

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA LA EVALUACION DE CUERPOS MOLEDORES A ESCALA INDUSTRIAL(01)

Dr. Jainie Sepúlveda (02)

El presente documento detalla los principales aspectos a considerar en la planificación y desarrollo de una evaluación representativa y confiable de la calidad comparativa de cuerpos molidores alternativos.

En lo medular, se recomienda tener presente los siguientes aspectos que potencialmente podrían - en forma independiente o combinada - debilitar la confiabilidad de las conclusiones obtenidas:

-El parámetro más indicativo de la durabilidad de un cuerpo molidor es su constante cinética de desgaste, estimada a partir de la tasa específica de consumo (gr/KWH), debidamente corregida por el diámetro efectivo de los cuerpos recargados; cuidando que el nivel de carga en el molino se mantenga constante durante todo el periodo de evaluación.

-El periodo de evaluación debe abarcar como mínimo 6 meses, a contar de la fecha de término de la etapa inicial de purga del molino de prueba; la cual debe prolongarse por un lapso de tiempo no inferior al requerido para el consumo acumulado de 2 veces el contenido del molino. En consecuencia, no resulta recomendable planificar pruebas cuya duración sea inferior a los 12 meses de operación normal ininterrumpida.

-Idealmente, la evaluación se debe llevar a cabo en líneas de molienda idénticas y paralelas, sometidas a similares variaciones en sus condiciones operacionales (mineral de alimentación, fineza de producto, etc.)

La necesidad de tomar debida consideración de cada uno de estos factores resulta lógicamente más imperiosa en cuanto menor sea la real diferencia de calidad por cuantificar.

Palavras Chave: Avaliação de Corpos Moedores

Trabalho a ser apresentado para o I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização Benéficamente e Pelotização, Ouro Preto/MG, 14 a 17 de Outubro/96.(01)

Gerente Comercial-Moly Cop Chile-Engenheiro Civil Industrial/PHD em Metalurgia pela Universidade de Utah-USA.

INTRODUCCION

Existe hoy consenso general respecto de la importante incidencia del consumo de aceros en los costos operacionales en toda faena de molienda de minerales.

El costo asociado a dicho insumo estratégico depende simplemente de dos factores principales : precio y durabilidad o caudal de los cuerpos molidores. El criterio predominantemente utilizado por los usuarios para preferir un determinado producto frente a su competencia es el de costo-efectividad. Un producto es considerado costo-efectivo cuando garantiza el menor costo de aplicación, expresado típicamente en US\$/ton de mineral molida:

$$\text{Costo Efectivo} = \frac{\text{Precio} \times \text{Consumo}}{\text{Consumo}} \\ (\text{US\$ / ton molida}) \quad (\text{US\$ /ton Bolas}) \quad (\text{ton Bolas / ton molida})$$

Así, un producto de mayor precio puede ser costo-efectivo si su tasa de desgaste o consumo es suficientemente baja, dado que el costo efectivo es por definición el producto aritmético de ambas variables.

En cada caso particular, el precio siempre será conocido con certeza por cuanto es determinado por la oferta de los distintos proveedores alternativos. Sin embargo, no es siempre tan evidente cómo determinar las diferencias de calidad entre una variedad de producto específico y sus alternativas; de modo de poder verificar si un producto de menor precio y calidad sería o no costo-efectivo.

En este contexto, el presente documento aborda los fundamentos teóricos que soportan una vía de resolución de tales inquietudes, detallando los principales aspectos prácticos a considerar en la planificación y desarrollo de campañas de evaluación, a escala industrial, que sean estadísticamente representativas y concluyentes respecto de la calidad comparativa de cuerpos molidores alternativos.

MARCO TEORICO DE REFERENCIA

Cinética de Desgaste.

La teoría más ampliamente aceptada para caracterizar la cinética de consumo de cuerpos moleadores en molinos rotatorios es la denominada Teoría Lineal del Desgaste; según la cual, la tasa o velocidad de consumo del cuerpo moador es directamente proporcional a la área superficial expuesta por éste a los diversos mecanismos de desgaste (abrasión y/o corrosión):

$$\Omega_t = d(m)/d(t) = -K_m A_b$$

donde:

Ω_t = velocidad de desgaste, Kg/hr

m = peso de la bola, Kg; transcurridas t horas desde su ingreso al molino

A_b = área del cuerpo moador expuesta al desgaste, m²

K_m = constante cinética de desgaste, Kg/hr/m (máscica).

Equivalentemente, tomando en consideración la geometría del cuerpo moador (esfera o cilindro), se obtiene

$$d(d)/d(t) = -2K_m/p_b = -k_d$$

donde:

d = tamaño (diámetro) del cuerpo moador, transcurridas t horas desde su ingreso al molino; mm

p_b = densidad del cuerpo moador, gr/cm³

k_d = constante cinética de desgaste, mm/hr (lineal).

La expresión anterior es fácilmente integrable para el caso más frecuente de recarga con sólo un tamaño de cuerpos moleadores d^R (modalidad denominada monorecarga); obteniéndose:

$$d = d^R - k_d t \tag{3}$$

lo que indica que la reducción del tamaño del cuerpo moador es uniforme en el tiempo (cinética lineal).

Aplicación a Molinos Industriales.

La reposición o recarga de cuerpos moledores a molinos industriales debe ser idealmente continua, con el propósito de mantener su nivel de llenado tan estable como sea posible. Como ya se indicara, buscando la máxima simplicidad moledora, d. Bajo tales condiciones - reflejo de la linealidad de la Ecuación 3 anterior - se genera en el interior del molino una distribución uniforme de tamaños de cuerpos moledores (colitas), en función de los distintos tiempos de permanencia de cada elemento en el molino. Es decir, en teoría, dentro del molino deberá existir un número exactamente igual de bolas de cada tamaño posible de encontrar. En términos matemáticos, la función densidad numérica de esta distribución probabilística del tamaño es característica del diámetro único de recarga d^R y queda determinada por la expresión:

$$f_0(d) = 1/d^R ; \text{ para } 0 < d < d^R \quad (4)$$

de modo que el producto $f_0(d)d(d) = d(d)/d^R$ representa la fracción (numérica) de cuerpos moledores en el interior del molino con tamaño comprendido en el rango infinitesimal $[d, d + d(d)]$.

En su forma acumulada, esta función se reduce a la conocida expresión:

$$F_3(d) = (d/d^R)^4 ; \text{ para } 0 < d < d^R \quad (5)$$

donde $F_3(d)$ representa la fracción (máscica) de cuerpos moledores de tamaño inferior al diámetro, en la carga del molino. Respecto del exponente 4.0 en la relación anterior, cabe señalar que F. C. Bond empíricamente determinó y postuló un valor 3.8.

Dado que la tasa de consumo de cada cuerpo molidor es proporcional a su correspondiente área expuesta al desgaste, la integración de la Ecuación 1 - en el rango total de tamaños $[0, d^R]$ - permite demostrar que la tasa global de consumo

Ω_t correspondiente al conjunto de cuerpos moledores que constituyen el coliar, es consecuentemente proporcional al área total A (m²) expuesta por los mismos

$$\Omega_t = -k_m A = -p_b k_d A/2 \quad (6)$$

Para una política de monorecarga, con cuerpos moledores de tamaño d^R , el área total expuesta es inversamente proporcional a dicho tamaño de recarga : [ver NOTA]

$$a = (A/V_{ap}) = 8000(i-f)/d^R \quad (7)$$

donde:

a = área específica de la carga, m²/m³ (aparente)

V_{ap} = volumen aparente ocupado por los cuerpos molidores en el molino (incluyendo espacios vacíos intersticiales), m^3

f_v = fracción volumétrica de espacios vacíos intersticiales; típicamente, 40%.

(*) NOTA : Esta expresión se deriva de la integración de la función densidad (Ecuación 4), debidamente ponderada por el área expuesta por cada tamaño correspondiente, entre los límites $d_{min} = 0$ y $d_{max} = d^R$. En el caso de que la recarga sea efectuada sistemáticamente con dos diámetros d_1^R y d_2^R , en proporción r_1 r_2 , el área total expuesta se obtiene de la expresión:

$$a = (A/V_{ap}) = v_1 a_1 + (1-v_1) a_2$$

con:

$$= r_1 a_2 / [(1 - r_1) a_1 + r_1 a_2]$$

y donde las áreas unitarias a_1 y a_2 se calculan a partir de la Ecuación 7 para d_1^R y d_2^R respectivamente.

Finalmente, reemplazando en la Ecuación 6 anterior, se obtiene:

$$\Omega_t = -4000 k_d P_b (1-f_v) V_{ap} / d^R \quad (8)$$

La Energía Específica como Parámetro Cinético Controlante.

Por directa analogía a los procesos de cominución de minerales, resulta razonable postular que la cinética del desgaste sea similarmente dependiente de la intensidad energética del proceso; es decir, cuantos KWH de energía se está aplicando a cada tonelada de cuerpos molidores en la carga del molino Para tal efecto, se define

$$\Omega_E = 1000 Q \Omega_t / P \quad (9)$$

donde:

$$\Omega_E = \text{velocidad de consumo de cuerpos molidores, gr/KWH}$$

$$P = \text{potencia demandada por el molino, KW}$$

Luego, de la Ecuación 6:

$$\Omega_E = 1000 [-k_m A] [1/P] \quad (10)$$

equivalente a:

$$\Omega_E = - 1000 [k_m/(P/W)] (A/W) \quad (11)$$

com:

$$W = \rho_b (1 - f_v) V_{ap} = \text{peso total de la carga en el molino, ton}$$

Retomando la analogía antes indicada respecto de los procesos de cominución de minerales, es conveniente ahora definir la nueva constante cinética: [ver NOTA]

$$k_m^E = 1000 k_m/(P/W) \quad ; \text{ gr/m}^2/(\text{KWH/ton}) \quad (12)$$

para obtener:

$$\Omega_E = k_m^E (A/W) \quad (13)$$

que para el caso típico de una política de monorecarga con cuerpos moledores de tamaño d^R , se reduce a: (ver Ecuación 7)

$$\Omega_E = - 4000 k_d^E / d^R \quad (14)$$

con la constante cinética lineal : $k_d^E = 2 k_m^E / \rho_b$ expresada en [$\mu\text{m}(\text{KWH/ton})$] (ver Ecuación 2).

(* **NOTA:** En el modelo general de la cominución, se define la Función Selección Específica (S_i^E , ton/KWH) en términos de la Función Selección (S_i , min^{-1}), según: $S_i = S_i^E (P/H)$, donde H representa la cantidad total de mineral retenida en el molino.

Período de Purga.

Es importante destacar que una evaluación comparativa acuciosa sólo debe considerar antecedentes recolectados con posterioridad al término del período de purga o renovación completa de la carga de cuerpos moledores existente en el molino previo al inicio de la prueba. Este período de purga corresponde al lapso de tiempo requerido para el desgaste total del último cuerpo molidor cargado justamente antes del inicio de la evaluación y es calculable a partir de la Ecuación 3 anterior, con $d = 0$:

$$t_{\max} = d^R / K_d \quad (15)$$

Durante este período, el consumo acumulado de cuerpos moledores se deriva de la Ecuación 8 anterior:

$$-\Omega_{t_{\max}}/1000 = 4\rho b(1-fv)V_{sp} = 4W \quad !!! \quad (16)$$

concluyéndose que el consumo de cuerpos molidores durante el periodo de purga o desplazamiento total del coilar existente al inicio de la evaluación corresponde a 4 veces el contenido del molino W. Ello bajo el supuesto de que los cuerpos molidores originales son de calidad similar a los alternativos que se desea evaluar.

De esta forma, la estimación de los meses requeridos para la etapa de purga, en una aplicación específica cualquiera, es tan simple como el cálculo de la razón : [$4W / (\text{consumo promedio mensual})$]. Cabe destacar que tal valor es típicamente superior a 6 meses de operación normal del molino. Por ello, se considera aceptable presupuestar periodos de purga equivalentes a sólo 2W de consumo; considerando que transcurrido ese lapso, la proporción remanente del collar original sería prácticamente despreciable (inferior al 10% de la carga).

ANALISIS DE RESULTADOS

Aceptando la validez del marco teórico antes descrito, corresponde entonces medir la calidad comparativa de cuerpos molidores alternativos en términos de la magnitud relativa de sus respectivas constantes cinéticas de desgaste k_d^E , [$\mu\text{m} (\text{KWW}/\text{ton})$]. Así, menores valores de k_d^E son indicativos de un proceso de desgaste intrínsecamente más lento; lo que debe necesariamente reflejarse en una mayor durabilidad del producto en su aplicación.

Sin embargo, en la práctica industrial no es habitual medir la calidad del cuerpo molidor en función de constantes cinéticas, sino más bien sobre la base de distintas tasas específicas de consumo; tales como:

- Consumo por unidad de energía demandada, Ω_E (gr/KWH)
- Consumo por unidad de tiempo de operación, Ω_t (Kg/hr)
- Consumo por unidad de mineral procesado, Ω_M (gr/ton)

En este contexto, cualquiera sea el indicador de preferencia para el evaluador, se concluye entonces que el cuerpo molidor que presente la menor tasa de consumo es el de mejor calidad comparativa (aunque no necesariamente costo-efectivo, si se considera también su precio relativo).

Cada uno de estos indicadores de consumo pueden estar afectos a distorsiones propias de las condiciones operacionales de la evaluación y las características de los cuerpos molidores en competencia. El marco teórico reseñado en la sección anterior, permite identificar los riesgos de extraer conclusiones finales equivocadas y tomar oportunamente las medidas correctivas pertinentes; tal como se discute para cada caso en los párrafos siguientes:

Consumo por Unidad de Energía Demandada, Ω_E (gr/KWH)

Este es el indicador más representativo y adecuado para caracterizar la durabilidad de un cuerpo molidor. No obstante, es preciso tomar algunas precauciones.

Retomando la Ecuación 14 anterior:

$$\Omega_E = -4000k_d^E / d^R \quad (14)$$

es posible que dos tipos de cuerpos molidores de calidad significativamente distinta $[(k_d^E)_2 > (k_d^E)_1]$ puedan exhibir iguales tasas de consumo $[(\Omega_E)_2 = (\Omega_E)_1]$ si el diámetro del producto de menor calidad es ligeramente mayor que el estándar $(d_2^R > d_1^R)$:

$$(\Omega_E)_2 / (\Omega_E)_1 = [(k_d^E)_2 / (k_d^E)_1] [(d_1^R / d_2^R)] \quad (17)$$

como por ejemplo,

$$(1.0) = (1.03)(0.97)$$

en cuyo caso se podría erróneamente concluir que ambos tipos de cuerpos molidores son de igual calidad; en circunstancias que el producto alternativo es de hecho 3% peor. Esta diferencia resultaría inadvertida - en términos de Ω_E - si el a diámetro de recarga del producto alternativo fuera al menos 3% mayor que el estándar.

La fabricación de cuerpos molidores de tamaño ligeramente superior al nominal es bastante generalizada (por consideraciones de productividad en su manufactura) y se conoce como sobrepeso. Así, es frecuente encontrar bolas de peso 10-15 % superior al nominal, cuyo diámetro es en consecuencia 3-5 % mayor que el indicado.

Dada la importancia del tamaño real del cuerpo molidor en este tipo de análisis, en el Anexo A del presente documento se propone un sencillo método para su determinación en terreno, recomendable de aplicar cada vez que se lleve a cabo una evaluación de este tipo.

Consumo por Unidad de Tiempo de Operación, Ω_i (Kg/hr)

La debida utilización de este indicador requiere de otras precauciones adicionales a las ya señaladas, las que se discuten a continuación en el marco de la Ecuación 8 anterior:

$$\Omega_i = - 4000 k_d \rho_b (1 - f_i) V_{ap}/d^R \quad (8)$$

de la cual se desprende que dos tipos de cuerpos molidores de calidad significativamente distinta [$(k_d)_2 > (k_d)_1$] podrían exhibir iguales tasas de consumo [$(\Omega_i)_2 = (\Omega_i)_1$] si - además del sobrepeso - se tolera inadvertidamente la operación del molino recargado con el producto de menor calidad - y posiblemente de menor densidad [$(\rho_{ap})_2 < (\rho_{ap})_1$] - a un nivel de llenado ligeramente inferior [$(V_{ap})_2 < (V_{ap})_1$]:

$$(\Omega_i)_2 / (\Omega_i)_1 = [(k_d)_2 / (k_d)_1] [(\rho_{ap})_2 / (\rho_{ap})_1] [(V_{ap})_2 / (V_{ap})_1] [(d_1^R / d_2^R)] \quad (18)$$

como por ejemplo,

$$(1.00) = (1.11)(0.98)(0.95)(0.97)$$

condición en la cual se podría erróneamente concluir que ambos tipos de cuerpos molidores son de igual calidad; en circunstancias que el producto alternativo es de hecho 11% peor !. En este ejemplo, esta importante diferencia no sería detectada en términos de Ω_i - si el diámetro de recarga del producto alternativo fuera al menos 3% mayor que el estándar y además se operara a un nivel de carga 5% inferior con cuerpos molidores 2% menos densos.

En cuanto al nivel de llenado V_{ap} , la referida Ecuación 8 resalta la necesidad de controlarlo y medirlo lo más acuciosamente posible durante toda la evaluación. La metodología tradicionalmente utilizada se apoya en la relación geométrica aproximada:

$$(V_{ap}/V) = 1.12-1.24(H/D) \quad (19)$$

donde:

- V = voiumen interior del molino, m³
 D = diámetro interior del molino,
 H = altura libre entre el nivei de carga (horizontal, en reposo, sobre el eje central del molino) y el punto más alto en su interior, m.

Por esta expresión, se constata fácilmente que - en el entorno del típico 40% de lienado aparente - cada 1% de error en la medición de la razón (H/D), representa aproximadamente un 1.8% de error en la estimación de Vap. Se confirma por lo tanto la dificultad práctica de estimar el nivel de llenado de un molino con suficiente precisión que permita - a la luz de la Ecuación 8 - estimar con suficiente confiabilidad el valor de la tasa de desgaste k_d .

Con relación al efecto de la densidad de los cuerpos moledores, el procedimiento experimental propuesto en el Anexo A para la medición del diámetro real del cuerpo molidor permite además detectar diferencias significativas en ρ_b . En tal sentido, es generalmente aceptado que, debido a su mayor porosidad interna, los cuerpos moledores flindidos pueden tener una densidad hasta un 2% menor que las bolas de acero forjado o laminado. De mayor relevancia aún, dado que la densidad de la carga afecta proporcionalmente la potencia demandada por los molinos, es de esperar entonces que, para un mismo nivel de lienado y demás condiciones operacionales, la potencia - y por ende la capacidad de tratamiento - de un molino cargado con bolas fundidas sea hasta un 2% menor que la de un molino similar recargado con bolas forjadas o laminadas.

Ciertamente, es muy difícil verificar estas pequeñas diferencias en la práctica; las que no por ello dejan de ser económicamente significativas en el mediano y largo plazo.

Consumo por Unidad de Mineral Procesado, Ω_M (gr/ton)

Este indicador - por cierto, es de mayor difusión práctica - es claramente el menos recomendable de utilizar como referencia en este tipo de evaluaciones comparativas por estar afecto a factores netamente operacionales, absolutamente ajenos a la calidad de los cuerpos moledores, tal como se ilustra a partir de la identidad dimensional:

$$\Omega_M = \Omega_F \times E$$

(gr /ton) (gr/KWH) (KWH/ton)

donde E (la energía específica consumida por tonelada de mineral beneficiado) depende exclusivamente de la tarea de molienda, constituida - según F. C. Bond por la dureza del mineral (W_{i0}) y sus tamaños de alimentación (F_{80}) y producto (F_{80}). Al

mismo tiempo, la expresión anterior revela que todo posible efecto sobre Ω_M asociado a la calidad del cuerpo moedor está contenido en el primer factor; es decir, el consumo de acero por unidad de energía demandada Ω_E ya descrito. De esta forma se conciuye que el índice \sim al ser necesariamente corregido por variaciones en la tarea de molienda según la Ecuación 20, resulta del todo equivalente a Ω_E .

EJEMPLO DE APLICACION

Para mayor claridad respecto de las implicancias prácticas de la argumentación anterior, se detalla a continuación un ejemplo de una evaluación hipotética comparativa, a escala industrial, entre dos tipos alternativos de cuerpos mole dores.

El Anexo B adjunto contiene los antecedentes recopilados durante 20 meses de operación de dos líneas de molienda idénticas y paralelas. En el caso del Molino 2, los meses 1 a 8 corresponden al período de purga con bolas alternativas de 54 mm \varnothing y los siguientes 6 meses al período de evaluación propiamente tal. Como referencia, se presenta también la información de los 6 meses inmediatamente anteriores al inicio de la purga. Mientras tanto, el Molino 1 se mantuvo sin variaciones en su política de recarga con bolas estándar de 52 mm \varnothing durante todo el período en referencia.

Las Figuras 1 a 4 adjuntas representan gráficamente la evolución del comportamiento operacional de ambos molinos, donde queda de manifiesto la alta variabilidad típica de su respuesta; sea por cambios en el mineral o por simple error experimental en la obtención de los datos.

A partir de tales antecedentes, es posible determinar los distintos indicadores alternativos de consumo antes referidos, para luego efectuar ai menos los siguientes dos tipos de comparaciones:

- **Evaluación Secuencial**, que consiste en comparar los antecedentes históricos dei Molino 2 en prueba, antes y después de la purga.
- **Evaluación Simultánea**, que consiste en comparar los antecedentes pareados dei Molino 2 en prueba contra los del Molino 1 operando en paralelo bajo condiciones estándar, una vez completada la purga.

En el primer caso, la información disponible indicaria lo siguiente:

Tabla 1. Evaluación Secuencial (Molino 2)

Período Pre Purga	Período Post Purga	Variación,
----------------------	-----------------------	------------

TRATAMIENTO

ton/ahr	100.5	104.8	4.3
P80	148.0	170.0	14.5

ENERGIA

KW	838.0	804.0	(4.1)
KWH/ton	8.3	7.7	(8.0)

CONS. BOLAS

gr/ton	505.0	506.0	0.2
Kg/ahr	50.8	53.0	4.4
gr/KWH	60.6	66.0	8.9

Si el análisis se basara exclusivamente en Ω_M (gr/ton), tal como ilustra también la Figura 1, la conclusión en primera instancia sería que la calidad de las bolas alternativas sería muy similar a las estándar (?). Más aún, algún analista podría incluso postular un incremento importante en la tasa de tratamiento (4.3%), gracias a las nuevas bolas (?). Sin embargo, no es permisible ignorar el importante cambio en la tarea de molienda, reflejado éste por la reducción de la potencia del molino (4.1%) y el significativo engrosamiento de P_{80} (14.5%), sin que se haya detectado variación alguna en la dureza del mineral (ver W_{10} , Anexo B).

Por otra parte, en términos de Ω_E (gr/KWH), se detecta muy claramente un incremento sistemático en el consumo durante el período de purga, hasta alcanzar un significativo 8.9% (ver Figura 3). Ciertamente, la misma variación porcentual se obtiene Ω_M es debidamente corregido por la variación en la energía específica E (KWH/ton) [ver Ecuación 20].

Por último, el indicador Ω_t (Kg/ahr) registra sólo parcialmente el incremento en consumo, debido a la leve e inadvertida reducción del nivel de llenado de los molinos (menor potencia).

La Evaluación Simultánea o Paralela - en este ejemplo particular - muestra distintas magnitudes relativas entre los diversos indicadores de consumo, aunque la conclusión final es básicamente la misma:

Tabla 2. Evaluación Simultánea (Molino 2 vs Molino 1)

	Molino 1 Post Purga	Molino 2 Post Purga	Variación,
TRATAMIENTO			
ton/ahr	103.4	104.8	1.4
P80	156.0	170.0	9.0
ENERGIA			
KW	845.0	804.0	(4.9)
KWH/ton	8.2	7.7	(6.1)
CONS. BOLAS			

grlton	496.0	506.0	2.0
Kglhr	51.2	53.0	3.5
gr/KWH	60.6	66.0	8.9

En este caso, se observa también un cambio en la tarea de molienda del Molino 1 hacia un mayor tratamiento y un producto más grueso; pero todavía más fino que la línea paralela, gracias a su mayor demanda de potencia.

Por otra parte, en términos de Ω_E (gr/KWH), se detecta muy claramente un incremento sistemático en el consumo durante el periodo de purga, hasta alcanzar un significativo 8.9% (ver Figura 3). Ciertamente, la misma variación porcentual se obtiene Ω_M es debidamente corregido por la variación en la energía específica E (KWH/ton) [ver Ecuación 20].

Por último, el indicador Ω_i (Kg/hr) registra sólo parcialmente el incremento en consumo, debido a la leve e inadvertida reducción del nivel de llenado de los molinos (menor potencia).

La Evaluación Simultánea o Paralela - en este ejemplo particular - muestra distintas magnitudes relativas entre los diversos indicadores de consumo, aunque la conclusión final es básicamente la misma:

Tabla 2. Evaluación Simultánea (Molino 2 vs Molino 1)

	Molino 1 Post Purga	Molino 2 Post Purga	Variación, %
TRATAMIENTO			
ton/hr	103.4	104.8	1.4
P80	156.0	170.0	9.0
ENERGIA			
KW	845.0	804.0	(4.9)
KWH/ton	8.2	7.7	(6.1)
CONS. BOLAS			
grlton	496.0	506.0	2.0
Kglhr	51.2	53.0	3.5
grlKWH	60.6	66.0	8.9

En este caso, se observa también un cambio en la tarea de molienda del Molino 1 hacia un mayor tratamiento y un producto más grueso; pero todavía más fino que la línea paralela, gracias a su mayor demanda de potencia.

Es claro que la reducción en el nivel de llenado del Molino 2 no hubiera ocurrido si se hubiere incrementado adecuadamente su tasa de recarga de bolas. En tal caso, el mayor consumo de bolas se habría hecho igualmente explícito, incluso en términos de Ω_M (gr/ton). En otras palabras, la menor demanda de potencia del Molino 2 es consecuencia directa y exclusiva de la peor calidad de las bolas alternativas.

Para determinar finalmente la diferencia intrínseca entre ambos tipos de bolas, falta sólo corregir por el diámetro real de las bolas, según se desprende de la Ecuación 17 anterior:

$$\begin{aligned} [(k_d^E)_2 / (k_d^E)_1] &= [(\Omega_E)_2 / (\Omega_E)_1] [(d_2^R / d_1^R)] \quad (17) \\ &= [66.0/60.6] [54/52] \\ &= 1.13\% \end{aligned}$$

es decir, para mantener iguales condiciones operacionales en ambos molinos, la tasa de recarga de las bolas alternativas debiera ser 13% mayor que la tasa estándar!!!

COMENTARIO FINAL

En conclusión - reforzando el contenido de las secciones anteriores existiría suficiente base teórica y práctica para confiar en la viabilidad de llevar a cabo evaluaciones comparativas estadísticamente representativas y conciuentes. Reconociendo las múltiples complejidades del tema, el presente documento fue preparado con el preciso propósito de crear conciencia respecto de las limitaciones operacionales existentes y a la vez proponer las correcciones pertinentes que permitan mejorar la confiabilidad de las conclusiones a obtener respecto de materias que, como se seflalara en los párrafos introductorios, son de alta relevancia técnico/económica en toda faena de molienda.

Anexo A

METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DEL DIAMETRO EFECTIVO Y DENSIDAD DE LOS CUERPOS MOLEDORES DE RECARGA

A. Materiales:

- Recipiente de volumen conocido V
- Muestra representativa de N cuerpos moledores.
- Agua limpia.
- Balanza de precisión.

B. Mediciones:

- Pesar = recipiente vacío.
- Pesar = recipiente con agua hasta completar el volumen V.
- Pesar = recipiente con N cuerpos moledores (sin agua).
- Pesar = recipiente con N cuerpos moledores y agua hasta completar el volumen V.

C. Cálculos:

- Volumen Efectivo de los Cuerpos Moledores:

$$V = [(\omega_2 - \omega_1) - (\omega_4 - \omega_3)]/N$$

- Diámetro Efectivo de los Cuerpos Moledores:

$$d^R = (6v/\pi)^{1/3}$$

- Densidad de los Cuerpos Moledores:

$$\rho_b = (\omega_3 - \omega_1) / [(\omega_2 - \omega_1) - (\omega_4 - \omega_3)]$$

Importante Repetir 3 veces con distintas muestras de cuerpos moledores y promediar.

preparado con el preciso propósito de crear conciencia respecto de las limitaciones operacionales existentes y a la vez proponer las correcciones pertinentes que permitan mejorar la confiabilidad de las Conclusiones a obtener respecto de materias que, como se señalara en los párrafos introductorios, son de alta relevancia técnico/económica en toda faena de molienda.

Figura 1

**CONSUMO ESPECIFICO DE BOLAS
gr/ton**

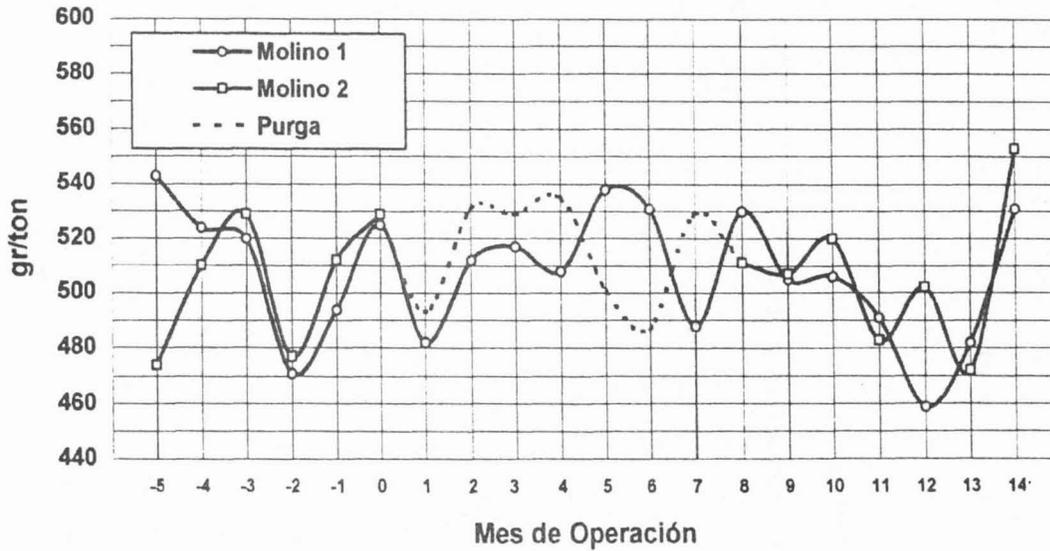


Figura 2

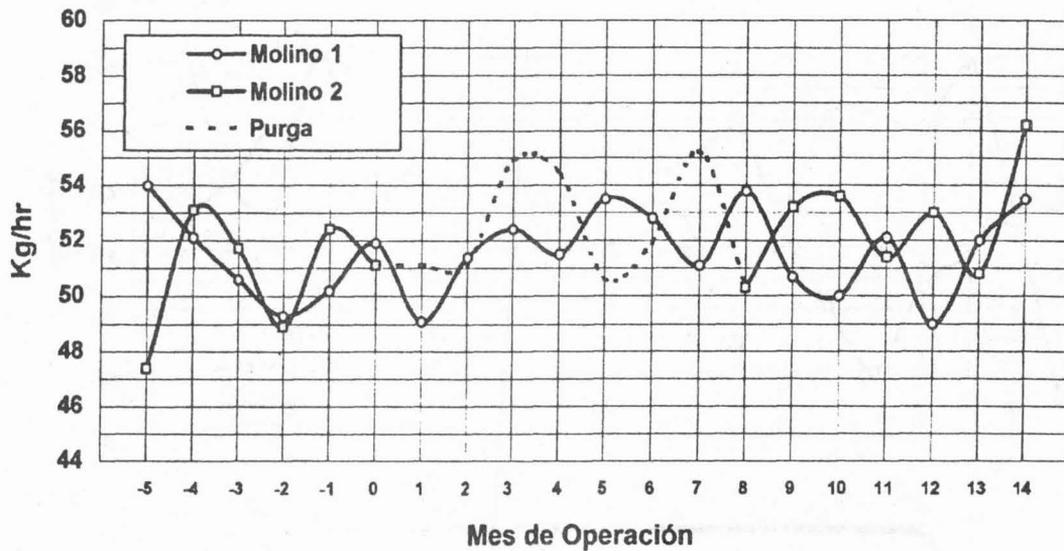
CONSUMO ESPECIFICO DE BOLAS
Kg/hr

Figura 3

CONSUMO ESPECIFICO DE BOLAS
gr/KWH

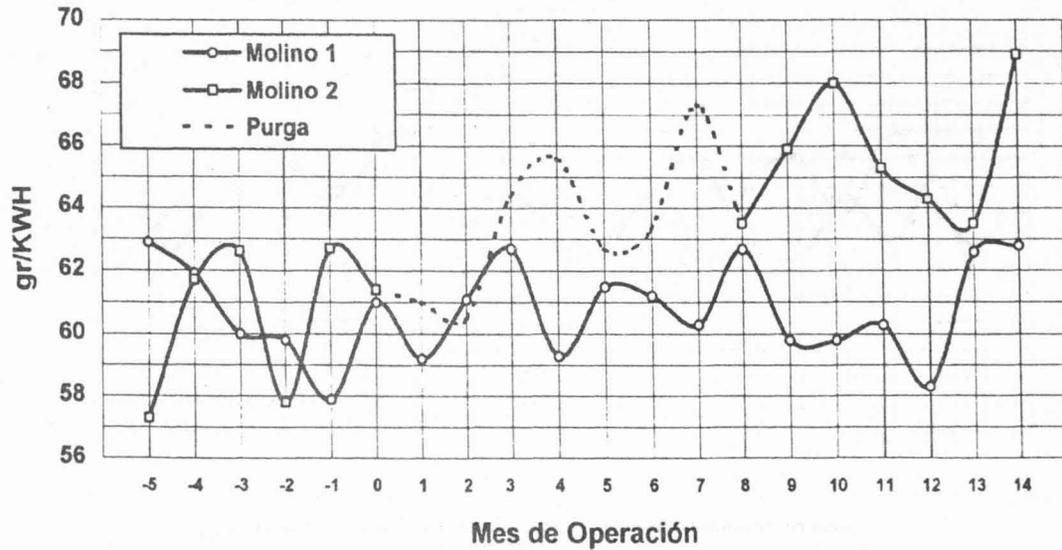
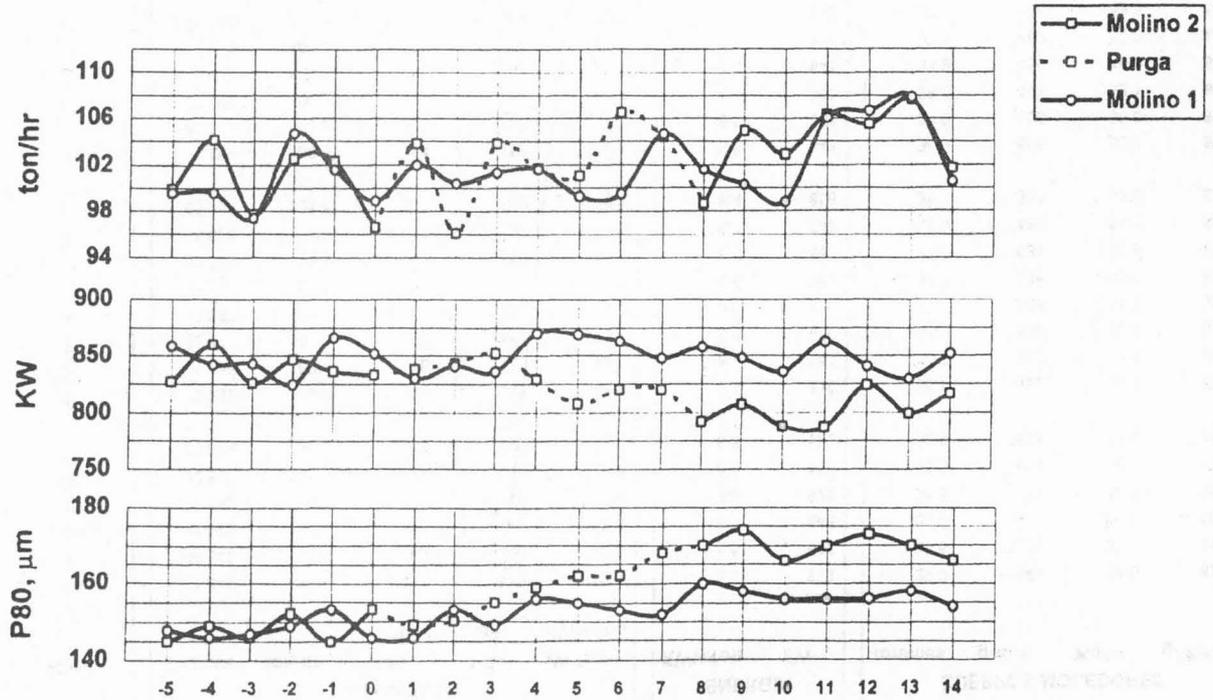


Gráfico 4

EFICIENCIA OPERACIONAL



Ejemplo de Aplicación
RESUMEN DE ANTECEDENTES OPERACIONALES
Molino 1 : Monorecarga con Bolas de 52 mmφ (estándar)

Bola	Mes	TRATAMIENTO					ENERGIA		CUERPOS MOLEDORES			
		ton/mes	ton/hr	F80 μm	P80 μm	Wi Oper. KWH/ton	KWH/ton	KW	ton/mes	gr/ton	Kg/hr	gr/KWH
Std	-5	71.849	99.6	4,971	148	12.7	8.6	859	39.0	543	54.0	62.0
Std	-4	64.246	99.6	4,745	146	12.4	8.5	842	33.6	524	52.1	61.9
Std	-3	71.025	97.4	5,225	147	12.6	8.7	843	36.9	520	50.6	60.0
Std	-2	73.140	104.7	5,035	149	11.6	7.9	825	34.5	471	49.3	59.8
Std	-1	72.552	101.6	4,941	153	12.8	8.5	866	35.8	494	50.2	57.9
Std	0	69.809	98.9	5,077	146	12.5	8.6	852	36.6	525	51.9	61.0
Std	1	73.592	102.0	4,948	146	11.9	8.1	830	35.5	482	49.1	59.2
Std	2	71.736	100.4	5,118	153	12.5	8.4	841	36.7	512	51.4	61.1
Std	3	71.471	101.3	5,163	149	12.1	8.3	836	37.0	517	52.4	62.7
Std	4	73.292	101.6	4,942	156	13.0	8.6	870	37.2	508	51.5	59.3
Std	5	68.653	99.3	5,129	155	13.2	8.8	869	37.0	538	53.5	61.5
Std	6	72.581	99.5	5,040	153	13.0	8.7	863	38.5	531	52.8	61.2
Std	7	75.529	104.7	4,912	152	12.1	8.1	848	36.9	488	51.1	60.3
Std	8	66.208	101.6	4,801	160	13.1	8.4	858	35.1	530	53.8	62.7
Std	9	73.104	100.3	5,064	158	12.9	8.5	848	36.9	505	50.7	59.8
Std	10	69,016	98.8	5,239	156	12.8	8.5	836	34.9	506	50.0	59.8
Std	11	77,354	106.1	4,902	156	12.4	8.1	863	38.0	491	52.1	60.3
Std	12	73,734	106.7	5,142	156	11.9	7.9	841	33.9	459	49.0	58.3
Std	13	77,871	107.9	4,823	158	11.8	7.7	830	37.5	482	52.0	62.6
Std	14	71,880	100.6	5,028	154	12.7	8.5	852	38.2	531	53.5	62.8
Promedios												
	Primeros 6 meses	70,437	100.3	4,999	148	12.4	8.5	848	38.1	513	51.4	60.6
	Ultimos 6 meses	73,826	103.4	5,033	156	12.4	8.2	845	38.6	496	51.2	60.6
	Δ, %	4.8	3.1	0.7	5.4	(0.2)	(3.3)	(0.3)	1.3	(3.3)	(0.3)	0.0