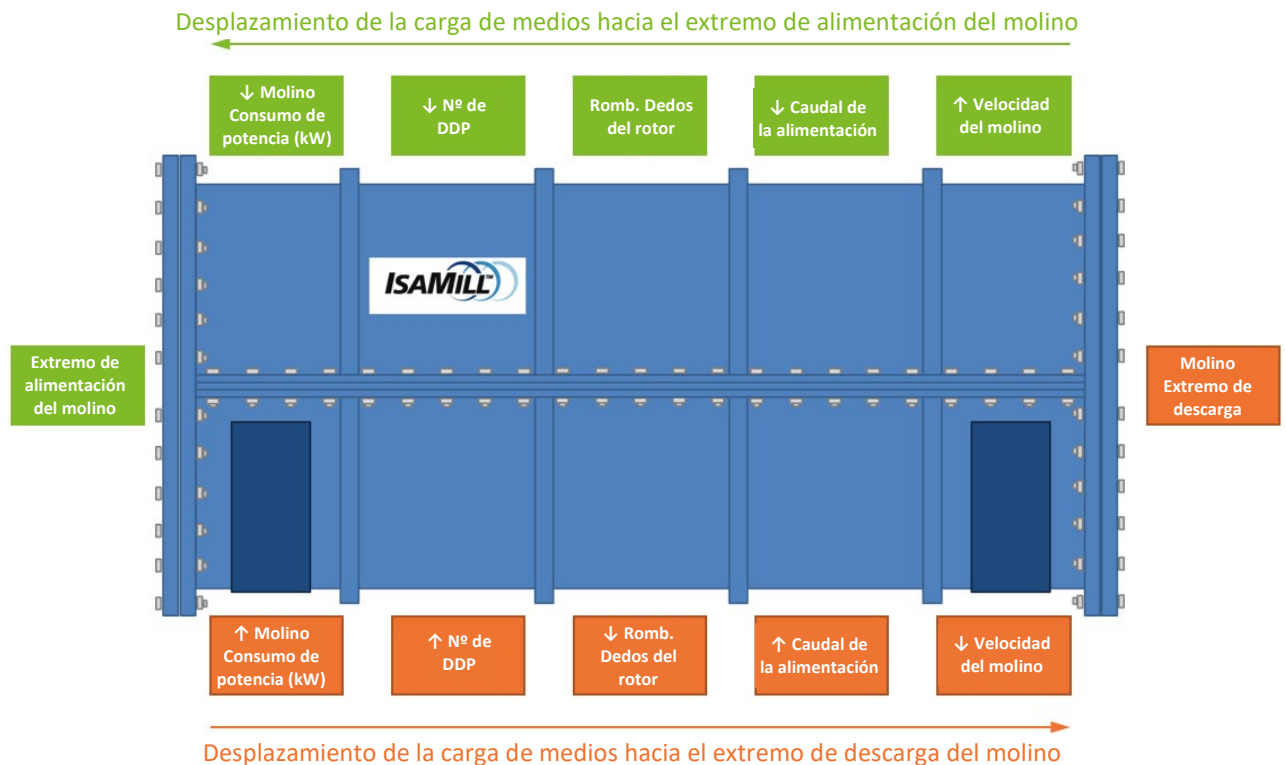


Figura 17: Factores que afectan la distribución de los medios en el IsaMill™ (Glencore Technology, 2018c)

Estos factores afectan el rendimiento por:



- Configuración de los componentes internos del IsaMill™:
  - Número de discos de diámetro pequeño (DDP): los discos de diámetro más pequeño dejan una mayor separación entre el disco y la carcasa, lo que permite más espacio para que el medio conserve su comportamiento fluidificado. La introducción de un disco de diámetro pequeño (DDP) en el punto identificado de compresión del medio proporciona más espacio, eliminando el calor de esa zona de compresión. Demostrado en la Figura 18.
  - Tipos de dedos del rotor (cuadrados vs. romboidales vs. degradados) en el separador de producto, cambiando la eficacia de la acción de bombeo del rotor. Al sustituir una fracción, o la totalidad, de los dedos cuadrados estándar por formas de dedos del rotor alternativas, el efecto de "bombeo hacia atrás" del rotor se alterna para permitir una mayor o menor capacidad de retención de medios dependiendo de los requisitos de caudal/consumo de potencia del molino.
- Flujo de alimentación del IsaMill™: Cuanto mayor sea el flujo volumétrico hacia el molino, mayor será la fuerza que empuje los medios hacia el extremo de descarga del molino.
- Viscosidad interna: si los medios retienen su comportamiento fluidizado y no se mueven como una sola unidad de tapón.
- Distribución granulométrica de alimentación: Las partículas muy gruesas de la alimentación pueden actuar como pseudo-medios, desplazando los medios de molienda hacia el extremo de descarga del molino.
- Velocidad del molino (solo molinos VSD): A medida que disminuye la velocidad del molino, el rotor se degradan (como se observa durante el arranque) y los medios se desplazan hacia el extremo de descarga del molino.
- Consumo de potencia: Cuanto mayor sea el volumen de medios en el molino para lograr una mayor potencia, más se extenderá la carga de medios por el molino.

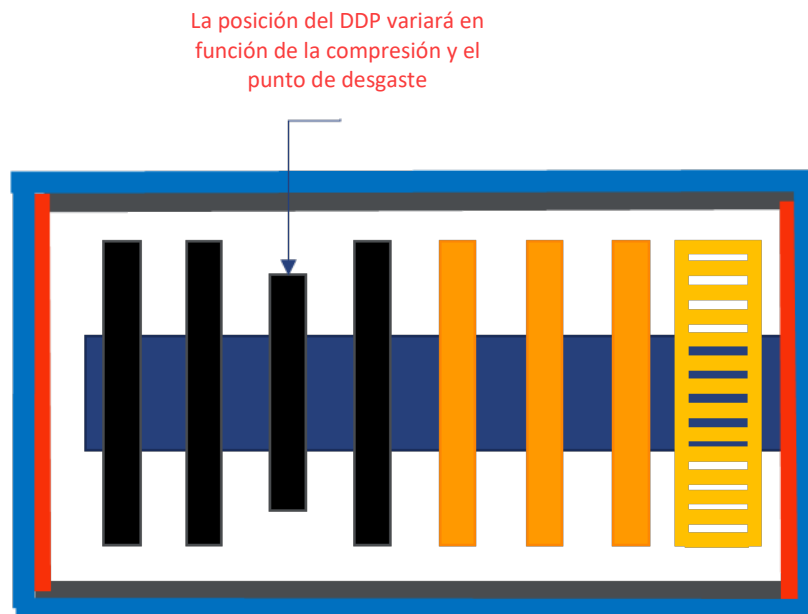


Figura 18: DDP instalados en la zona de compresión (Gurnett et al., 2023)

Los casos localizados de acumulación de calor en todo el molino también pueden abordarse utilizando selecciones alternativas de caucho, como los cauchos HD60 y GD70, formulados con compuestos para disipar el calor. Además, quitando un disco e instalando espaciadores más grandes, una configuración del IsaMill™ de siete discos, como se muestra en la Figura 18, aún puede aprovechar cerca del 100% de la potencia disponible del motor optimizando los componentes y las variables del proceso. GT ha trabajado con muchas instalaciones durante décadas para optimizar las configuraciones de los componentes internos de los IsaMills™ en todo el mundo.

## 7.2 HERRAMIENTAS PARA OPTIMIZAR

La medida más simple y fundamental de la condición de una planta de remolienda es el rendimiento de las operaciones unitarias aguas abajo, tales como flotación o lixiviación. Si el proceso de remolienda está logrando los resultados deseados, debería haber beneficios tangibles para el funcionamiento general de la planta (por ejemplo, recuperación, ley, consumo de reactivos). Los pequeños cambios graduales pueden pasar desapercibidos si se observan los datos a corto plazo. La consideración de tendencias a largo plazo garantiza la comparación de las condiciones antes y después de los aumentos observados en la tasa de desgaste. También es importante observar la estabilidad del proceso, no solo las medias a largo plazo. Es mucho más probable que un proceso inestable provoque un aumento de los índices de desgaste.

Al revisar regularmente las siguientes áreas, la solución de problemas dentro del circuito IsaMill™ puede convertirse en una rutina directa y confiable para mantener el rendimiento general de la planta:

- ¿No ha habido cambios en las condiciones del proceso IsaMill™? Revíselas, los siguientes parámetros son un buen punto de partida para la investigación:
  - a. Consumo de potencia del IsaMill™
  - b. Densidad de alimentación del IsaMill™
  - c. Presión de alimentación del IsaMill™
  - d. Rendimiento aguas arriba (recuperación de flotación, cambios en la molienda primaria/rendimiento del ciclón)
- ¿Se ha deteriorado la calidad de los medios? ¿Los medios son angulares y no se desgastan uniformemente?
- ¿Entran objetos extraños en el IsaMill? Los objetos más grandes como tuercas y pernos no están diseñados para ser molidos en el IsaMill™ y pueden dañar rápidamente los componentes internos.
- ¿Qué aspecto tiene el perfil de temperatura del IsaMill™? ¿Sugiere que puede haber compactación de los medios (grandes concentraciones localizadas de medios, creando "puntos calientes")?
- Realización de estudios regulares del circuito de remolienda, que debe incluir muestras de los siguientes flujos:
  - e. Alimentación fresca del circuito IsaMill™
  - f. Alimentación de IsaMill™
  - g. Descarga de IsaMill™
  - h. (Opcional) Descarga del Circuito del IsaMill™ - Combinación del rebose del ciclón y la descarga del IsaMill™ (instalado en configuración de circuito abierto).

Debido al reciclaje alrededor del IsaMill™, la alimentación fresca del molino (no la alimentación del molino) necesita utilizarse al calcular la energía específica (comparada con la potencia en el molino por tonelada de alimentación fresca tratada).

## 8.0 CONCLUSIÓN

Al revisar regularmente las condiciones de operación del IsaMill™ como se describe en este documento, los emplazamientos deben tener las herramientas para optimizar y mantener sus molinos agitados al más alto nivel. Mediante la optimización de la selección de medios, la comprensión de cómo la densidad y la viscosidad afectan la eficiencia del molino, y la simple orientación para la solución de problemas descrita en este documento, el plan para auditar los IsaMills™ existentes se puede aplicar a cualquier producto básico.

## REFERENCIAS

Glencore Technology., 2018a. IsaMill Commissioning – Module 5: Media, Powerpoint Slides, Glencore Technology, Brisbane

Glencore Technology., 2018a. IsaMill Commissioning – Module 9: Operations and Troubleshooting, Powerpoint Slides, Glencore Technology, Brisbane

Glencore Technology., 2018c. IsaMill Commissioning – Module 10: Wear Monitoring and Prevention, Powerpoint Slides, Glencore Technology, Brisbane

Gurnett, I., De Waal, H and Stieper, G, 2021. The IsaMill™ - 25 years of Stirred Milling. CIM 2021 Convention, May 3 - 6, Vancouver, B.C, Canada.

Gurnett, I., Martin, S., and Stieper, G., 2023. Course Grinding On a IsaMill™, 55th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference, January 17-19, 2023, Ottawa, Ontario, Canada.

Gurnett, I., Swann, A., Stieper, G, and Collier, L, 2022. Stirred Milling Design – Incorporating the IsaMill™ into the Jameson Concentrator. IMPC Asia Pacific, August 26-28, Melbourne, Victoria, Australia.

Johnston, H. E., 2014. Development of the Bench Scale IsaMill Signature Plot Test: Introducing the Eliason Test.

Magee. M., 2004. Metallurgist Training Modules- Classifier Theory and Operating Practice, PowerPoint slides, Xstrata Copper, Mt Isa.

Malvern, 2014. Basic principles of particle size analysis [online]. Available from: <<https://www.atascientific.com.au/wp-content/uploads/2017/02/AN020710-Basic-Principles-Particle-Size-Analysis.pdf>> [Accessed: 18 March 2022].