

## **cómo determinar la carga correcta de elementos de molienda para conseguir la máxima producción**

**R. C. JENNESS**

*Pit and Quarry, octubre 1967, pág. 139*

Puesto que el ritmo de producción de un molino rotatorio es proporcional a la energía consumida, es importante que esta máquina trabaje con la energía para la que ha sido proyectada. Un porcentaje específico en el grado de carga requiere una cantidad de energía conveniente, cuando las demás variables del proceso de molienda permanecen constantes.

Para asegurar una velocidad de producción máxima y constante, es importante establecer y mantener el grado óptimo de carga. Cualquier disminución en dicho grado de carga rebajará la producción máxima del molino. Idealmente, sería deseable sustituir los elementos de molienda tal como se emplean a fin de mantener la capacidad máxima.

Para establecer la medida de la energía, todos los instrumentos deben de ajustarse adecuadamente. Como la exigencia es la entrada actual de energía al eje del motor, debe de considerarse la eficiencia de dicho motor.

Las medidas de energía en una instalación de molienda deben tomarse en condiciones de equilibrio. Si la medida de energía en la molienda es  $P_m$  y la energía diseñada para el molino  $P_d$ , entonces el multiplicador de ajuste de energía requerido es:

$$P_a = \frac{P_d}{P_m} \quad [1]$$

El porcentaje de carga debe determinarse para cada compartimiento en la condición de energía ( $P_m$ ) empleada en la ecuación anterior. Para establecer esta carga, se toman diversas medidas a lo largo del compartimiento para obtener un valor medio de la distancia entre el eje del molino y la superficie media. Las placas de revestimiento también determinan el diámetro interior para cada compartimiento.

La figura 1 es un gráfico de porcentaje de carga basado en el volumen total del molino frente al diámetro interior considerando las placas de revestimiento. La familia de curvas representadas indican distancia del eje del molino a la superficie media. Con este gráfico puede determinarse fácilmente el grado de carga para cada cámara.

Las variaciones en la energía de molienda en relación con el grado de carga dependen del tipo de carga como se demuestra en la figura 2. Este gráfico señala una energía

100 % cuando el molino se carga al 40 % de su volumen tanto para bolas como para varillas. Para encontrar el porcentaje de carga que debe añadirse, debe averiguarse el factor (Pfm) para el molino. Esto se hace entrando por el eje de ordenadas en el porcentaje de carga y determinando el factor de energía en la abscisa coincidente con la curva de energía en este valor del porcentaje de carga. El factor de energía requerido para aumentar la energía del molino al valor proyectado viene dado por:

$$P_{frm} = P_{fm} \cdot P_a. \quad [2]$$

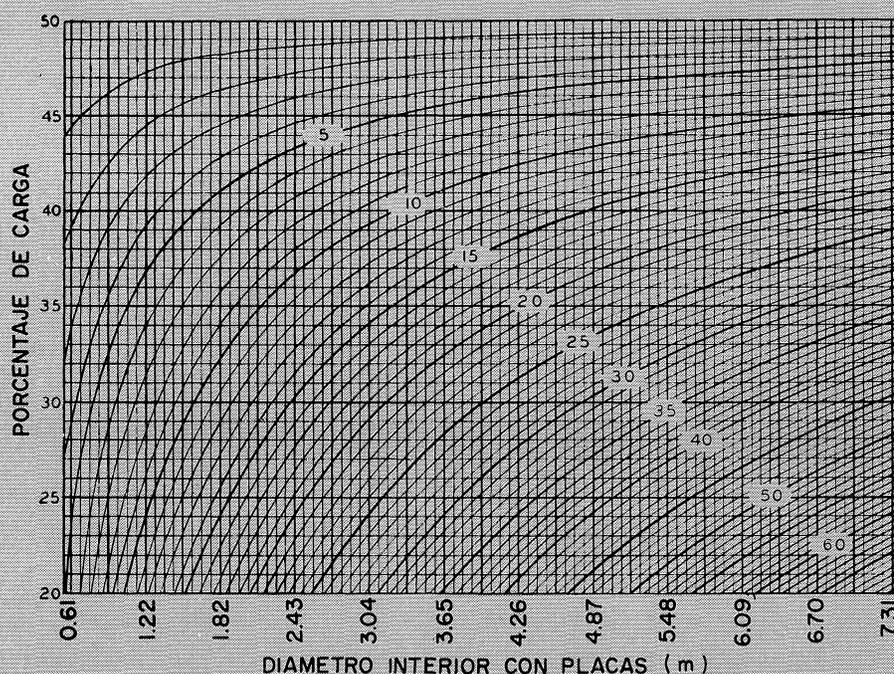


Fig. 1.- Gráfico de porcentaje de carga frente a diámetro del molino con líneas de distancia constante entre el eje del molino y la superficie de carga en metros.

La ecuación general para calcular el factor de energía del molino (Pfm), es la siguiente:

$$P_{fm} = \frac{(P_{fd2})}{(P_{fd1})} \cdot \frac{(P_{f1} \cdot L_1)}{(L_m)} + \frac{(P_{f2} \cdot L_2)}{(L_m)} + \frac{(P_{f3} \cdot L_3)}{(L_m)} \quad [3]$$

Como la carga proyectada para molinos de varias cámaras puede ser menor en el primer compartimiento, el primer término debe de multiplicarse por la relación de factores de energía proyectados Pfd2/Pfd1. Los números de la ecuación [3] indican el número de compartimientos.

En cada compartimiento se requiere el factor de energía y su longitud.

Después de establecer el factor de energía necesario para elevar la energía de molienda al nivel proyectado, debe determinarse el grado de carga equivalente a este factor

de energía, empleando la figura 2. Para molinos de varias cámaras, donde el primer compartimiento contiene una carga distinta del proyecto original, el factor de energía requerido para este compartimiento debe reajustarse como sigue:

$$P_{fr1} = \frac{P_{fd1}}{P_{fd2}} \cdot P_{frm}. \quad [4]$$

El grado de carga requerido para la primera cámara se determina entonces por medio de la figura 2.

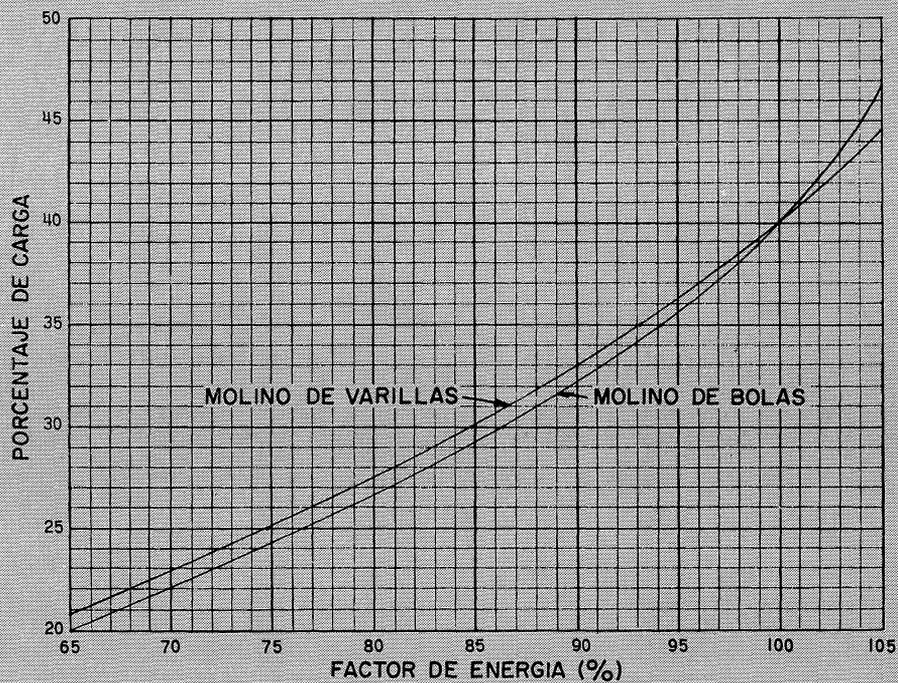


Fig. 2.—Gráfico de porcentaje de carga frente a factor de energía para molinos rotatorios.

Una vez obtenidas las necesidades de carga para cada compartimiento, se determina la cantidad de elementos a añadir empleando el nomograma de la figura 3.

Un ejemplo servirá para aclarar todo el procedimiento: Supongamos un molino que consta de una cámara de 3,65 m de longitud y 2,74 m de diámetro con varillas y una cámara de 7,92 m de longitud y 2,74 m de diámetro interior con bolas; está proyectado para arrastrar 1.250 hp y sólo consume 1.150 hp. En el proyecto original, el compartimiento de varillas requería alrededor del 35 % de carga y el de bolas aproximadamente el 40 %. El multiplicador de ajuste de energía para la ecuación [1] es:

$$P_a = \frac{P_d}{P_m}, \quad P_a = \frac{1.250}{1.115}, \quad P_a = 1,121.$$

El nivel medio del primer compartimiento mide 0,52 m por debajo del eje del molino. El diámetro interior de la cámara es 2,59 m. Entrando por las abscisas de la figura 1 en 2,59 m, encontramos que este compartimiento tiene 25 % de carga, a una distancia de 0,52 m por debajo del eje del molino.

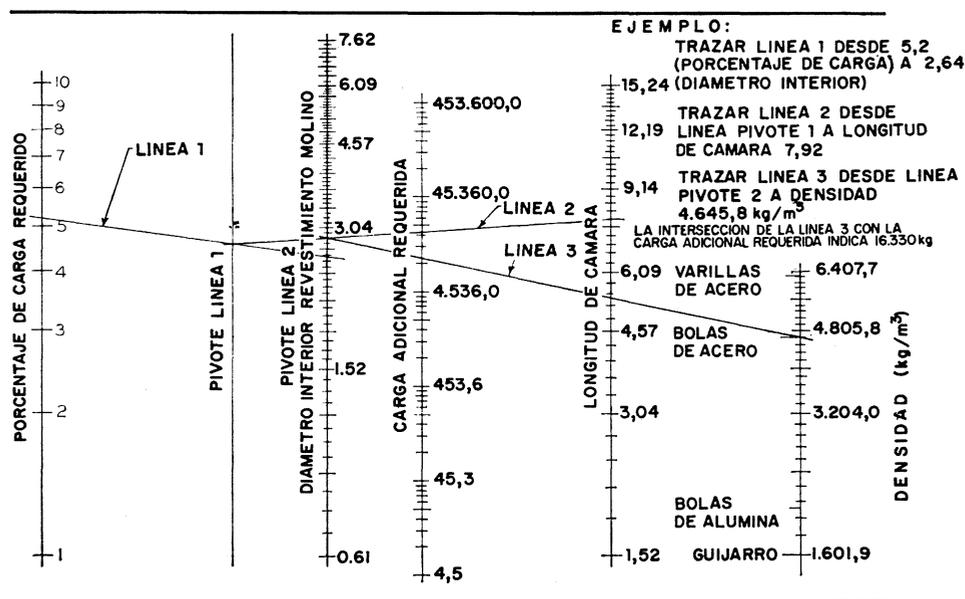


Fig. 3.—Nomograma para determinar la carga adicional requerida cuando se conocen: 1. porcentaje de carga requerida, 2. diámetro interior del molino, 3. longitud de la cámara, y 4. densidad de los elementos de molinero.

El nivel medio del segundo compartimiento mide 0,39 m por debajo del eje del molino. El diámetro interior es de 2,64 m, resultando un 31 % de carga, de acuerdo con la figura 1.

El factor de energía requerido, para el molino, de acuerdo con la ecuación [2], es:

$$P_{frm} = P_{fm} \cdot P_a,$$

$$P_{frm} = P_{fm} \cdot 1,121.$$

De acuerdo con la ecuación [3], el factor de energía del molino ( $P_{fm}$ ) es igual a:

$$P_{fm} = \frac{(P_{fd2})}{(P_{fd1})} \frac{(P_{f1} \cdot L_1)}{(L_m)} + \frac{(P_{f2} \cdot L_2)}{(L_m)},$$

donde:

$$P_{fd1} = 0,932;$$

$$P_{fd2} = 1,00;$$

$$P_{f1} = 0,747 \text{ para } 25 \% \text{ de carga,}$$

$$P_{f2} = 0,880 \text{ para } 31 \% \text{ de carga;}$$

$$L_1 = 3,65 \text{ m;}$$

$$L_2 = 7,92 \text{ m;}$$

$$L_m = 11,58 \text{ m;}$$

$$P_{fm} = 0,885.$$

Y de acuerdo con la ecuación [2], el factor de energía requerido para el molino es:

$$P_{frm} = 0,958.$$

Pero, como la primera cámara tiene proyectada una carga más baja, el factor de energía requerido para esta primera cámara, de acuerdo con la ecuación [4], es:

$$P_{fr1} = \frac{P_{fd1}}{P_{fd2}} P_{frm},$$

$$P_{fr1} = \frac{0,932}{1,00} (0,958),$$

$$P_{fr1} = 0,893.$$

De acuerdo con la figura 2, el porcentaje de carga requerido para cada cámara es, por lo tanto, el siguiente:

Cámara	Pfr	% de carga requerido
1	0,893	32,5
2	0,958	36,2

La carga que hay que añadir es 7,5 % (32,5 — 25 = 7,5) en la primera cámara y 5,2 % (36,2 — 31 = 5,2) para la segunda cámara.

Empleando la figura 3, es posible determinar la cantidad de carga que hay que añadir. Se entra en el nomograma en 7,5 % sobre la línea "Porcentaje de carga requerido" y trazar una línea recta desde este punto a la intersección con la línea "Diámetro interior del molino" en el valor de 2,59 m. Donde esta línea cruza la línea pivote 1, trazar otra línea recta hasta interseccionar con la línea "Longitud de cámara" en 3,65 m. Donde la segunda línea recta atraviesa la línea pivote 2, trazar una tercera línea recta hasta interferir con el valor 6.279,57 kg/m<sup>3</sup> en la línea "Densidad". El peso de la carga requerida se encuentra en la intersección de la tercera línea recta con la línea "Carga adicional requerida".

Para la segunda cámara se sigue el mismo procedimiento. La entrada en el porcentaje de carga es 5,2, la longitud del compartimiento es 7,92 m y la densidad de la carga es 4.645,73 kg/m<sup>3</sup>. El ejemplo mostrado en la figura 3 es para la segunda cámara.

La carga total de ajuste es la siguiente:

Compartimiento	Carga adicional
1	9.701 kg
2	11.061,7 kg.

En molinos de bolas o varillas de un solo compartimiento, el procedimiento para determinar la carga a añadir se hace mucho más sencillo. Las ecuaciones [1] y [2] son las mismas, pero, la ecuación [3] pasa a ser

$$P_{fm} = P_{f1},$$

porque  $P_{fd2}/P_{fd1}$  se anula,  $L_1$  es igual a  $L_m$  y los segundo y tercer término no son aplicables.

Resolviendo la ecuación [2] y empleando  $P_{f1}$  en vez de  $P_{fm}$  nos proporcionará el factor de energía requerido ( $P_{frm}$ ). El tanto por ciento de carga requerido se determina entonces a partir de la figura 2, y la carga a añadir es la diferencia entre la carga requerida y la carga actual.

TABLA DE SIGNOS EMPLEADOS

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
$P_a$	Multiplicador de ajuste de energía.
$P_d$	Energía proyectada de origen.
$P_m$	Energía medida en el molino.
$P_{fm}$	Factor de energía del molino.
$P_{frm}$	Factor de energía requerido.
$P_{fr1}$	Factor de energía requerido (cámara 1).
$P_{fd1}$	Factor de energía proyectado (cámara 1).
$P_{fd2}$	Factor de energía proyectado (cámara 2).
$P_{f1}$	Factor de energía (cámara 1).
$P_{f2}$	Factor de energía (cámara 2).
$P_{f3}$	Factor de energía (cámara 3).
$L_1$	Longitud (cámara 1).
$L_2$	Longitud (cámara 2).
$L_3$	Longitud (cámara 3).
$L_m$	Longitud del molino (suma de todos los compartimientos).