

Proceso de fabricación

F. SORIA SANTAMARIA

Jefe de la División de Fábricas Piloto del I.E.T.c.c.

I. INTRODUCCION

A lo largo de las exposiciones realizadas y de las que aún nos quedan por escuchar estamos presenciando los efectos en la industria del cemento de ese virus contagioso y explosivo que es la "automación", invasor de toda actividad humana, ya sea administrativa, financiera, económica o técnica.

Desde la instalación del primer pirómetro, por sólo unas cuantas pesetas, hasta los sistemas controlados por computador, con inversión de unos cuantos millones, han pasado sólo unos 40 años.

Haciendo un breve recuento histórico de la evolución de las instalaciones en la industria del cemento nos encontramos, que en las instalaciones un poco primitivas se observan pocos instrumentos de medida y muy localizados. Realmente la observación personal del operario es el único mecanismo de control.

Aparece una continua y progresiva *mecanización*, notoriamente beneficiosa, en cuanto a la mano de obra se refiere, en los escalones extremos del proceso: cantera y ensacado y expedición.

Combinando esta mecanización con otros progresos conseguidos en la medida, se establecen los cuadros de control en la plataforma del hornero o en centrales al pie de las distintas secciones.

Las mejoras en instrumentación y mecanización conducen conjuntamente al establecimiento de automatismos sencillos y localizados. Pierde valor la personalidad del operario, cuyo arte y experiencia profesional era hasta entonces la única garantía de una buena marcha.

En la instalación de nuevas plantas y en aquéllas en fase de modernización y ampliación, se va ya directamente a la creación de una sala de control centralizada, donde reagrupar el mayor número de datos y, en muchos casos, al establecimiento de un sistema de tratamiento de la información recibida que supervise, maneje y dé soluciones casi inmediatas con los innumerables datos aportados por los múltiples y complejos bucles de regulación establecidos. Esta última tarea supera ya las posibilidades humanas y precisa la presencia del ordenador electrónico.

El empleo de los modernos métodos de la automática y análisis de sistemas en industria que, como la del cemento, manejan sólidos, ha sido mucho más lento que en aquellas que tratan líquidos o gases, como puede ser la industria petroquímica.

Las razones pueden ser varias:

En primer término, la inversión por instrumentación y posible automatización en las plantas tradicionales era alta. Al surgir la tendencia a mayores fábricas, con hornos grandes, disminuye mucho el precio unitario de la automación, porque casi cuesta lo mismo automatizar una unidad grande que una mediana o pequeña.

En segundo lugar, han surgido y coexisten muchos problemas de medida y control.

Las medidas son difíciles, por la naturaleza de las materias primas, la formación de polvo y las temperaturas extremadamente elevadas del proceso de cocción. Tal ocurre, por ejemplo, con el análisis continuo de materias primas, con la toma de muestra para el análisis continuo de gases (calientes, húmedos y con polvo), con la temperatura en la zona de clinkerización (corrosión, erosión, polvo, formación de costra y radiación de la llama), con la temperatura del aire secundario, con la valoración continua de la calidad del clinker, etc.

Incluso, resuelto el problema de las medidas, el desarrollo de la automación exigirá, por una parte, que aquéllas sean continuas y representativas de las magnitudes correspondientes en los puntos de captación y, por otra, que se transmitan a distancia desprovistas de errores, lo que obligará a tomar serias medidas de instalación y conservación para evitar posibles perturbaciones.

El control del proceso es complicado por la cantidad de perturbaciones concomitantes tanto externas como internas con valores y periodicidad imprecisables. Así ocurre con los cambios en la temperatura ambiente (lluvia, por ejemplo), que influyen tanto en el consumo calorífico como en la producción; con las variaciones de alimentación de crudos y combustible (tanto en calidad como en composición); con las variaciones en el reciclado de polvo, si existe; con la formación de costra que afecta tanto al tránsito de material como al ciclo de polvo y la transmisión de calor; con la formación de anillos y caída de costra o de revestimiento con análogas consecuencias; con las avalanchas de material; con el ciclo de los compuestos alcalinos, etc.

Vista esta complejidad, no podemos dudar de que los sistemas de control convencionales son muy limitados, por falta de flexibilidad en la acción de control, por los grandes tiempos muertos y de respuesta asociados en el proceso y por la interacción de las múltiples variables.

Parece que hoy día la técnica proporciona un instrumento capaz de sobreponerse a estas dificultades. Dicho instrumento es el computador digital con la doble misión de regularizar para asegurar una marcha suave y estacionaria y, más tarde, buscar o conocer las condiciones de trabajo óptimas (optimizar).

La tendencia a emplear computador es cada vez más pronunciada en los últimos 5 ó 6 años, debido principalmente a los beneficios que ya se logran y esperan obtener de las grandes fábricas modernas y a la posibilidad de disponer de resultados tanto teóricos como prácticos que hagan factible la marcha óptima de un proceso tan complejo. El problema básico es establecer el modelo matemático del proceso basado en el conocimiento de las características dinámicas del sistema y en la aplicación de métodos estadísticos.

Hoy en día hay unas 30 fábricas que trabajan con funciones controladas por sistemas de computador digital (Europa Occidental, Japón, Canadá y Estados Unidos), aunque todavía no debe haber ninguna en la que trabajen todas las funciones simultáneamente.

Gran parte de ellas controlan el sistema de crudo y el sistema horno-enfriador. En su 40 % emplean la regulación digital directa, técnica cuyos primeros estudios de aplicación a la industria del cemento se hicieron hacia 1960.

II. ANALISIS DE LAS DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE FABRICACION

II.1. Preparación de materias primas

Tradicionalmente, las materias primas se vigilaban determinando volumétricamente el contenido en carbonatos y calculando a posteriori el standard de cal.

Esto es sencillo y bastante correcto cuando se dispone de dos componentes (caliza-arcilla, caliza-marga, etc.) cuyo carbonato es variable, pero cuyos módulos silíceo y aluminico permanecen prácticamente constantes.

Ahora bien, si la mezcla no queda suficientemente definida, en toda su extensión, por una sola variable como puede ser el standard de cal, deberán introducirse en el sistema otros componentes para poder definir o regular nuevas variables (p. e., M.S. M.F. o C_3S , C_3A y R_2O_3 , etc.). Hoy día, ya es frecuente emplear hasta 4 y 5 componentes para preparar el crudo.

En cualquier caso, la meta debe ser lograr un crudo de composición constante, con la menor cantidad posible erróneamente dosificada a la salida de los molinos y con cualesquiera materias primas de calidad y regularidad diversas.

Para resolver un problema de tal complejidad, la técnica de la dosificación de crudos ha evolucionado gracias a tres circunstancias esenciales:

- Planificación de cantera y homogeneización previa del material triturado (prehomogeneización o formación del "stock-pile").
- Análisis rápido y completo por fluorescencia de rayos X.
- Empleo de un computador.

De las dos últimas, ya hemos tenido ocasión de escuchar la valiosa opinión y experiencia de destacados especialistas en análisis y automática.

En cuanto a la 1.ª, el Sr. Sterba, de Siemens, hará algunos comentarios sobre la planificación y solución con ordenador en la explotación de canteras y desarrollará un método original de dosificación de materias primas.

Para colaborar en el mejor conocimiento y control de la amplitud de las oscilaciones en la composición química de las materias primas y su velocidad de variación, se utilizan cada vez más las *instalaciones de prehomogeneización*. Estas instalaciones son verdaderos reguladores o tampones entre el flujo discontinuo de la trituración y la marcha continuada de los molinos, recibiendo el material de cantera perfectamente programado de acuerdo con las necesidades de composición.

No es momento de detallar las distintas formas de realizar esta prehomogeneización, su idoneidad en cada caso, volumen de material a prehomogeneizar, costos, etc.

Algunos autores como los señores Magallón, de Siemens, y Pérez-Polo, de IBM, nos harán indicaciones detalladas a este respecto en sus comunicaciones.

Sí diremos que su planteamiento es distinto de una fábrica a otra y tienen mucha importancia la heterogeneidad de las materias primas y los tiempos muertos de la instalación y análisis, junto con la capacidad de molienda.

II.2. Molienda de crudos

La instalación entre cantera y molino, caso de no existir prehomogeneización, suele consistir en una serie de escalones o depósitos de materiales clasificados y de composición perfectamente definida, provistos de básculas dosificadoras que, o bien alimentan un pequeño silo de mezcla antes del molino, o bien alimentan directamente éste.

En vía húmeda, o bien se conserva el sistema tradicional de tanques correctores de pasta sin buscar dosificaciones precisas en la alimentación del molino, ni tener en cuenta la composición química de las materias primas iniciales lo cual es difícil en materiales muy plásticos, o bien se sigue el sistema de dos o tres caminos previos con preparación de dos o tres pastas diferentes que se dosifican a la entrada de un molino final para pasar directamente al depósito de alimentación del horno.

Con los sistemas automatizados se suprimen prácticamente los dosificadores volumétricos, muy sensibles a los cambios de granulometría y llenado del silo o tolva, aparte de que el computador trabaja con valores analíticos determinados en peso.

A la salida del molino suele haber o una báscula de pesada continua o un medidor de flujo de pasta.

El circuito de regulación suele ser siempre el mismo: alimentadores - molino - toma-muestras - rayos X - computador - alimentadores. La toma de muestras puede hacerse a la entrada del molino, con lo que se suprimiría el tiempo muerto de paso, pero tiene el inconveniente del tamaño del material, la irregularidad de su granulometría y, en suma, su difícil representatividad.

En las comunicaciones que presentan los señores Magallón y Loesche, se tratará con detalle este problema de la toma de muestras.

Conviene reducir los tiempos muertos "forward" (antes del molino), suprimiendo las clásicas tolvas de alimentación, pues no tiene sentido su existencia en un sistema en el que se quiere conseguir un buen control químico del proceso.

Igualmente, conviene limitar los tiempos muertos "feedback" entre el tomamuestras y la corrección de los alimentadores, mediante un análisis químico "on-line", con cálculos rápidos y suministro a los alimentadores de la información correcta necesaria y en forma estable.

Reducidos a un mínimo los tiempos muertos, desde el punto de vista de control del proceso, puede limitarse la capacidad en la homogeneización a p.e. unas 12 horas de trabajo del molino.

Precisamente el Sr. Loesche nos presentará un sistema original para regular la marcha automática de un molino de rodillos, según el cual se reducen notoriamente los tiempos muertos de paso de material y se aumentan las posibilidades de renunciar a la homogeneización.

Al acabar el llenado del silo de homogeneización pueden alcanzarse los valores teóricos por mezcla del conjunto.

En todas estas limitaciones tiene mucha importancia la variación en la composición de los silos de alimentación. Hay canteras con tal constancia de composición que el control de la mezcla no ofrece dificultades y basta p.e. con un análisis cada 4 horas; otras instalaciones, por el contrario, presentan variaciones tan rápidas que un muestreo cada 15 minutos puede no ser suficiente para representar correctamente la composición.

Afortunadamente, como nos detallará el Sr. Pérez-Polo en una de sus comunicaciones, existen sistemas de conducción con ordenador que envían señales cada 2 ó 3 minutos, adecuados tanto para la conducción del stock-pile como para la marcha del circuito de molienda, incluida la homogeneización.

De la experiencia adquirida hasta la fecha parece que la regulación automática de la calidad del crudo con rayos X y computador ofrece muchas ventajas frente a los métodos estadísticos de homogeneización empleados en el control convencional. Esta superioridad de la regulación de valores teóricos para el crudo, destinada a mejorar la calidad del cemento y a producir diferentes tipos con mucha agilidad, se hará cada día más ostensible a medida que aumenten las exigencias del consumidor y se agudicen las condiciones de competencia.

En cualquier caso, el propio fabricante, conocedor como nadie de sus propios materiales, será el que deba establecer su “foco” su “núcleo” de automatización: puede emplear dos, tres o cuatro componentes; puede imponer ciertos módulos a la mezcla; puede —si dispone de gran número de materias primas— optimizar el precio de coste ciñéndose a los imperativos técnicos; etc.

Por supuesto, hay que pensar que están bien resueltos los problemas de transporte de materias primas hasta los molinos (atascamientos, pegaduras, trabajos de limpieza, etc.) porque aún así las instalaciones mecánicas influirán mucho más en la calidad de la regulación que la medida y regulación electrónicas: un alimentador gravimétrico tiene una sensibilidad a las instrucciones del computador del orden del 2 % del peso máximo, por lo que es inútil dar órdenes de variación en la salida inferiores a ese tanto por ciento.

II.3. Sistema horno-enfriador

Esta sección de la producción es la que rige el desarrollo global del proceso de fabricación. Es el “corazón” de la fábrica que dispone de la maquinaria más cara de primera instalación y conservación; es la fase más gravosa en el costo del producto fabricado y la que más influye en la calidad y uniformidad del producto terminado. Cualquier mejora en producción y calidad, cualquier ahorro en la instalación o en el proceso, repercutirán notoriamente en el desarrollo global.

Visto en su conjunto, el sistema de cocción —que incluye intercambiador, horno propiamente dicho, enfriador y las posibles relaciones con el sistema de molienda de crudos— es un complejo intercambiador de calor en contracorriente en el que el sólido tarda algunas horas en atravesarlo y los gases calientes invierten tan solo unos segundos en recorrerlo en sentido contrario.

Desde que *el hornero controlaba el horno manualmente* con la simple observación visual de la zona de clinkerización buscando una combustión correcta y comprobando el comportamiento del material en el horno, las cosas han cambiado mucho.

Entonces, era imposible almacenar información exacta en el tiempo y el hornero era incapaz de estimar los efectos de cualquier cambio en las variables de mando, ayudándose siempre con ensayos de laboratorio realizados a posteriori. Influyó mucho la personalidad del operario que trabajaba siempre un poco a sentimiento y, por supuesto, con eficacia distinta de un turno a otro, conduciendo a una forma de control completamente discontinua, con los consiguientes trastornos en la producción y calidad del material y en la conservación de la instalación.

En la fase intermedia con *control instrumental centralizado*, sistema que ahora podemos llamar convencional, no se pueden tener en cuenta las interacciones entre los pocos bucles de control establecidos y, mucho menos, considerar los largos tiempos muertos que el proceso de cocción lleva consigo.

Supongamos, por ejemplo, como menciona el Sr. Willis en una de sus publicaciones, que disponemos de un sencillo bucle que relaciona la temperatura de la zona de clinkerización con el consumo de combustible.

Si, por cualquier perturbación, empieza a bajar la temperatura en la zona de clinkerización, el operario o el sistema de control aumentarán el consumo de combustible. Esto elevará aquella temperatura pero, simultáneamente, calentará el resto del horno, con lo que al cabo de un cierto tiempo aportará material muy caliente en la zona y la temperatura será excesiva. El operario reducirá entonces el consumo de combustible y acabará creando un ciclo con una sucesión de situaciones inestables.

El problema es delicado. Los efectos de todas las perturbaciones en la marcha del horno, y de ellas entre sí, son tan complejos que exigen muchos cálculos, como ya hemos dicho antes, para poder establecer cualquier acción de control. Esto sólo puede resolverse felizmente con un computador, adaptando en principio un sistema sencillo capaz de ampliarse con el tiempo a sistemas más complejos.

Volviendo al ejemplo anterior, con un computador, el control del combustible no se relaciona sólo con la temperatura de la "zona", magnitud que al fin y al cabo no representa más que un nivel térmico en una parte muy localizada del horno. El programa de regulación controla el calor total introducido en el sistema, recogiendo otras muchas variables, además de la temperatura de la "zona" que no puede tenerse en cuenta en el control convencional.

Al trabajar con computador, la señal que representa las desviaciones del valor consigna en dicha temperatura de clinkerización se modifica algebraicamente (\pm) con otras señales antes de producir un cambio en el flujo de combustible. Estas señales incluyen una base de flujo térmico (que recoge el tipo y cantidad de alimentación de crudo, la transmisión del horno y sus elementos auxiliares) la velocidad actual del horno, el consumo de energía, etc. Todas estas variables se observan y registran en la memoria del computador para, una vez calculado el aumento o disminución en el aporte calorífico, establecer la nueva alimentación de combustible y las nuevas posiciones de control. Al hacer esto, se tienen en cuenta los tiempos de respuesta a las acciones de control, los tiempos muertos de transporte de material y la dinámica de transmisión de calor.

De este modo, los cambios de combustible se producen sin tendencia al ciclado como ocurría en el control convencional, porque el computador es capaz de almacenar información por mucho más tiempo que el característico de transporte de material en el horno.

Calculadas las aportaciones de combustible, es preciso conocer las nuevas necesidades de aire secundario, para mantener una combustión perfecta en su temperatura máxima.

A su vez, hay que recalcular la nueva presión bajo la parrilla del enfriador para estabilizar la permeabilidad del lecho de clínker en aquélla.

Consideraciones análogas a las hechas con la alimentación de combustible pueden hacerse con la velocidad del ventilador-exhaustor para controlar la temperatura de los gases de escape en la chimenea, etc.

Las magnitudes medidas en el horno son muchas ya y cada día se recogen otras nuevas

para establecer nuevos bucles de regulación. Cada bucle en el computador es una ecuación compleja destinada a considerar el efecto global de cualquier acción sobre el sistema.

No obstante, hay muchas dificultades que vencer orientadas en dos sentidos: calidad de la medida (en sus aspectos precisión y exactitud) y medida continua y automática.

Son precisas mejoras en las medidas de temperatura tanto en la zona de clinkerización como en otras zonas del horno o del aire secundario; deben perfeccionarse los analizadores automáticos de gases; faltan medidas continuas importantes como pueden ser la pérdida de calor del horno y las pérdidas de polvo; falta algún ensayo que defina continua y automáticamente la calidad del clínker a la salida del enfriador, etc.

Asimismo, las variables de mando del proceso sometidas a control deben valorarse con suficiente amplitud para permitir controlar aquél en los máximos niveles de productividad, ya que es difícil un buen control de calidad si, por ejemplo, el ventilador-exhaustor, el arrastre del horno, el alimentador de combustible, etc., están funcionando la mayor parte del tiempo "a tope", es decir, en su límite superior.

El esquema de regulación adoptado en cada caso depende de los métodos de análisis del problema, de las circunstancias técnicas impuestas y del material de control utilizado.

Un buen sistema de control debe tener capacidad de respuesta dinámica suficiente para mantener regulada la instalación a pesar de que surjan importantes desajustes como pueden ser la rotura de anillos o las avalanchas de polvo.

La clave está, y la mayor dificultad estriba, en establecer el modelo matemático del proceso, basado en métodos estadísticos o en la investigación analítica de los fenómenos que ocurren en las principales zonas del horno, para establecer las características dinámicas en su marcha.

El Sr. Pérez-Polo, en su segunda comunicación nos expondrá con detalle el problema de establecer un modelo matemático en el horno, las limitaciones para fijar un programa y la forma de resolver el problema de optimización en la marcha del proceso.

II.4. Molienda de cemento

Con la automatización, el proceso de molienda de cemento se ha perfeccionado en dos aspectos: regularidad en la finura, por medida casi continua de la superficie específica Blaine y regularidad en la dosificación de yeso, por determinación continua de sulfatos en el producto acabado.

Asimismo, con las nuevas técnicas, puede programarse el trabajo de forma que se aprovechen las ventajas de ahorro de personal, días festivos, horas de mínimo consumo de energía eléctrica, etc.

Las magnitudes controlables son: la cantidad de material (alimentación, retorno y salida), la carga del molino y la temperatura de salida del cemento. A estas magnitudes acompañan ciertas perturbaciones de difícil control como pueden ser: la molturabilidad del material, las variaciones en el funcionamiento de molino y separador, la emisión de polvo, etc.

III. CONCLUSION

Desde los principios de la instrumentación, pasando por el control centralizado y el control automático, hemos llegado al control por computador (automatización).

Todo se ha complicado en aras de la producción y de la calidad. Grandes fábricas, máquinas potentes y sistemas de trabajo complicados buscan ventajas de todo orden, que exigen una supervisión muy rigurosa inasequible ya al control humano directo. Inasequible se entiende en el tiempo, obligando a una recopilación y manejo de datos tan amplios y a tal ritmo, que sólo las potentes máquinas calculadoras actuales pueden llevar el problema adelante con toda corrección.

Esto lleva consigo, naturalmente, grandes gastos. Si con un sistema de control convencional el costo del equipo era del 1 al 2 % de la inversión total, hoy, con una buena automatización, se mueve del 10 al 15 %.

La evolución es rápida, casi explosiva, y además irreversible.

No podemos dar la espalda al progreso aunque debemos usar la prudencia para buscar el justo equilibrio entre las posibilidades propias y las metas que se desean o deben alcanzar. Tampoco hay que sucumbir, pensando que todo se resuelve con un computador.

La conferencia que pronunciará el Sr. Willis como final de estos Coloquios es un verdadero examen de conciencia, que analiza los pasos que hay que seguir para llevar a buen término la automatización de procesos en una fábrica de cemento, automatización que, según dicho autor, se prolongará, en un futuro próximo, a todas las actividades de la Empresa.

Ciertamente, es la moda, pero una moda que lleva algo de realidad por dentro cuando hace ya quince años que se publican hechos verdaderamente prometedores.