

## Ahorros en el proceso de optimización

*Victor J Turnell, PE., Ingeniero Ambiental/de proceso, Penta Engineering Corp, EE.UU., explora métodos para incrementar el valor de capital de inversión optimizando los procesos de fabricación, incrementando la producción y reduciendo los costos operativos.*

### Introducción

Los propietarios de plantas de cemento, personal gerente y técnico están constantemente buscando formas de incrementar el valor de capital de inversión optimizando los procesos de fabricación, incrementando la producción y reduciendo los costos operativos. Este artículo presenta métodos para conseguir estos objetivos e incluye varios ejemplos, incluyendo la optimización del funcionamiento del enfriador de clinker, la transferencia de calor, y las condiciones de combustión; reducción del aire de infiltración; adición de combustibles alternativos; mejora de las operaciones de ensacado de cemento. Los estudios presentados sobre la optimización del proceso de fabricación sugieren métodos de reducir los costos por unidad de producción e incrementar la capacidad de producción, que puede obtenerse mediante cambios operativos y pequeñas inversiones de capital, que resultan en beneficios superiores sobre la inversión (ROI). Las plantas en funcionamiento revisadas han mostrado ahorros potenciales significativos e incremento de la producción con un mínimo de inversión adicional de capital.

Los ahorros potenciales procedentes de la reducción del consumo específico de combustible se calculan usando resultados de modelos matemáticos. Los balances de masa y de energía se calculan usando el sistema de horno con variables de entrada basadas en las condiciones actuales de funcionamiento en plantas existentes, lo cual resalta la validez de los resultados. Las capacidades caloríficas de los elementos y compuestos fueron calculadas usando las ecuaciones obtenidas de *Perry's Chemical Engineers Handbook*<sup>1</sup>.

### Sistema de piropcesamiento

El sistema de piropcesamiento presenta la oportunidad de ahorros más óptimos. Los costos operativos principales son el combustible y la energía eléctrica.

Una comparación del consumo específico de combustible de un sistema de horno con otros sistemas de diseño similar proporciona una indicación de lo eficientemente que está funcionando el sistema. También sugiere lo que se puede obtener mediante las mejoras y optimización. Sin embargo, deberán considerarse otras razones para un consumo específico diferente de combustible.

A continuación damos ejemplos de mejoras y optimización de varios subsistemas en un sistema de piropcesamiento, e ilustramos cómo han sido obtenidas, como afectan el consumo específico de combustible y la producción de clinker, y el alcance de ahorro potencial y beneficios asociados con estas optimizaciones.

Los ahorros potenciales mostrados en estos ejemplos no tienen en cuenta ningún ahorro en energía eléctrica, mantenimiento, o mano de obra. Los ahorros en energía eléctrica resultarán siempre que haya una reducción del consumo específico de combustible por razón de una tasa más baja de flujo de gas por tonelada de clinker producido. Esto reduce la energía consumida en el ventilador de corriente inducida del sistema del horno.

En estos ejemplos, se calculan los ahorros potenciales o ingresos resultantes de la producción adicional sobre unos ahorros potenciales o ingresos de 20 dólares americanos/t de clinker.

### Enfriador de clinker

Los enfriadores de clinker tienen dos funciones principales en un sistema de piropcesamiento: suministrar aire de combustión caliente al horno y reducir la temperatura del clinker para manipulación del material después del sistema del horno. Un enfriador de clinker ideal descarga clinker a una temperatura próxima al ambiente con todo el calor recuperado desde el clinker usado para elevar la temperatura del aire de combustión o para otros propósitos, tales como para secar carbón o materias primas. La eficiencia del enfriador de clinker se mide por el porcentaje de calor útil recuperado desde el clinker.

Con los enfriadores de parrilla, los operadores de horno tienen un control significativo sobre la temperatura del aire de combustión y por lo tanto, sobre la eficiencia del enfriador del clinker. La temperatura del aire de combustión procedente de los enfriadores de parrilla está controlada por la profundidad del lecho de clinker y la tasa de flujo del aire. Normalmente, a la vez que se incrementa la profundidad del lecho, se incrementa la temperatura del aire de combustión. La profundidad máxima del lecho está limitada por una de las siguientes razones: capacidades del ventilador de parrilla inferior, el accionamiento de la parrilla, o el sobrecalentamiento en el área de la campana de encendido del horno.

En contraste, con los enfriadores planetarios, los operadores de hornos no tienen mucho control sobre la eficiencia del enfriador. Sin embargo, el operador puede asegurar que todos los accesos de observación y puertas estén cerrados para minimizar la infiltración del aire ambiental más frío.

Los efectos de aumentar la temperatura del aire secundario en la producción de clinker, consumo específico de combustible, y eficiencia del enfriador de clinker para un horno de precalentador equipado con un enfriador de parrilla se muestran en la Figura 1. En este ejemplo, la tasa de flujo del gas de salida

del horno fue mantenida a nivel constante y se permitió variar la tasa de encendido de combustible, la producción de clinker y la eficiencia del enfriador de clinker.

Los operadores de hornos de una serie de plantas visitadas mantienen una profundidad de lecho de clinker menor a la que podría obtenerse mediante la instalación de ventiladores de parrilla inferior. Incrementando y optimizando la profundidad del lecho de clinker, los operadores de hornos pueden incrementar la temperatura del aire de combustión y por lo tanto, la eficiencia del enfriador de clinker. En algunos casos, podría justificarse económicamente la modificación o rediseño del factor de limitación para incrementar la eficiencia del enfriador de clinker, por ejemplo, reemplazando un ventilador o ventiladores de parrilla inferior, o modificando el sistema de aireación instalando una sección de entrada estática en las parrillas. Los costos típicos de una modificación similar oscilarían de 200.000 a 600.000 dólares americanos.

Adicionalmente, los operadores de hornos deberán asegurar que todos los accesos de observación y las puertas estén cerrados para minimizar la infiltración de aire ambiental más frío.

Se resumen en la Tabla 1 los cambios operativos resultantes de un aumento de la temperatura del aire secundario a 100 °C de un sistema de horno de precalentador con enfriador de parrilla.

Los beneficios y ahorros potenciales son los siguientes:

- Se ahorran 64.000 dólares americanos al año en el costo de combustible basado en una producción de 320.000 t/año. Se obtiene esto como resultado de la disminución del consumo específico de combustible.
- Se pueden obtener ahorros potenciales o ingresos de 200.000 dólares americanos al año de la producción adicional obtenida.
- Al optimizar y aumentar la profundidad de lecho del clinker también se obtienen efectos significativos en la operación de un sistema de horno. El enfriador tendrá una mejor distribución del aire, reduciendo la posibilidad de ocurrencia de 'ríos rojos'. El sistema del horno se convierte en más estable, lo cual mejora a su vez la eficiencia del combustible, la producción del clinker, la duración del refractario y otros elementos de mantenimiento.

### Infiltración del aire

La infiltración del aire dentro del sistema del horno ocurre en muchos lugares, incluyendo los sellos entre la campana de encendido del horno y el revestimiento del horno, la campana del extremo de alimentación del horno y el revestimiento del horno, los accesos de observación, puertas y otros lugares.

La infiltración del aire en la campana de encendido del horno desplaza el aire secundario que se introduce en el horno, reduciendo así la eficiencia del

enfriador del clinker. Al reducirse la eficiencia del enfriador del clinker, aumenta el consumo específico de combustible y la producción de clinker disminuirá.

Se muestran en la Figura 2 los efectos de disminución de una fuga de aire en la campana de encendido del horno. En este ejemplo, el flujo del gas de salida del precalentador fue mantenido a un nivel constante y se permitió variar la tasa de encendido de combustible, la producción del clinker y la tasa de flujo de la masa de aire secundario.

En la mayoría de las plantas, mantener los sellos de aire existentes y los accesos de observación y las puertas cerradas tendrá como resultado mejoras significativas en las operaciones del sistema del horno. En otras plantas, podría ser necesario hacer modificaciones a la campana de encendido del horno y de los sistemas de sellado de la campana del extremo de alimentación del horno para evitar una fuga significativa. Los costos típicos de modificación oscilan entre 20.000 y 180.000 dólares americanos.

Se muestran en la Tabla 2 los cambios operativos resultantes de la disminución de fugas procedentes de la campana de encendido del horno desde el 10% del aire total entrante en el horno al 2% en un sistema de horno de precalentador con un enfriador de parrilla.

Los beneficios y ahorros potenciales son los siguientes:

- Ahorro de 64.000 dólares americanos por año en costo de combustible basado en una producción de 322.000 t/año.
- Ahorros adicionales o ingresos de 160.000 dólares americanos por año al obtener producción adicional.
- En el caso de los enfriadores planetarios, al reducir la fuga en la campana de encendido del horno se aumentará el flujo de aire a través del enfriador planetario lo cual reduce la temperatura de descarga del clinker al salir del enfriador mejorando a la vez la eficiencia del combustible.

Se muestran en la Figura 3 los efectos producidos por la disminución de fugas en la campana del extremo de alimentación del horno en la producción del clinker, en el consumo específico de combustible y en la temperatura del gas de entrada del precalentador para un horno de precalentador con un enfriador de parrilla. En este ejemplo, fue mantenido el flujo de gas de salida del precalentador a un nivel constante, y se permitió variar la tasa de encendido del combustible, la producción del clinker y la temperatura del gas de entrada del precalentador.

En un horno de precalentador, reduciendo la infiltración del aire se reduce la cantidad que hay que enfriar de gases de salida del horno. Cuanto más altas sean las temperaturas del gas entrante en el precalentador mejor será la eficiencia de transferencia del calor entre los gases y el material que fluye en el precalentador. Adicionalmente, la infiltración del aire inferior disminuye el volumen de aire que se desplaza a través del precalentador, lo cual resulta en menor



velocidad y, por lo tanto, aumento del tiempo de retención de los gases que se desplazan a través del precalentador. Un aumento del tiempo de retención mejora la transferencia de calor en el precalentador. Esto también es aplicable a un sistema de horno de calcinador.

En un sistema de horno limitado por la capacidad del ventilador de corriente inducida, la capacidad del horno aumentará de forma significativa y el consumo específico de combustible disminuirá según se muestra en el ejemplo anterior.

Se muestran en la Tabla 3 los ahorros potenciales obtenidos disminuyendo las fugas procedentes del precalentador del extremo de alimentación del horno desde el 10% del aire total entrante en el horno al 2%.

Los ahorros potenciales y beneficios son los siguientes:

- Ahorro de 36.000 dólares americanos al año en costo de combustible basado en una producción de 300.000 t/año.
- Ahorros potenciales o ingresos de 600.000 dólares americanos al año procedentes de la producción adicional obtenida.

## Eficiencia de la transferencia de calor

Existen numerosos indicadores de la eficiencia de transferencia de calor, tal como la temperatura del gas de salida del sistema del horno. Una comparación de la temperatura del gas de salida del sistema del horno con otros sistemas de hornos de diseño similar aportarán una indicación de la eficiencia de transferencia de calor en el sistema del horno. Si se descubre que la temperatura es superior a la esperada, podrá mejorarse la transferencia de calor.

Sin embargo, una temperatura del gas de salida relativamente baja no implica que está ocurriendo una buena transferencia de calor. Una temperatura baja del gas de salida del sistema del horno podría ser consecuencia de alta infiltración de aire.

Se muestran en la Figura 4 los efectos de aumento de eficiencia de transferencia de calor reflejados por la reducción de la temperatura del gas de salida del horno, la capacidad de producción del horno, el consumo específico de combustible y la temperatura del aire secundario de un horno de proceso húmedo con enfriador planetario. En este ejemplo, la tasa de encendido de combustible del horno fue mantenida a un nivel constante y se permitió variar la capacidad de producción del horno, la tasa específica de encendido de combustible y la temperatura del aire secundario.

En el sistema de horno descrito en este ejemplo, la transferencia de calor podría mejorarse volviendo a diseñar el sistema de cadena para asegurar que ocurre mayor transferencia de calor a la vez que se mantiene la mínima resistencia del aire.

Podrán obtenerse otros ejemplos para mejorar la transferencia de calor. Manteniendo, y en algunos casos, volviendo a diseñar los siguientes elementos podría mejorarse de forma significativa la eficiencia de transferencia de calor en el sistema del horno.

- Sistema de refractario en el horno, precalentador y enfriador.
- Sistema de cadena para hornos equipados con sistema de cadena.
- Casquillos en los recipientes del precalentador.
- Cajas de distribución de alimentación del precalentador descargando materiales desde un recipiente de precalentador a otro.
- Esclusas neumáticas en el punto de descarga del recipiente del precalentador.
- Ciclones de precalentador incluyendo entradas y otras áreas.

Los costos previstos de modificación oscilan entre 100.000 y 500.000 dólares americanos.

En la Tabla 4 se muestran los ahorros potenciales que podrían obtenerse incrementando la eficiencia de transferencia de calor de un horno de proceso húmedo con enfriador planetario. La eficiencia adicional de transferencia de calor se refleja en la reducción de temperatura de los gases de salida del horno.

Los ahorros potenciales y beneficios son los siguientes:

- Se pueden ahorrar 237.000 dólares americanos al año en costo de combustible basados en una producción de 130.000 t/año.
- Se pueden obtener 700.000 dólares americanos al año en ahorros o ingresos procedentes de la producción adicional obtenida.

## Condiciones de combustión

Las condiciones óptimas de combustión en los sistemas de horno de cemento ocurren cuando el oxígeno del gas de salida del horno y las emisiones de monóxido de carbono están reducidas al mínimo. Dicho de otro modo, las condiciones óptimas de combustión ocurren cuando el aire de exceso es lo más bajo posible y todavía ocurre la combustión completa. Un horno operando con bajo aire de exceso podría causar combustión parcial del combustible. Un sistema de horno operando con alto aire de exceso aumenta la pérdida de calor en los gases de salida del sistema del horno. En cualquier caso, los efectos netos son un consumo específico de combustible más alto y producción inferior de clinker.

Se presentan en la Figura 5 los efectos de reducción del porcentaje de oxígeno del gas de salida del horno en la capacidad de producción del horno, consumo específico de combustible y temperatura del aire secundario para un proceso de horno húmedo con enfriador planetario. En este ejemplo, el flujo de gas de salida del horno se dejó constante y se permitió variar la tasa de encendido de combustible del horno, la producción del horno y el aire secundario.

Se consigue el control efectivo del aire de exceso cuando existe un nivel óptimo de oxígeno y de monóxido de carbono en el gas de salida del sistema del horno. Las condiciones de combustión óptimas pueden mantenerse de varias maneras; por ejemplo, midiendo el oxígeno o el monóxido de carbono en los

gases de salida del sistema del horno y ajustando la tasa de flujo del gas del sistema del horno según proceda. Están previstos unos costos de instalación de 75.000 a 300.000 dólares americanos.

Se muestran en la Tabla 5 los ahorros potenciales que podrían obtenerse reduciendo el porcentaje de oxígeno del gas de salida del horno para un sistema de horno de proceso húmedo con enfriador planetario.

Los ahorros potenciales y beneficios son los siguientes:

- Se pueden ahorrar 75.000 dólares americanos al año en costo de combustible basados en una producción de 129.000 t/año.
- Pueden obtenerse ahorros adicionales o ingresos de 720.000 dólares americanos al año procedentes de la producción adicional obtenida.
- La tasa de flujo del aire secundario disminuye con lo cual se aumenta la temperatura del aire secundario.
- Niveles inferiores de oxígeno reducen la tasa de oxidación de las cadenas en el sistema de cadena, con lo cual se aumenta su duración.
- Los beneficios sociales incluyen reducción de los niveles de emisión de contaminación de óxidos de nitrógeno por tonelada de clínker producida.

### Combustibles alternativos

En todos los ejemplos ilustrados anteriormente, el objetivo fue reducir el consumo específico de combustible y aumentar la producción de clínker. Este ejemplo presenta combustibles alternativos que pueden sustituirse total o parcialmente por combustibles existentes para reducir los costos de combustible. Los combustibles usados en algunas plantas de cemento como combustible principal o como suplemento, incluyen el gas natural, el fuelóleo, el carbón, el coque de petróleo, neumáticos, desecho doméstico, cáscara de arroz, virutas de madera y una gran variedad de solventes de desecho y otros líquidos orgánicos.

Uno de los primeros pasos en la evaluación de un combustible alternativo es determinar si es económicamente viable. Si la contestación es positiva, el paso siguiente es evaluar los efectos de usar el combustible alternativo. Deberán considerarse los siguientes elementos antes de usar un combustible alternativo:

- Produce ceniza el combustible alternativo?, si la contestación es positiva, ¿cómo afectará la química del clínker producido? ¿Cómo afectará la ceniza la operación del sistema del horno?. En algunos casos, la ceniza puede contener grandes niveles de sílice, aluminio o hierro que podrían ser beneficiosos. Podría, en algunos casos, permitir a la planta reducir el consumo de una materia prima más cara.
- Generará el combustible alternativo productos contaminantes adicionales?, si la contestación es positiva, ¿cuáles serán las consecuencias de estos contaminantes? ¿Se requieren permisos especiales?.

Se muestran en la Tabla 6 los ahorros potenciales resultantes del uso de un combustible alternativo. Es importante observar que el costo de combustibles alternativos varía de forma significativa. En algunos casos, la planta de cemento recibirá dinero por el hecho de utilizar combustibles alternativos.

Los beneficios y ahorros potenciales son los siguientes:

- Podrá ahorrar 396.000 dólares americanos al año en costo de combustible en una planta que produzca 330.000 t/año de clínker a 750 kcal/kg.
- Puede que haya beneficios sociales procedentes del uso de combustibles alternativos tales como la eliminación sin peligro de los desechos domésticos e industriales.

### Distribución del cemento

Alrededor del 80-85% de todo el cemento distribuido en Latinoamérica se hace en sacos<sup>2</sup>. Por esta razón, deberá prestarse gran atención a las eficiencias del sistema de ensacado.

Existen en funcionamiento numerosas máquinas de ensacado de tecnología antigua, que usan pesos mecánicos en una báscula. En algunos casos, estas máquinas de ensacado hacen que los pesos de los sacos varíen tanto como en un 3%. Por lo tanto, para asegurar el peso mínimo en cada saco, la planta pondrá normalmente un 2-3% adicional de cemento en cada saco.

En los últimos años, se han hecho mejoras a las máquinas de ensacado que han producido máquinas con significativamente más control del peso de cada saco. Se obtienen ahora tolerancias en el rango del 0,5%.

Estas tolerancias de peso son obtenidas por lo siguiente:

- Instalando un dispositivo de peso después del ensacador que realmente el peso de cada saco a la máquina ensacadora.
- Instalando un sistema de llenado de sacos que ajuste constantemente la cantidad de cemento basado en la realimentación obtenida desde el dispositivo de pesado.
- Instalando hardware y software para obtener el control descrito anteriormente.

Algunas plantas pueden obtener ahorros significativos reduciendo la variación de peso de un saco a otro. Por ejemplo, en una planta que venda 500.000 t/año de cemento en sacos a un costo de producción de 40 dólares americanos/tonelada, al 1% de reducción de cemento por saco podría potencialmente ahorrar a la planta aproximadamente 200.000 dólares americanos por año.

### Conclusión

Este artículo ha presentado varios ejemplos de ahorros potenciales que podrían obtenerse mediante cambios operativos y pequeñas inversiones de capital, incluyendo: la optimización de la operación del enfriador de clínker, reducir la infil-



tración de aire, optimizar la transferencia de calor, optimizar las condiciones de combustión, usar combustibles alternativos y controlar las variaciones de peso de los sacos de cemento. Estos ahorros potenciales proporcionan un orden de ahorros de magnitud, que pueden variar según las condiciones existentes de funcionamiento de la planta y la producción.

Es importante resaltar que esta es sólo una selección de ejemplos, y que existen muchas más

áreas de ahorros potenciales y beneficios aplicables al sistema del horno y a otras secciones del proceso de producción. Se recomienda que los expertos técnicos de la planta realicen una auditoría para evaluar los sistemas existentes con objeto de optimizar y mantener bajos costos de funcionamiento usando herramientas probadas en la teoría y en la práctica.

Encuesta no: 12

## Nueva estrategia de dosificación para la combustión del cemento

*Hans W Haefner, Pfister GmbH, Alemania, introduce ProsCon®, que está diseñado para trabajar con un alimentador de báscula de rotor para asegurar un suministro constante de crudo y de combustible a los hornos de cemento.*

### Resumen

Las alimentadores de báscula de rotor han sido un éxito convincente para suministrar a los hornos de cemento el crudo, los combustibles pulverizados y los materiales secundarios. La adopción de nuevos métodos de dosificación ha estado asociada con la optimización extensa del sistema de báscula de rotor.

Las mediciones hechas en las plantas de hornos han mostrado que se pueden obtener concentraciones muy bajas de monóxido de carbono y de óxido de nitrógeno a concentraciones muy bajas de oxígeno usando los alimentadores de báscula de rotor con ProsCon®.

Este nuevo sistema de control de dosificación produce una tasa de alimentación de material muy constante. Un alimentador de báscula de rotor equipado con ProsCon® puede producir dosificación constante excelente a corto plazo requerida hoy en día para suministrar el crudo y el combustible a los hornos de cemento.

### Introducción

Cada vez es mayor la demanda impuesta sobre las unidades de control para la alimentación dosificada de materiales en bruto. Esto es debido en parte al número cada vez mayor de dificultades para medir los materiales primarios y secundarios, y en parte a los refinamientos continuados del proceso de fabricación del cemento, junto con la introducción del control del proceso y de los sistemas de información.

Las unidades de control situadas cerca de los procesos requieren tener inteligencia para la toma de decisión automática, tiempos de reacción muy cortos, reproductibilidad y fiabilidad, y ser capaces de integrarse fácilmente en el sistema de automatización. La alimentación dosificada de materiales en bruto al equipo requiere control gravimétrico en el cual la extracción del material de la tolva de alimentación, la sección de pesado, el actuador y la descarga directa del material en el proceso se combinen en una

unidad de medición totalmente encerrada y estructuralmente simple. Otros requisitos incluyen alta precisión a corto plazo, operación gravimétrica permanente, gran rango operativo y una reacción instantánea a las variables de control del proceso de entrada.

Las características principales del sistema alimentador de báscula de rotor ProsCon® incluyen la dosificación prospectiva y un equipo de pesado simple y totalmente encerrado de control, dinámico, gravimétrico, y de dosificación.

### Pesado moderno del material en bruto

En los últimos años, el desarrollo de sistemas continuos de pesado y dosificación ha tenido que considerar las demandas surgidas de las propiedades de los materiales y del proceso mismo.

La tecnología moderna de dosificación está basada en la selección de unidades de dosificación volumétrica probada y totalmente encerrada, con pesado integral y funciones de tecnología de control y dosificación. Durante la búsqueda de unidades apropiadas, los alimentadores celulares rotativos y los transportadores de cadena han probado ser particularmente apropiados. Estos mecanismos son capaces de un gran rango operativo, medición exacta de la velocidad de transporte del material y de la masa del material en la sección de pesado en cualquier tiempo dado, además de acomodar el ProsCon® en una caja simple y cerrada (Figura 1).

Con 500 unidades instaladas, predominantemente para dosificar carbón pulverizado directamente al tubo de transporte neumático del quemador del horno (Figura 2), los alimentadores de báscula de rotor han causado una impresión inmensa comparados con los sistemas tradicionales de alimentación dosificada. El diseño simple y totalmente cerrado, la alta precisión de transferencia directa del material dentro del proceso, el gran rango operativo, y la reacción instantánea a las variables de control