

Estudio general de los circuitos de estabilización sección de cocción

M. MINERBE

Centre d'Etudes et Recherches des Liants Hydrauliques. Paris

1. INTRODUCCION

Hace 50 años la fabricación del cemento se hallaba en sus comienzos y la industria, muy embrionaria en general, apenas tenía conocimiento de los procedimientos de vigilancia, de los mecanismos parcialmente automáticos o de la importancia de las medidas. Por otra parte, los procedimientos modernos, por lo que se refiere a la fabricación de cemento, no estaban aún desarrollados y la fabricación del clínker se llevaba a cabo exclusivamente por medio de hornos verticales nacidos de los hornos de cal e idénticos a ellos.

Poco después surgieron los primeros hornos rotatorios. Sus dimensiones iniciales eran muy reducidas: 1,5 m de diámetro y 35 m de longitud; su producción era relativamente pequeña: de 50 a 100 t/día.

Los medios de conducción eran particularmente simples, por no decir inexistentes.

Actualmente, a causa de la evolución de las técnicas y con la investigación sobre productos fabricados más homogéneos, más constantes y de mejor calidad, la fabricación de cemento acude a las técnicas de gestión industrial más avanzadas.

El texto que sigue, al describir los métodos modernos de automatismo, tratará de mostrar las ventajas que se pueden conseguir de técnicas de regulación analógica empleadas, bien sea solas, o bien en combinación con el automatismo integral por medio de una calculadora numérica.

Esta es la razón por la cual la totalidad de esta exposición estará dedicada al examen de dispositivos de regulación, con exclusión de los poderosos medios de automatismo.

No se hará mención más que de realizaciones de regulaciones analógicas, con exclusión de regulaciones numéricas. En efecto, las regulaciones numéricas, siendo recomendables cuando se combina una calculadora de proceso con las propias regulaciones, son muy caras y poco aptas para trabajar en tiempo real, a menos de incluir en ellas una costosa memorización.

Es difícil describir los dispositivos de regulación que afectan a tres procesos de fabricación muy diferentes. Por lo tanto, se tratará de hacer el examen de los circuitos de regulación en un orden lógico, subrayando en cada caso a qué procedimiento se adaptan estos circuitos.

2. LOS REGULADORES

Es conveniente precisar que el funcionamiento de un regulador no puede estudiarse más

que a condición de asociarlo al fenómeno perturbador y, sobre todo, a la parte del proceso que regula. Muy a menudo se considera que los reguladores modernos son capaces de adaptarse a todas las condiciones de reglaje.

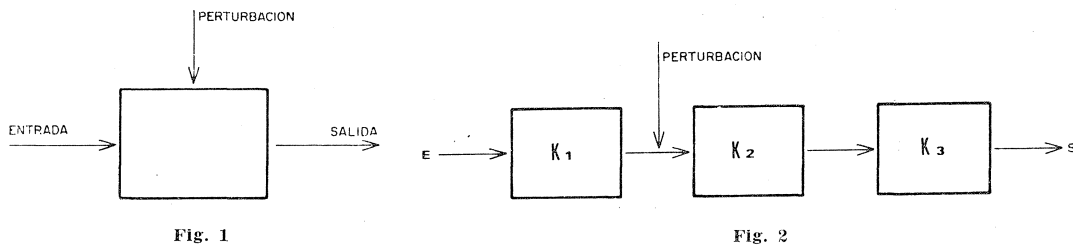
Hay que hacer otra observación importante en estos procedimientos, la cual puede implicar una elección totalmente distinta de las características de los reguladores. En efecto, hay que tener presente que, con mucha frecuencia, ha de contarse con capacidades muy grandes y, sobre todo, *con tiempos de respuesta que a veces pasan de una hora*. Se les llama *constantes de tiempo de la instalación*, y son diferentes a los tiempos de respuesta originados por las inercias debidas a la medida, al regulador, al accionador y a las características de transmisión de la variable teledirigida.

La libertad de una variable sometida a una perturbación depende de sus características. Consideremos la figura 1. En ésta se distingue un valor de salida que es función del proceso y está ligado a una entrada. La relación que los liga es de la forma:

$$S = K \cdot e$$

donde K representa el dispositivo bajo control, y es una función específica del procedimiento.

En esta figura se representa simbólicamente la entrada de una perturbación que puede establecerse a un nivel cualquiera del esquema; después, el valor de entrada e (E en las figuras) hasta el valor de salida S . Según la posición de esta influencia perturbadora, la señal de salida toma un valor diferente y esta noción es muy importante en las evoluciones de los procedimientos no lineales.



Si esta perturbación está ligada a la señal de entrada, la señal de salida es:

$$S = K (e + \epsilon).$$

Si esta perturbación se produce a la salida, la señal de salida es:

$$S = K \cdot e + \epsilon.$$

Si la perturbación alcanza un punto cualquiera de un proceso, para conocer su influencia en él es preciso distinguir el punto de entrada y fraccionar el proceso según la figura 2.

La señal de salida es, pues:

$$S = (e \cdot K_1 + \epsilon) K_2 \cdot K_3.$$

Recordamos que los términos K_1 , K_2 , K_3 , ... K_n representan desarrollos matemáticos lineales o no, cuyos términos están o no definidos.

Se acostumbra a tratar el estudio de los reguladores sobre evoluciones de fenómenos elementales o complejos cuya expresión matemática es la siguiente:

$$v = -a \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} - b \cdot \varepsilon - c \int_0^t \varepsilon dt ,$$

en la que a , b y c son coeficientes de reglaje (o de proporción de acción) y v es la variación de la desviación del reglaje para una variación relativa de la magnitud que hay que reglar.

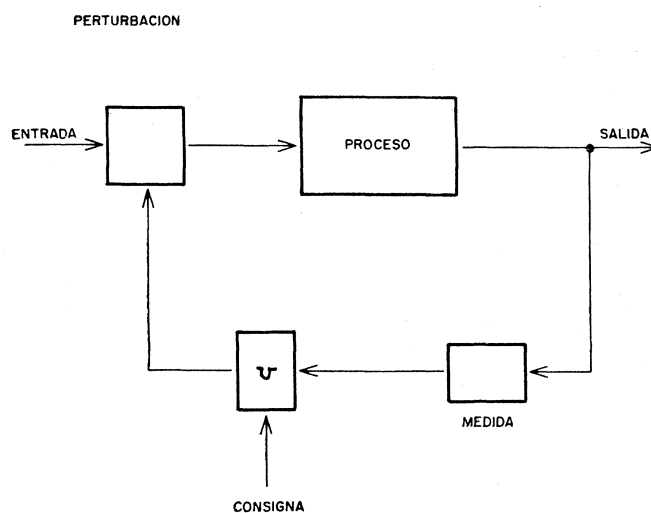


Fig. 3

2.1. Principio de las regulaciones

La figura 3 describe el principio de una regulación. Se puede apreciar que se conecta la salida S a la entrada e por medio de un sistema que comprende:

- una medida de la magnitud S ;
- un comparador u que verifica la diferencia $u = S - c$ (c : valor de consigna).

La señal de entrada del sistema es:

$$\varepsilon = e - u$$

y

$$S = \varepsilon \cdot K.$$

Si G es la ganancia del circuito, la relación de la salida a la entrada llega a ser:

$$S = e \cdot \frac{K}{1 + G \cdot K} .$$

Si K , coeficiente amplificador del fenómeno, es infinito, la salida es:

$$S = e \cdot \frac{I}{G} .$$

Se impone la siguiente consideración: devolviendo una fracción de la señal a la entrada se debe quedar en oposición de fase (cualquiera que sea la amplitud de la señal de corrección).

Para sistemas lineales elementales esta condición se cumple fácilmente. Desde el momento en que se presentan relaciones no lineales en el sistema a regular, las condiciones erráticas limitan las condiciones de amplificación y la estabilidad del circuito. *Esta observación es fundamental para cuanto sigue.*

Es habitual emplear inadecuadamente regulaciones con respuestas correspondientes a tres clases de reglajes: proporcional, integral y diferencial incluso si en la mayoría de los problemas se trata de hacer evoluciones a una constante de tiempo muy grande. En tal caso se puede suprimir el coeficiente a y eliminar así la corrección diferencial.

Por otra parte, y como sucede con mucha frecuencia, el fenómeno que hay que regular experimenta numerosas perturbaciones diferentes que se establecen a diversos niveles del proceso, y para las cuales la corrección debe ejercerse en distintos lugares.

La figura 4 muestra la entrada de las perturbaciones principales que implican desviaciones en la temperatura de la zona de cocción.

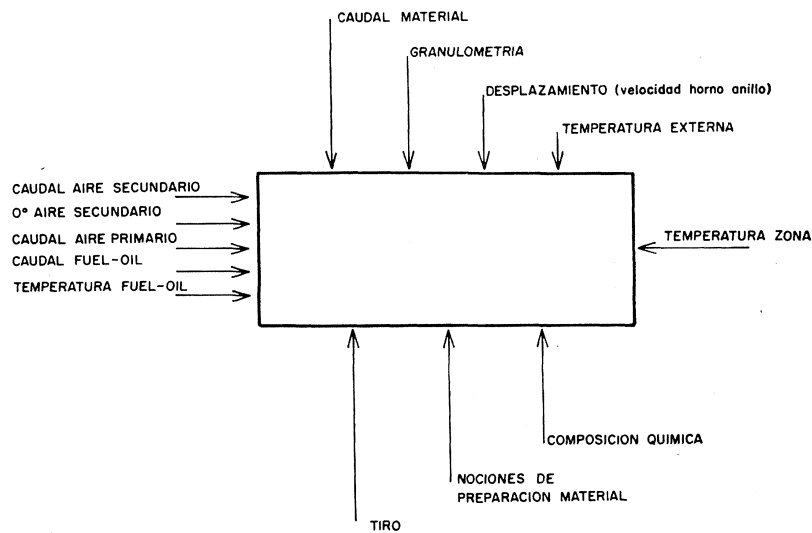


Fig. 4

Así pues, parece difícilmente posible definir las ecuaciones de relación entre las diferentes variables influyentes. Por lo tanto, se debe elegir una variable de reglaje única buscando una estabilización relativa de algunos parámetros complementarios. De esta situación se deducen las regulaciones auxiliares paralelas que deben simplificar la regulación.

A pesar de este artificio, como las regulaciones auxiliares no son perfectas a causa de relaciones no lineales (umbrales no nulos, etc.) se deberá contar con influencias parásitas sobre la regulación fundamental.

En el caso presente conviene discriminar las diferentes entradas fraccionando el proceso (figura 5).

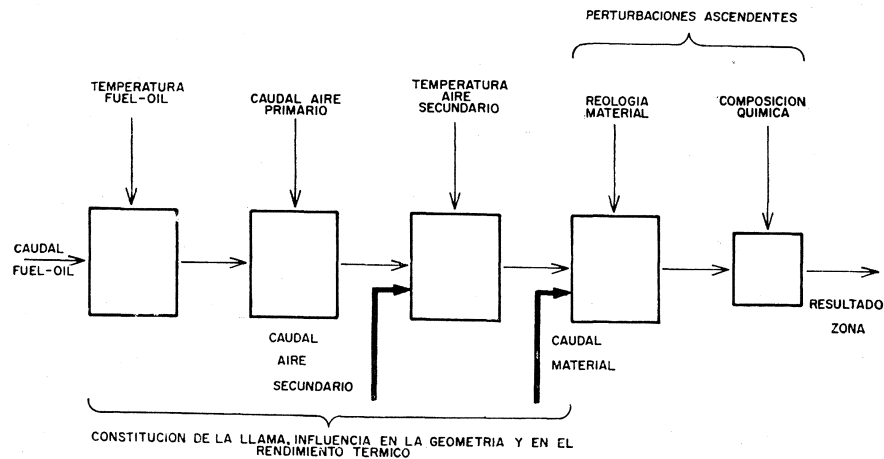


Fig. 5

Pero se comprueba en este caso que cada fenómeno perturbador provoca perturbaciones que no obedecen a expresiones matemáticas idénticas.

Por lo tanto, es forzoso efectuar una elección entre los valores estabilizadores.

Así, pues, el reglaje de la temperatura de zona se realiza:

- por una acción sobre el desplazamiento del material (velocidad variable del horno);
- o por una acción sobre el gasto de combustible (carbón, gas o fuel-oil).

Las dificultades de reglaje de los reguladores se complican igualmente con modificaciones al nivel del procedimiento, las cuales actúan sobre la ecuación de reglaje haciendo variar los coeficientes de forma o de exponentes debidos únicamente a influencias parásitas exteriores.

Una vez expuestas sucintamente todas estas consideraciones generales, se puede comprender mejor que la investigación de procedimientos simples es esencial para facilitar la aplicación de métodos de automatismo en la sección de cocción.

2.2. Descripción de regulaciones elementales

Sea un circuito de regulación que trata de estabilizar la zona de cocción tal como el representado en la figura 6. Se supone evidentemente que la única perturbación es debida a un mal intercambio térmico en la zona, del cual son globalmente responsables: el valor del consumo calorífico, de combustible y gaseoso, la acumulación del producto y su desplazamiento, etc. Realicemos el circuito de reglaje con ayuda de un regulador de todo o nada.

2.21. Reglaje de todo o nada

Se podría producir sucesivamente un gasto de combustible cuando la temperatura de salida reglada θ_{zr} es inferior al valor de consigna.

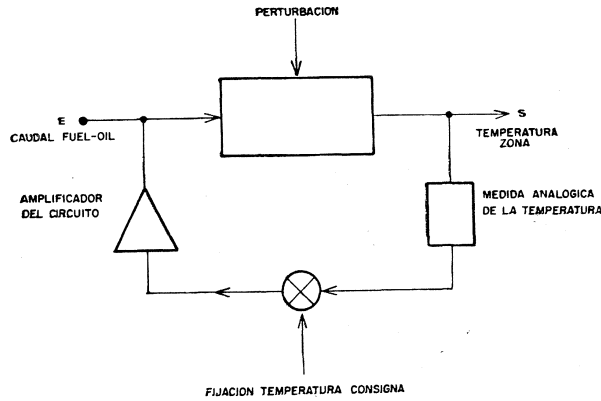


Fig. 6

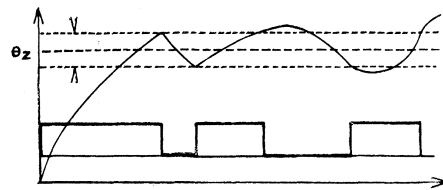


Fig. 7

En este caso, desde el punto de vista de los fenómenos a constante de tiempo muy larga, se observaría un funcionamiento idéntico al de la figura 7.

Al ser muy lento el fenómeno, las desviaciones observadas serían tales que las variaciones resultarían incompatibles con el funcionamiento de la instalación.

2.22. Reglaje de todo o poco

Este constituye una mejora importante. A su límite perfectible se observa un gasto de combustible equivalente a un funcionamiento reglado ideal.

Desgraciadamente, a medida que se acerca el gasto mínimo al gasto medio real, la influencia de la variación disminuye hasta el punto de hacer incompatible la acción de la regulación (si la perturbación engendra desviaciones importantes).

2.23. Reglaje proporcional

Este reglaje ofrece la ventaja de ser independiente de los valores absolutos elegidos. Consiste en asociar una variación de la acción a una desviación del valor reglado, según una ley lineal.

La figura 8 muestra un sistema en que los valores de regulación traducidos a señales eléctricas obedecen rápidamente a la ley:

$$\Delta e = K (\Delta \theta_s)$$

donde:

Δe = variación de entrada del combustible.

$\Delta \theta_s$ = variación de la temperatura de la zona.

K = coeficiente de amplificación del circuito.

La elección del coeficiente K es esencial y define la amplitud de reacción. Sin embargo, un aumento de ganancia impide admitir variaciones importantes de los valores de reglaje y no permite tratar linealmente desviaciones importantes de la temperatura de la zona en razón de las amplitudes implicadas. En los límites de amplificación el funcionamiento se asemeja al todo o nada. Se verá más adelante qué artificios se han imaginado para conservar una sensibilidad más importante que lo que es usual.

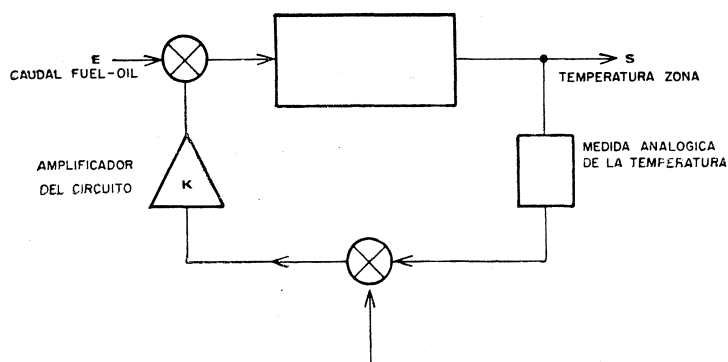


Fig. 8

Como puede apreciarse, jamás se alcanza el valor de consigna y la desviación es proporcional a la importancia del desequilibrio. La razón de proporcionalidad está directamente afectada por la sensibilidad del circuito.

2.24. Reglaje integral

En el caso de fenómenos parásitos importantes el regulador precedente, a causa de la desviación proporcional al error, da lugar a un funcionamiento imperfecto. Esta es la razón por la cual se le da una respuesta integral. En otros términos, para una perturbación dada, la respuesta de corrección es instantánea, máxima y evoluciona según la expresión:

$$e = -K \cdot \int_0^t \epsilon dt ,$$

lo cual equivale a decir que la regulación integral se presenta como una regulación variable de acción proporcional, cuyo coeficiente K aumenta en función del tiempo según una ley exponencial, tendiendo a infinito.

2.25. Regulación P e I

La asociación de los dos sistemas modifica el funcionamiento del regulador para que, en principio, las características de la magnitud de reglaje desaparezcan de la expresión de la constante de tiempo. Solamente los grados de reacción de los dos reglajes definen el acoplamiento del regulador al proceso.

2.26. Regulación por acción derivada

Si los fenómenos perturbadores son de acción rápida y de gran amplitud, la regulación proporcional no llega a reprimir la evolución demasiado rápida del método. La acción integral a causa del retardo ocasionado por su principio no interviene ventajosamente. Por esta razón puede pensarse en introducir un correctivo que sea proporcional a la velocidad de la perturbación:

$$e_o = -K \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} .$$

Esta regulación es particularmente eficaz para controlar fenómenos rápidos. Este tipo de regulador no se emplea jamás solo (como sucede también con el caso del regulador de acción integral) y la regulación por acción derivada va, muy frecuentemente, asociada a las otras dos.

2.27. Regulador P.I.D.

Es la asociación de tres tipos de acción superpuestos, que da una señal de corrección e_o del órgano regulador, de la forma:

$$e_o = -K_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} - K_2 \cdot \varepsilon - K_3 \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt,$$

donde se ve que, después del retorno al valor de reglaje (con $\varepsilon = 0$ y $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$), la variación de la tensión e_o verifica la expresión:

$$e_o = -K_3 \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt .$$

2.28. Introducción de los reguladores en el proceso

Habitualmente se monta el regulador en el proceso, según el esquema de la figura 9. La salida S se transforma analógicamente en una señal eléctrica (o neumática, según la forma de regulación) y se la compara después con la consigna. La señal de desvío es introducida en el regulador que suministrará una señal de comando en relación con su entrada. Según el caso, esta señal será de todo o nada (relé), proporcional, integral, diferencial, o la combinación de dos, tres, etc. ... sistemas. Pero la forma y la construcción de la señal de salida son determinadas en el regulador propiamente dicho.

Las condiciones de regulación implican encontrar, en todo momento, una señal en oposición de fase con la entrada.

Si, por una razón no determinada, la función de transferencia del proceso evoluciona o cambia (perturbación accesoria nascente), el reglaje ejercido sobre el regulador no permite en lo sucesivo conservar una misma sensibilidad óptima.

En otros términos, sería indispensable, para disponer de una ganancia infinita, lo cual es condición ideal de regulación, reglar los parámetros del regulador de forma idéntica a los de la instalación. Si las condiciones hacen alejarse de los parámetros del proceso y en el límite, utilizando una acción directa como la del todo o nada, el bombeo característico por oscilaciones entretenidas es sistemático.

Supongamos ahora que asociamos un gasto de combustible a una temperatura; estaremos en condiciones de establecer:

- una proporcionalidad | Q — combustible
- | θ — temperatura

— un coeficiente K de amplificación:

$$K \cdot d\theta = dQ$$

Si la elección es juiciosa se estará en presencia de una regulación proporcional, *englobando el circuito* del proceso.

De este equilibrio precalculado resultará otra ventaja valiosa, la cual limitará a valores finitos las variaciones engendradas en el órgano de regulación.

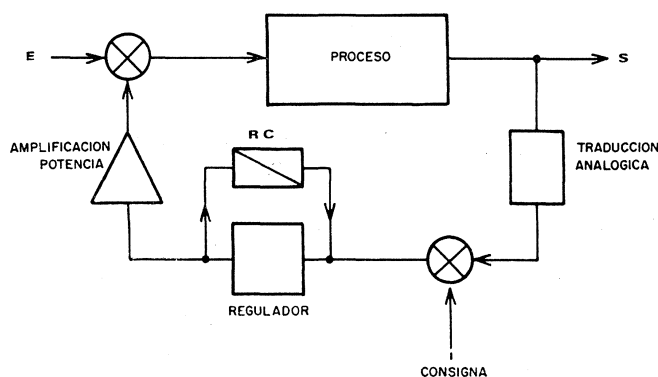


Fig. 9

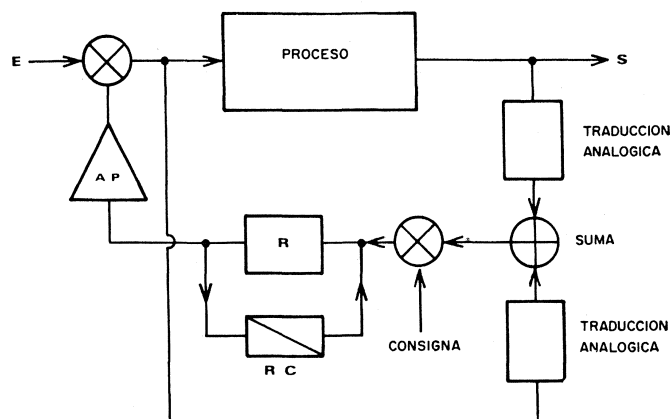


Fig. 10

El valor del coeficiente K puede ser cualquiera, pero debe ser precisado con atención, porque un valor exagerado, al disminuir la desviación de reglaje proporcionalmente, obliga a hacer una elección cuidadosa de la relación real existente entre el valor alcanzado por la variable S y la posición o el valor de la entrada.

Por otra parte, este tipo de regulación, empleado sin artificio, se adapta mal a variaciones de carga perturbadora.

La figura 10 ilustra este montaje, donde los valores de entradas y salidas x e y penetran en el regulador.

2.29. Conclusiones

Por ignorancia del modelo matemático complejo que ordinariamente se encuentra en los circuitos de las secciones de cocción utilizamos este último tipo de regulador, que está en condiciones de dar muy buenos resultados, que pueden mejorarse además en ciertos casos, emprendiendo acciones P.I.D. complementarias.

Los accionadores, de los cuales no hablaremos, rara vez son de todo o nada, pero lo más corriente es que se trate de órganos que poseen en sí mismos una referencia integral. No olvidemos al considerar el circuito que estos órganos participan en forma de circuito de la reacción, y que la asociación de regulador accionador puede modificar la marcha de la reacción.

3. LOS CIRCUITOS DE REGULACION

En el conjunto de una sección de cocción pueden producirse numerosas perturbaciones. Son debidas a intervenciones externas: tiro natural, temperatura, intemperie; a causas artificiales: modificación del rendimiento de las máquinas, o incluso, y sobre todo, ligadas a interferencias de reglaje; estas últimas son las más frecuentes. Finalmente, estas perturbaciones son tributarias de la carga o del caudal de la instalación.

Además, estas perturbaciones pueden ser de primer orden y, en este caso, provenir de variaciones de composición mineralógica y química del crudo.

Los circuitos de regulación están destinados, por lo tanto, a atenuar las fluctuaciones ocasionadas por las perturbaciones que tienen lugar a la entrada del horno, en el caso de una variación del crudo: naturaleza de éste, condiciones de desplazamiento, etc., o bien por las perturbaciones que tienen lugar a la salida del mismo: consumo calorífico modificado, por ejemplo.

Enumeraremos, pues, un cierto número de circuitos que han tenido y tienen todavía aplicaciones.

Pero hay que indicar desde ahora que la estabilización, siempre parcial, puede ser independiente: es el caso de uno o dos circuitos como la regulación de una temperatura o de un tiro; o bien puede ser también múltiple pero siempre independiente, y, por último, puede estar interconectada en el proceso, es decir, en estrecho enlace (eléctrico) y con reacciones de una sobre otra. Finalmente, y ello será objeto de la descripción final, se puede tender al automatismo ligando las variables a un mismo piloto o a varios.

Si se desea aumentar las interacciones, el precio de una instalación semejante se hace prohibitivo y corre el riesgo de superar los fines económicos a conseguir.

En las condiciones actuales, la ausencia de leyes matemáticas conocidas y el mal conocimiento de las leyes físicas que intervienen impiden por otra parte un tal desarrollo.

3.1. Magnitudes variables y órganos reguladores

Se ha representado en la figura 11 un esquema simplificado de la sección de cocción. Para una comprensión más fácil la división de la misma ha sido somera y define siete elementos que son los siguientes:

- zona de calentamiento del material 20°-80°C
- zona de secado 80°-100°C
- zona de precalentamiento y de disociación 100°-600°C

— zona de descarbonatación	600°-1.100°C
— zona de clinkerización	1.100°-1.500°C
— primera zona de enfriamiento llamada de “congelación”	1.400°-700°C
— zona de enfriamiento	700°-50°C

Es evidente que este fraccionamiento es empírico y simulado para las necesidades de la explicación. En realidad:

- 1°) — Estas zonas son infinitas.
- 2°) — Estas zonas se superponen mutuamente.

Hemos podido detectar 64 grandes causas que influyen en el funcionamiento de la instalación. Algunas de ellas son prioritarias, como: el tiro, el consumo calorífico, etc.; algunas otras son secundarias en su efecto: aire exterior, etc.

Como quiera que sea, un gran número de ellas son repetitivas en función de la división escogida. Así ocurre, por ejemplo, con los niveles de temperatura o los volúmenes gaseosos. Es evidente que una división más profunda implicaría un mejor conocimiento de las perturbaciones; pero como en este caso las variables tenderían a infinito, no se dispondría de ningún medio eficaz de control.

Por otra parte, las 64 variables mencionadas en principio son todas medibles, y esto es lo que importa.

Una división mayor pertenece en el momento presente al dominio de la especulación científica.

En la enumeración siguiente, se designan con la letra *P* las variables de proceso, con la letra *I* las variables comandadas o de intervención, y con la letra *A* los “accidentes del proceso”:

1 Velocidad del ventilador o caudal gaseoso	<i>I</i> y <i>A</i>
2 Presión en la chimenea	<i>P</i>
3 Temperatura de gases a la salida	<i>P</i>
4 Anillo de pasta	<i>A</i>
5 Viento (condiciones atmosféricas)	<i>A</i>
6 Caudal de crudo	<i>I</i>
7 Reología del crudo	<i>A</i>
8 Contenido de agua	<i>P</i> , <i>I</i> o <i>A</i>
9 Porosidad	<i>P</i> o <i>A</i>
10 Velocidad de desplazamiento	<i>I</i> o <i>A</i>
11 Carga + tolva	<i>I</i> o <i>A</i>
12 Desplazamiento del sistema de cadenas	<i>A</i> o <i>P</i>
13 Grado de llenado	<i>A</i> o <i>P</i>
14 Gradiente de temperatura	<i>P</i>
15 Temperatura de los gases	<i>P</i>
16 Porosidad	<i>P</i>
17 Caudal de gases	<i>P</i>
18 Desplazamiento	<i>P</i>
19 Anillos y retenciones	<i>P</i>
20 Gradiente de temperatura	<i>P</i>
21 Velocidad de intercambio	<i>P</i>
22 Gradiente de temperatura	<i>P</i>

23 Estado del material	P
24 Caudal del material	P
25 Temperatura del material	P, A o I
26 Cambios térmicos	P
27 Anillo	P o A
28 Aire falso	A
29 Pérdida de material	A
30 Aglomeración	A
31 Gradiente térmico	P o I
32 Temperatura de los gases	P o I
33 Temperatura exhaustor	P e I
34 Temperatura del material	P e I
35 Pérdidas con el exterior	A
36 Desplazamiento, anillos	A
37 Nodulización	P
38 Caudal de combustible	I
39 Viscosidad del combustible	A, P e I
40 Pulverización	A
41 Temperatura	I y A
42 Presión principal del combustible	I y A
43 Calidades caloríficas	A
44 Calidades químicas (álcalis, p. ej.)	A
45 Caudal de aire primario	I y A
46 Temperatura del aire primario	I y A
47 Relación de los dos aires primarios	I
48 Velocidad del aire primario	I
49 Caudal del aire secundario	I y P
50 Presión de equilibrio	P, I y A
51 Temperatura del aire secundario	P, I y A
52 Velocidad de la parrilla del enfriador	I y A
53 Presión en la cámara I	P, I y A
54 Porosidad	P, I y A
55 Caudal del aire insuflado	P, I y A
56 Velocidad del ventilador	I y A
57 Repartición del clínker	P e I
58 Temperatura de radiación	P
59 Presión bajo la parrilla	P, I y A
60 Caudal del ventilador	P, I y A
60 bis, ter, Caudal del ventilador	P, I y A
61 Volumen gaseoso	P, I y A
62 Velocidad del ventilador exhaustor	I y A
63 Temperatura del aire expulsado	P e I
64 Temperatura del clínker	P, I y A

De estos 61 ó 66 parámetros algunos son la resultante de la modificación de otros, ya sea en relación directamente proporcional o lineal, o bien según leyes físicas diversas; algunos son interdependientes. Pero en una instalación en equilibrio indiferente, la modificación menor de uno de los parámetros acarrea *ipso facto* una variación concomitante

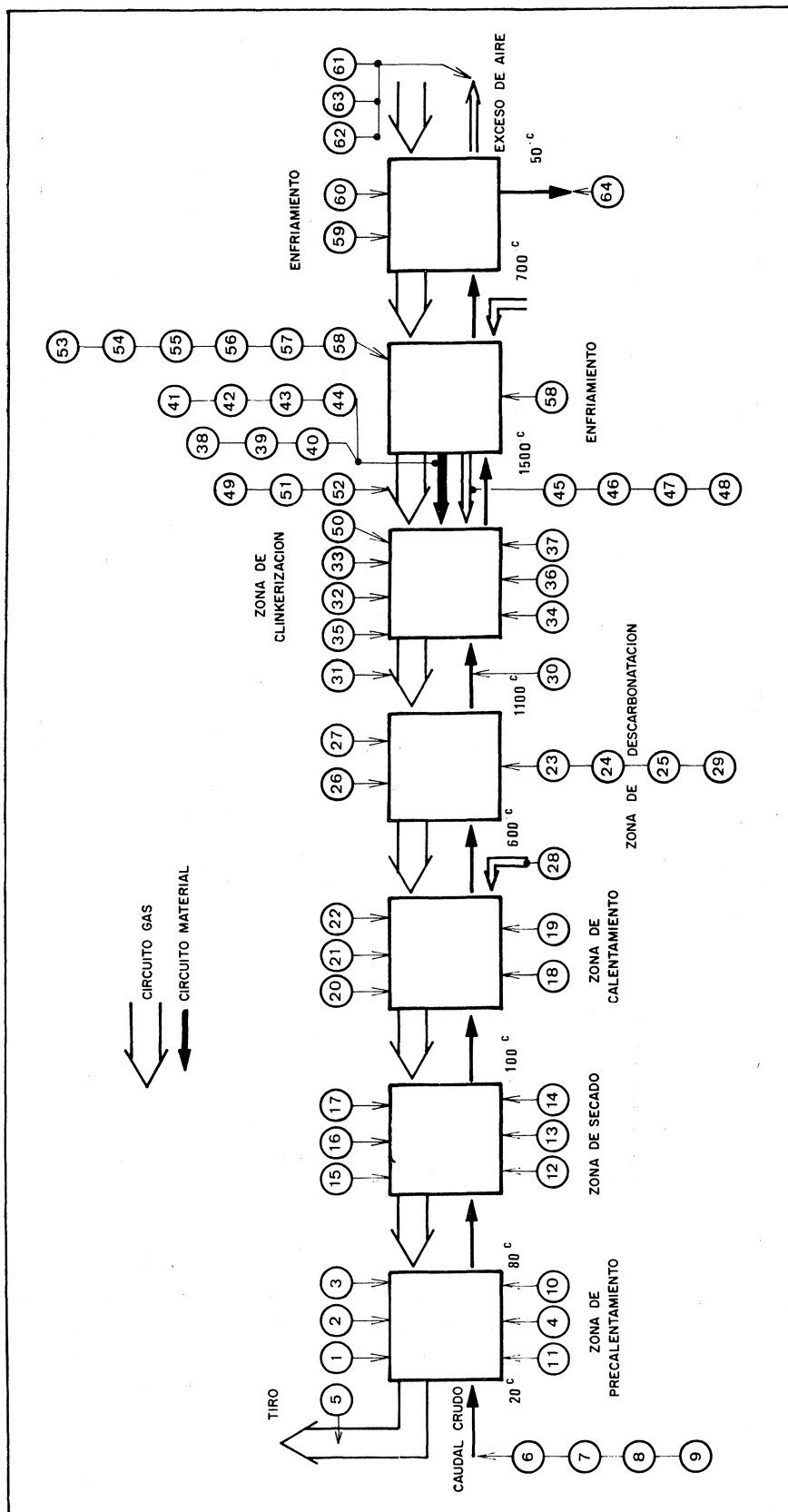


Fig. II

de todas las demás variables, incluso si la ineficacia o la precisión de las medidas no permiten detectar una desviación sensible.

Esta idea da a entender *que no hay nunca equilibrio indiferente permanente*.

En cada instante dt , una modificación de un parámetro $dP_{(h)}$ acarrea variaciones acumuladas dP ($l \dots$ a $n + 1$) de todas las variables. *Este punto justifica el empleo de las estabilizaciones esenciales.*

En fin, todos sabemos que las tres variables primarias son:

- el consumo del crudo;
- la calidad fisicoquímica del crudo;
- el consumo calorífico (balance térmico constante).

Estas tres variables ejercen acción preferentemente en todas las demás variables del proceso y constituirán la base de nuestras preocupaciones siguientes:

Los órganos reguladores: válvula, velocidad ventilador, compuertas, mariposas, balanzas, velocidad motores, consumos, etc., son accesibles por mando efectuado a distancia, pero están sujetos a ajustes. Su estabilización aporta una clara mejora del proceso, lo que implica una calidad de medida del parámetro pocas veces alcanzada.

Vamos a describir sucesivamente cierto número de circuitos tomando como guía —ya que hay que escoger empíricamente un sentido— el circuito gaseoso. El examen de los circuitos tendrá poco a poco en cuenta los distintos procedimientos: vías húmedas, semisecas y secas.

Se comenzará por circuitos independientes o tratados como tales; luego se complicarán los circuitos citando los acoplamientos según el proceso.

3.11. *Enfriador*

Para hacer útil la continuación de esta exposición, solamente nos interesamos por el enfriador de parrilla cuyos constructores son Polysius (Récupol), Fuller, Smidth (Folax).

El objeto esencial de los enfriadores modernos es el de utilizar las calorías de recuperación del templado y enfriamiento del clínker para proporcionar a la combustión un rendimiento máximo.

En el esquema 12 se representan las medidas usuales de un enfriador.

3.111. ΔP

Presión o equipresión en la cabeza del horno que resulta del equilibrio gaseoso entre el tiro del horno (utilizado por la combustión en el horno rotatorio) y el tiro en el exhaustor del enfriamiento —exceso de aire de enfriamiento—. Este equilibrio debe permanecer constante y el control debe ser de buena sensibilidad. Efectivamente, una variación de presión del orden de 1 mm de c. a., en función de los consumos gaseosos 50.000 m³/h a 180.000 m³/h, produce desviaciones que se traducen particularmente por variaciones en la geometría de la llama.

Para estabilizar este parámetro, se dispone de un órgano regulador. Es el caudal auxiliar del ventilador exhaustor. La perturbación procede del tiro y de todo lo que afecta a su valor.

Las variaciones usuales comprobadas durante el funcionamiento normal pueden alcanzar ± 3 mm de c. a.

La sensibilidad de respuesta de los manómetros industriales limita la precisión alcanzada en el milímetro de columna de agua. Generalmente variaciones de corrección de las válvulas de 10 a 15 % son a menudo necesarias para tal estabilización.

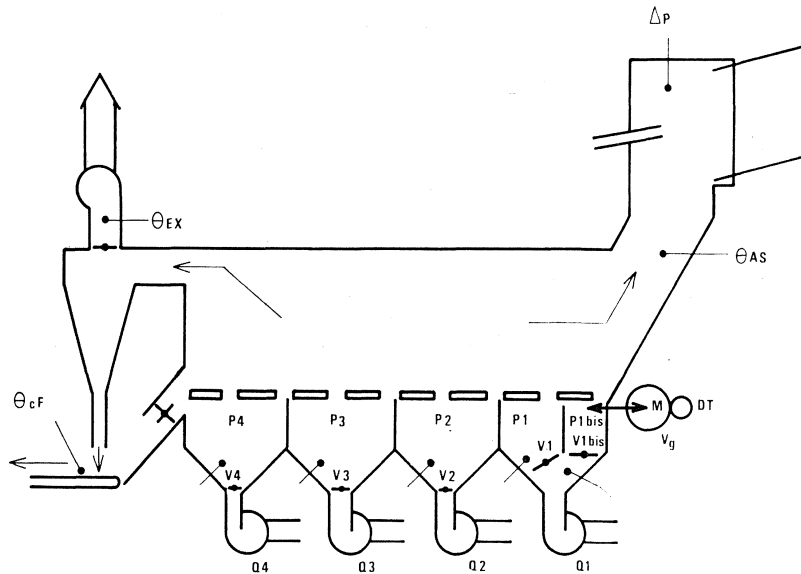


Fig. 12

El punto de medida debe estudiarse con mucho cuidado. Su emplazamiento geográfico depende generalmente de los volúmenes gaseosos. La equipresión se sitúa hacia arriba o hacia abajo según que el tiro sea preponderante sobre el soplado. En general se retiene la posición de la toma en la cabeza del horno y ésta es la resultante de 3 puntos de toma.

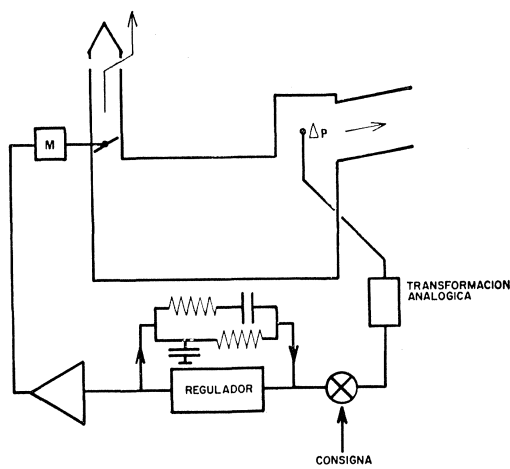


Fig. 13

El circuito de la figura 13 es clásico y no necesita comentarios. El regulador puede tener características proporcionales o proporcional integral. Su aplicación práctica se representa en la figura 14, en la cual se ve el amplificador adaptador de medida cuya salida está opuesta a la consigna. El valor de desviación acciona el regulador P1 que da unos impulsos de paso variable al contador de la motorización de la válvula.

En la figura 15 se representa el dominio de proporcionalidad entre el valor de presión y la posición de la válvula utilizada en las técnicas CERILH.

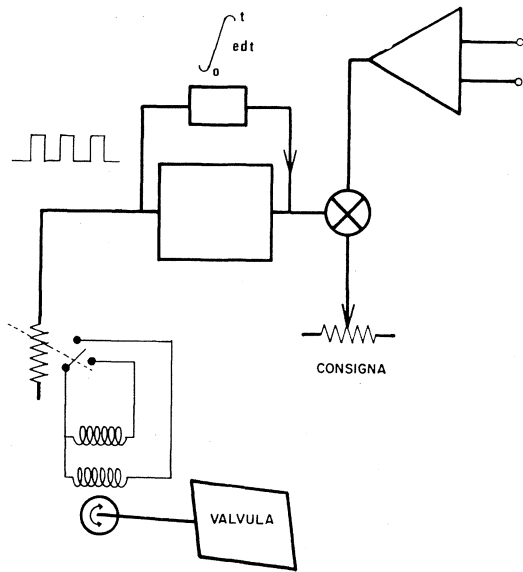


Fig. 14

3.112. Aire secundario

El problema de estabilización de la temperatura del aire secundario lo estudian numerosos investigadores desde hace aproximadamente 20 años. Si hasta entonces no se ha conseguido ninguna realización perfecta, es por que la medida de esta temperatura resulta difícil y muy a menudo defectuosa. Nosotros mismos hemos intentado resolver esta dificultad (3) y el sistema preconizado es empleado muy a menudo por los constructores de hornos. La caña de aspiración proporciona una medida más justa que el habitual termopar.

Lo que importa en la estabilización del proceso de combustión es el hecho de proporcionar un caudal calorífico constante, a una temperatura constante.

Cuando se examinan las relaciones que existen entre la temperatura del aire secundario y la presión bajo la parrilla del enfriador, se comprueba habitualmente una correlación

excelente. En particular, cualquier variación en el grado de llenado de la parrilla (actuando sobre su velocidad) permanece en estrecha relación y el medio puede utilizarse para regularizar la temperatura del aire secundario.

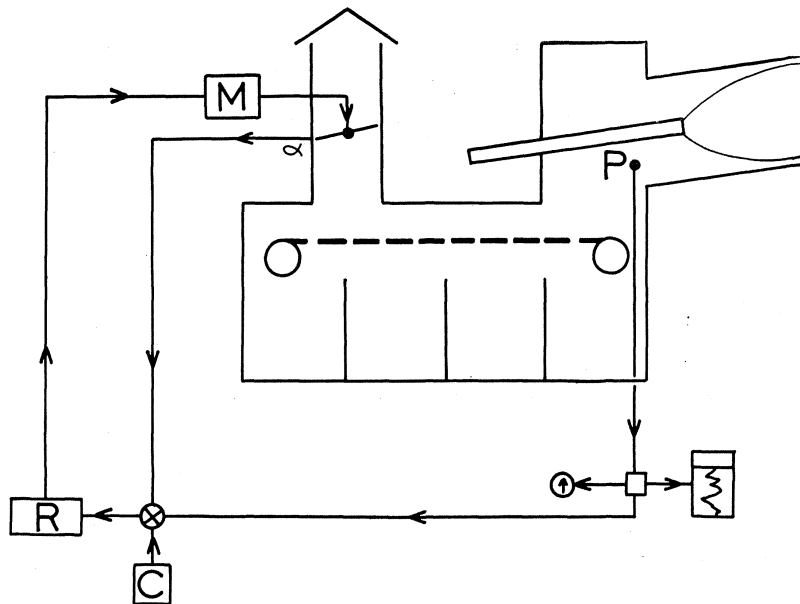


Fig. 15

Esta buena correspondencia se explica sencillamente cuando se sabe que los intercambios

térmicos son tributarios de la temperatura de clínker, así como también de la porosidad del lecho.

A veces es difícil poner de relieve esta relación si no se tiene cuidado de mantener un caudal de aire constante bajo la cámara.

La figura 16 es una lista experimental de tres valores que son:

- la temperatura del aire secundario;
- la temperatura de la zona, en un punto preciso, y
- la presión bajo la parrilla.

Todas estas curvas son del mismo sentido, su evolución —aparte de algunos desfasajes procedentes de otros parámetros— permite comprobar la interdependencia.

Se ve, por lo tanto, la influencia de la temperatura del aire secundario y de la presión bajo la parrilla (volumen gaseoso) en la posición de la llama.

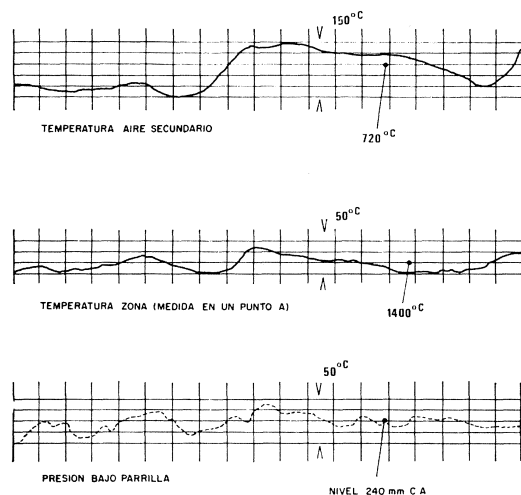


Fig. 16

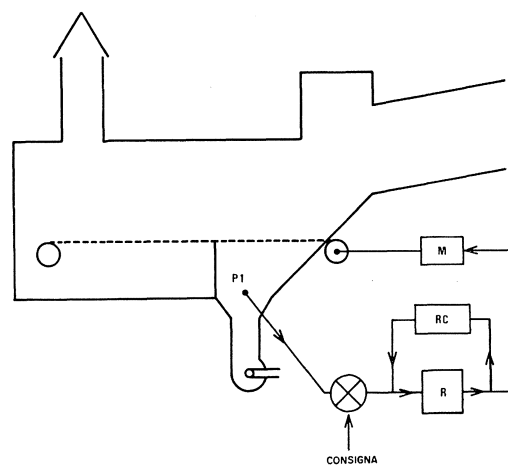


Fig. 17

Para mantener constante la porosidad del lecho, se puede actuar sobre la velocidad de la parrilla. La imagen de la porosidad puede ser representada, a caudal constante, por la medida de la presión bajo la parrilla.

La figura 17 muestra tal regulación tratada de forma clásica mediante un regulador P1.

La figura 18 representa esta misma regulación por el método de proporcionalidad CERILH (proporcionalidad conseguida por el propio proceso); se observa el retorno al regulador de una fracción de la tensión de velocidad de la parrilla.

Por último, la figura 19 muestra la regulación tipo Lafarge (Fuller), que ofrece la particularidad de estar mejor adaptada al largo tiempo de transferencia del material sobre la parrilla. La originalidad consiste en separar la primera cámara de soplado en dos partes desiguales, siendo la primera muy corta. Esta pseudocámara se llama “predictiva”, ya que con ella se pueden detectar más rápidamente eventuales variaciones de espesor en el lecho. En el regulador entran:

- el valor de la presión cámara 1;
- la diferencial entre 1 y 1 bis.

El porcentaje de la diferencial sobre el valor absoluto de la presión de la cámara 1 está en función de las características del enfriador y de su funcionamiento, así como del estado granulométrico del clínker.

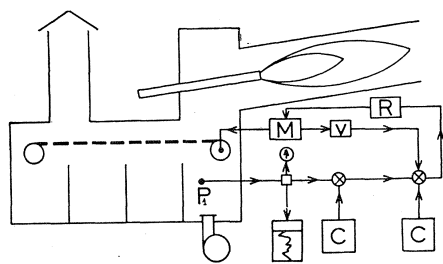


Fig. 18

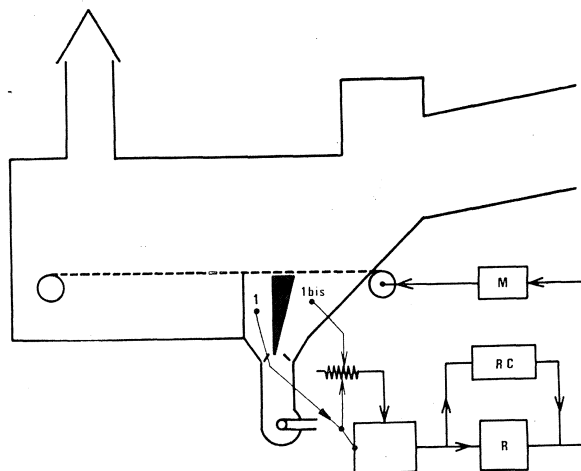


Fig. 19

Este control es bastante delicado, pues el sentido de la diferencial puede invertirse eventualmente por otras causas.

La aplicación de las otras dos regulaciones a un enfriador que tenga doble cámara de entrada da buenos resultados si la medida de presión y la estabilización se efectúan en la cámara corta.

Se observan habitualmente los siguientes resultados:

— período estable:

— sin regulación	± 50 mm de c. a. para 270 mm de c. a.
— regulación según fig. 17	± 20 mm de c. a. " " " "
— regulación según fig. 18	± 10 mm de c. a. " " " "
— regulación según fig. 19	± 20 mm de c. a. " " " "

— en caso de anomalías importantes en el desplazamiento:

— sin regulación	+ 150 mm de c. a. para 270 mm de c. a.
	— 50 mm de c. a. " " " "
figura 17	± 65 mm de c. a. " " " "
figura 18	± 30 mm de c. a. " " " "
figura 19	± 25 mm de c. a. " " " "

3.113. Regulación de los caudales gaseosos

En la figura 12, y en el ejemplo dado, figuran cuatro ventiladores.

Puede ser interesante estabilizar su consumo actuando sobre su velocidad. El procedimiento Lafarge Fuller lo prevé sistemáticamente en Ql empleando un motor de corriente continua y velocidad variable.

El costo elevado de este aparato limita su empleo al primer compartimiento. Para los siguientes se puede uno conformar con ejercer una acción sobre las válvulas de control en las siguientes condiciones:

- buena estabilidad de la presión de la cámara I;
- clínker homogéneo;
- equipresión estabilizada;
- temperatura zona regular.

Más adelante veremos la utilidad de poder controlar el consumo de las cámaras anexas.

3.114. *Control de la eficacia del enfriador*

(Regularización de la temperatura del clínker a la salida).

Si los circuitos precedentes se han utilizado, puede ser útil intentar limitar el aire de enfriamiento para conseguir un clínker perfectamente enfriado.

En este caso se puede someter el consumo de los ventiladores de las cámaras 2 a n con objeto de lograr una regularización de la temperatura del clínker.

Este procedimiento exige un buen captador para medir la temperatura del clínker a la salida del enfriador. Esta medida se efectúa generalmente mediante un pirómetro óptico o un bolómetro; muy pocas veces con un termopar "volante".

Cuando esta medida aparece imposible, se puede tomar una imagen de los cambios midiendo la temperatura alcanzada por los gases en el exhaustor. Pero en este caso el sentido de la variación depende no sólo de los cambios térmicos aire-clínker, sino también de la separación gaseosa horno-exhaustor, y es posible comprobar variaciones de sentido en la regulación. Esta comprobación limita el empleo de esta "temperatura imagen" como variable por estabilizar. Si se toma cuidado en equilibrar los consumos arriba abajo, esta regulación puede dar buenos resultados. Unas desviaciones medidas de 200°C de los gases en el exhaustor se hallan reducidas a 20°C en el mejor caso. El equilibrio de los caudales arriba abajo es delicado, pero se trata bastante bien mediante calculadoras numéricas o analógicas.

3.12. *Caldeo*

Cualquiera que sea el procedimiento, hay que distinguir en este capítulo los distintos combustibles, que son, esencialmente:

- sólidos: los carbones;
- líquidos: el fuel-oil;
- gaseosos: gas natural;

y además la mezcla de dos de estos elementos que se llama: caldeo mixto.

El caso de un caldeo mixto necesita generalmente una estabilización sobre el elemento más perturbado. Cualquiera que fuere, no es corriente actuar en ambos combustibles.

Las variaciones de consumo calorífico son causadas por:

- defectos de alimentación;
- variaciones en la calidad;
- variaciones en las temperaturas.

3.121. *Carbón*

Este combustible es, por regla general, heterogéneo por naturaleza. Los defectos de alimentación se agravan en el caso de una distribución no ponderal (distribución para plato dosificador, por rosca, etc.).

Intervienen otros factores como:

- la granulometría;
- la naturaleza fisicoquímica (cenizas, inquemados, etc.);
- la humedad residual;
- la temperatura.

Ninguno de estos parámetros es fácilmente accesible.

3.122. *Fuel-oil*

Aunque son más estables en calidad, los fuel-oils industriales pueden variar en proporciones no despreciables. El caudal es función:

- del estado del quemador;
- de la presión primaria;
- de la viscosidad y su relación con la temperatura de recalentamiento y la calidad del fuel-oil.

Además, la forma de la llama está ligada con la calidad de pulverización.

3.123. *Gas*

Las mismas observaciones se aplican al gas natural pero, aunque es posible modificar en una gran relación el caudal de combustible sin cambiar las calidades térmicas de la llama, también es difícil lograr buenos resultados con el gas.

3.124. *Circuito de regulación*

Para el estudio de este circuito, hay que conocer con precisión el exceso de aire disponible en el horno. Los procedimientos modernos toleran caudales gaseosos reducidos y un exceso de oxígeno pequeño del orden del 1 %.

So pena de trabajar en medio reductor, hay que contentarse con variaciones inferiores o a lo sumo iguales a este exceso de aire.

En esta ocasión recordemos que un medio reductor reduce aproximadamente a la mitad el poder calorífico de un combustible.

3.13. *Estabilización de la temperatura de zona por acción sobre el caudal del combustible*

Este circuito se utiliza en diversos procedimientos y puede considerarse como la más importante de las regulaciones de la sección de cocción.

Se comprueba que:

- la temperatura de zona está ligada a la calidad del clínker; esta temperatura experimenta variaciones del orden de $\pm 100^{\circ}\text{C}$.

La calidad de la regulación es función de la calidad de la medida. Para esta última existen numerosos captadores, basados todos en un principio de pirometría óptica sin contacto:

- pirómetro óptico eléctrico con célula fotoeléctrica;
- pirómetro óptico llamado de dos colores;
- bolómetro sin óptica de fuerte inercia e integrador en el espacio y en el tiempo.

El pirómetro óptico de dos colores (General Electric) y Siemens (Ardocol) tiene la ventaja de estar exento de las pantallas que existen entre el cuerpo de irradiación y el órgano de detección.

Su precio es elevado y su respuesta es casi instantánea.

El bolómetro integrador es sensible a las variaciones del medio ambiente y su uso no se aconseja más que en condiciones de empleo muy definidas: ausencia de polvos o constancia en la emisividad de los polvos.

Su precio muy accesible, su sensibilidad mejor que 1°C y su escala reducida (1.300° - 1.500°C) lineal son unos triunfos más en sus cualidades de integración temporal.

El examen de las variaciones de temperatura de la zona demuestra que éstas son tributarias de la posición de la clinkerización.

Por ello, no es necesario que se quiera corregir desviaciones de tal amplitud ($\pm 100^{\circ}\text{C}$).

Lo mejor consiste en buscar la estabilización de la zona de clinkerización, aferrándose en mantener fijas las intervenciones principales: temperatura del aire secundario, caudal primario, etc.

En el caso de una admisión de combustible poco regular, la regulación permite que la cocción mejore claramente. De otro modo, las variaciones de temperatura proceden de una modificación del caudal de material o de su desplazamiento. También es posible corregirlas por modificaciones consecuentes del caudal de combustible.

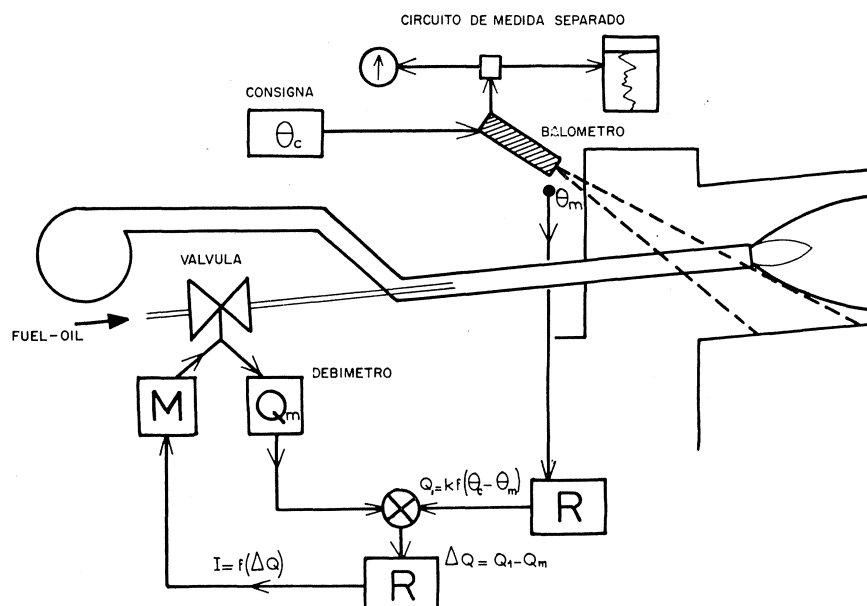


Fig. 20

En la figura 20 se describe esta realización que comprende:

1 captador: bolómetro CERILH,

cuya señal se utiliza para una indicación y un registro. Esta misma señal se opone a un valor de consigna, tributario del grado de cocción. La desviación resultante acciona un regulador, que modifica la posición de la válvula primaria (caso del fuel-oil). El caudal de fuel-oil se inserta en el circuito.

En condiciones óptimas, la estabilización alcanzada es del orden de 10°C. En la figura 21 se muestra el detalle eléctrico de una realización de este tipo.

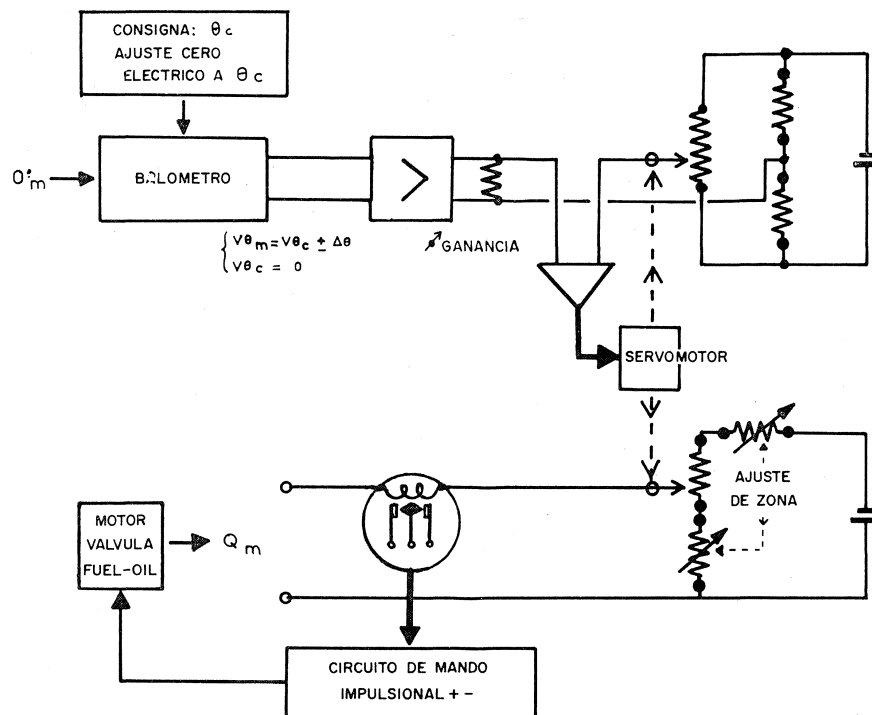


Fig. 21

3.14. Estabilización de la temperatura de zona por acción sobre la velocidad de desplazamiento

Si las tolerancias en el caudal del combustible son nulas o pequeñas, hay que encontrar un paliativo que consista en actuar sobre el tiempo de permanencia del material en la zona de cocción.

Para hacer esto, se puede aminorar o acelerar la velocidad del horno (dentro de unos límites razonables).

Sin embargo, esta regulación corre el riesgo de ver invertirse su acción si las perturbaciones son ascendentes o descendentes y el empleo de esta técnica tropieza con esta dificultad. Más adelante veremos que la posibilidad de modificar el desplazamiento existe para estabilizar las variaciones de temperatura o de preparación del material a la salida del horno (o en un punto cualquiera).

3.15. Estabilización de la temperatura del aire primario

En el caso de utilizarse un combustible sólido (carbón), es costumbre reciclar una parte del aire secundario para secar, en un molino secadero, el combustible utilizado en el horno. Las variaciones de caudal gaseoso son compensadas por la regulación de equipresión, pero la temperatura del aire primario, que resulta de la mezcla de dos orígenes, caliente y fría, corre peligro de modificar mucho las características de la llama. Por este motivo se impone una regulación, que debe acumularse con una regulación del caudal global.

Las estabilizaciones de esta temperatura y de este caudal alcanzan el 2 %.

3.16. Estabilización de la velocidad del horno

Se menciona esta estabilización ante la gran importancia que tiene. Existen numerosas causas de deslizamiento debidas al tipo de motor de arrastre o a las cargas variables de la instalación. Estas regulaciones son muy clásicas para comentarse.

3.17. Temperatura intermedia

Es importante conocer esta temperatura en las regulaciones de la sección de cocción, ya que permite darse cuenta del estado de preparación del material en el punto medio de la instalación. Pero muy a menudo este valor no está integrado en un circuito de regulación a causa de las dificultades de medida.

3.171. Caso de la vía húmeda

Como se muestra en la figura 22, se puede estabilizar el valor de la temperatura de des-carbonatación modificando el caudal gaseoso que atraviesa el horno, ya sea directa o indirectamente.

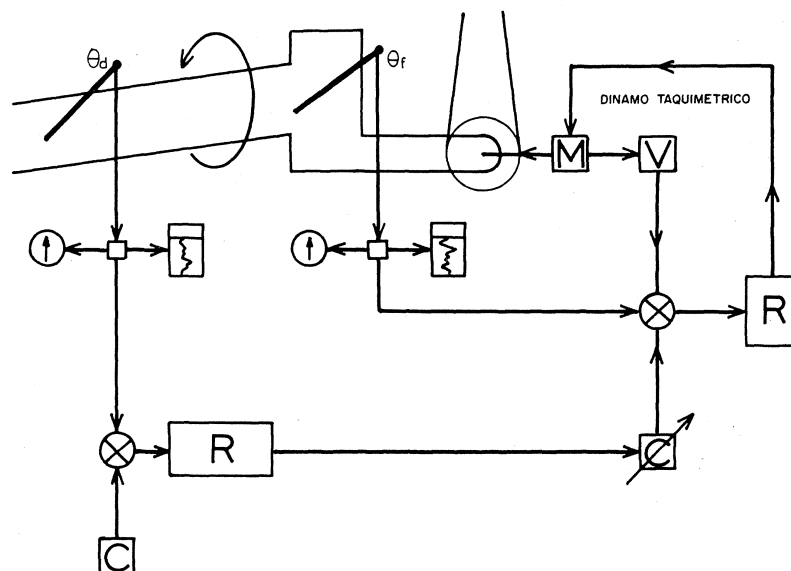


Fig. 22

El primer método es difícil de poner en práctica a causa de las inercias en juego y de su largo tiempo de respuesta.

El segundo método sirve para establecer la consigna del circuito temperatura de salida/ventilador de tiro.

Efectivamente, según las dificultades de movimiento a través del sistema de cadenas, puede ocurrir que la temperatura media evolucione más rápidamente. En este caso, con una simple regulación de la temperatura de los humos no se puede lograr una estabilidad de la transmisión del material.

Este tipo de circuito compuesto se encuentra, a veces, para regular otros problemas. Siempre es difícil dosificar la acción principal de un parámetro respecto al otro. La figura 23 ilustra la realización eléctrica de esta doble regulación. La utilización del amplificador 3, cuya ganancia es ajustable, permite dosificar la proporcionalidad entre las desviaciones de las variables y el tiro.

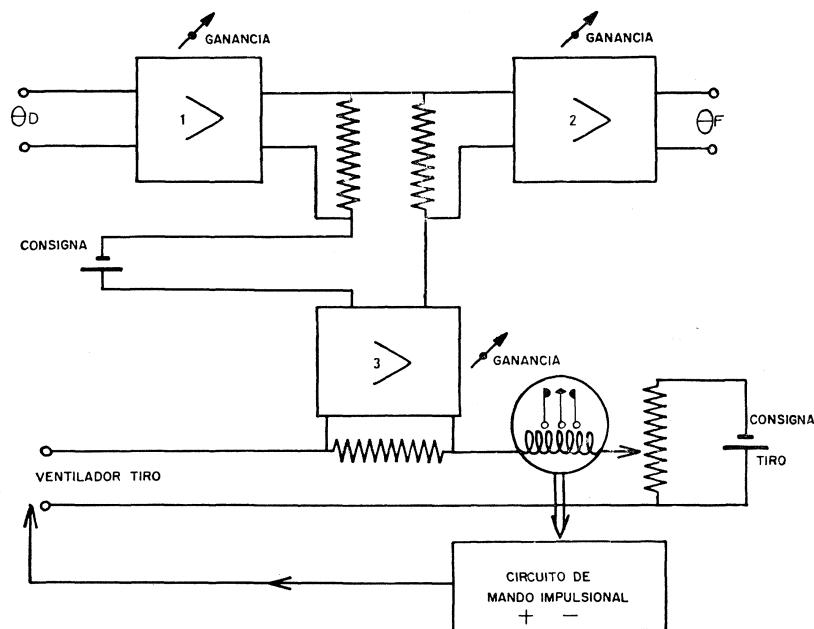


Fig. 23

Modificando las ganancias de los amplificadores 1 y 2, se puede dosificar la proporcionalidad entre ambas variables y hacer una de éstas preferente respecto a la otra. Por último, el amplificador 3 puede ajustarse de tal modo que una saturación de entrada (o de salida) limite la excursión del tiro a unos valores admisibles.

En la figura 24 se describe otro modo de realización eléctrica, parecido al esquema de principio 22.

De estas dos maneras, se puede conseguir un coeficiente de estabilización igual a 10.

3.172. Caso de la vía semiseca

En la figura 25 nos encontramos ante un procedimiento más complejo presentado global-

mente. No es posible en efecto que se quiera tratar una temperatura e ignorar el medio ambiente que desempeña un papel importante en el proceso.

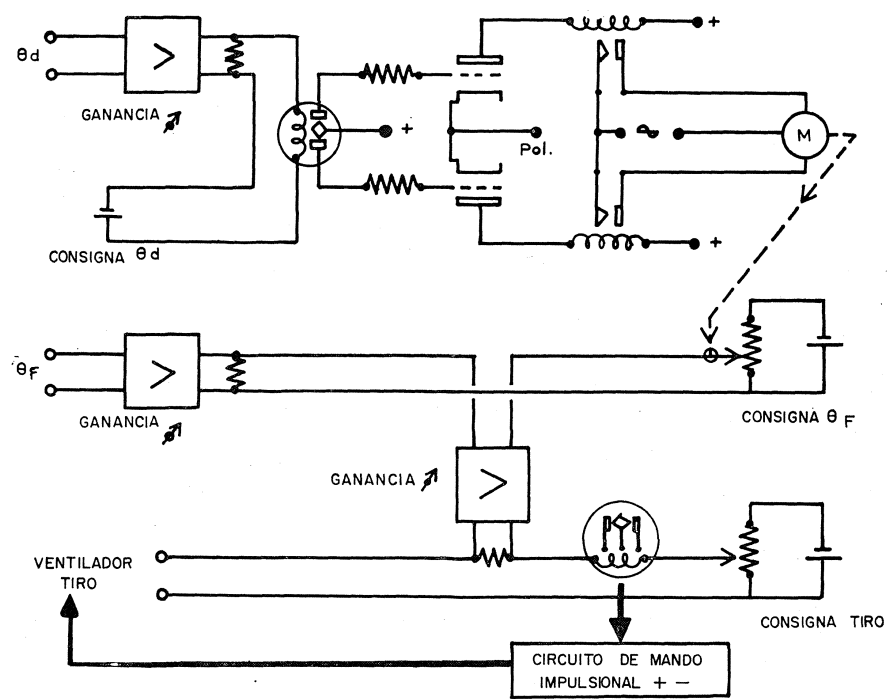


Fig. 24

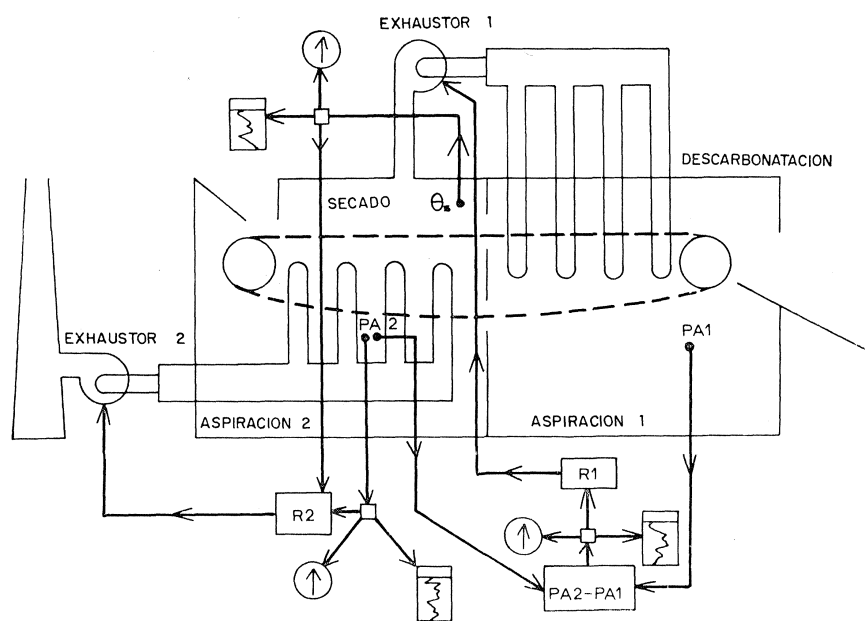


Fig. 25

La temperatura de la cámara de descarbonatación resulta:

- de las variaciones ascendentes que pueden ser debidas:
 - al nivel de la temperatura de la cámara de secado;
 - a la porosidad de la capa de gránulos;
 - al caudal del ventilador 1;
 - al caudal del ventilador 2;y, por consiguiente, a las depresiones de las 2 cámaras;
- a la aptitud del crudo;
- al contenido de agua de los gránulos;
- a la velocidad de desplazamiento (velocidad parrilla), etc.;
- de las variaciones descendentes que se deben principalmente:
 - a variaciones de caldeo;
 - al grado de preparación de los gránulos que penetran en el horno rotatorio y modifican los intercambios de calor y, por lo tanto, la temperatura de los gases.

Se comprueba que hay que estabilizar:

- 1.º) — El flujo gaseoso, regulando, tanto como sea posible, el lecho de porosidad constante... Para llevar a cabo este trabajo es importante ajustar las depresiones en valores fijos (y función del consumo de la instalación).

La estabilización de la presión diferencial $P_A^2 - P_A^1$ es indispensable para evitar cualquier variación en el recorrido de los gases entre cámaras.

- 2.º) — El nivel de la temperatura de la cámara de secado, que será objeto de las correspondientes observaciones en el capítulo "gases de salida".
- 3.º) — La introducción regular de los gránulos a pesar de una producción fluctuante. Para este punto particular, es posible evitar fluctuaciones de caudal a la entrada de la tolva, ajustando la altura de capa mediante una variación de velocidad en la parrilla (fig. 26).

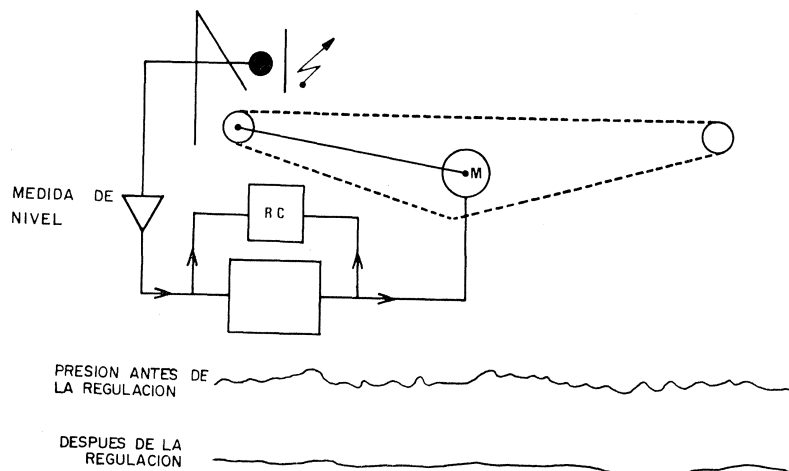


Fig. 26

El captador puede estar formado por un emisor de radiaciones y por un detector de partícula, colocados a ambos lados de la tolva. Un valor medio del grado de llenado ejerce una acción proporcional sobre la parrilla para regularizar el nivel y uniformar los aplastamientos, generadores de roturas y de "tortas" o de obturación.

Las oscilaciones que se han comprobado ordinariamente en los registros son causadas por regímenes de funcionamiento de los platos granuladores. A pesar de todo, son pequeñas las amplitudes de estas fluctuaciones, y las variaciones concomitantes provocadas sobre la velocidad de parrilla están limitadas.

Se nota mucho esta ventaja en el funcionamiento del proceso, que vuelve a encontrar los medios de producción más importantes.

Expuestas estas condiciones, parece algunas veces indispensable hacer intervenir en las regulaciones la noción de temperatura, segunda tabla del díptico del intercambio térmico. Sin embargo, la introducción de este parámetro sigue siendo muy delicada y parece más interesante reservarla para estabilizaciones complejas en dirección descendente, sobre las que volveremos a hablar más adelante.

En la figura 27 se muestra el circuito eléctrico de la regulación de la presión diferencial según los métodos que se han preconizado anteriormente.

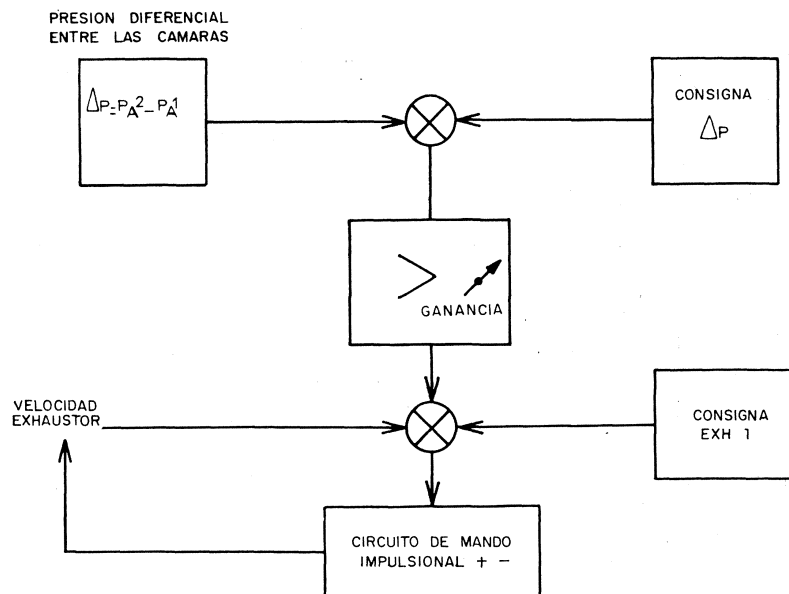


Fig. 27

3.173. Caso de la vía seca

Se trata aquí de la medida de la temperatura en la unión horno/precalentador y que debe considerarse como un nudo muy importante. Esta temperatura —material o gas— debe proporcionar información sobre los intercambios térmicos en dirección ascendente y descendente. El estudio de este parámetro sale del dominio de esta exposición, pero desde ahora se puede precisar que la temperatura del material "en el nudo" informa de los cambios previos que han tenido lugar en la torre, mientras que temperatura de los gases

es la resultante de los intercambios térmicos en el horno rotatorio. Esta consideración es esencial para saber cómo aplicar una regulación de estos dos parámetros: gas y material.

Habrà que intervenir en direcci3n ascendente (esto es particularmente problemàtico) para corregir variaciones de temperatura del material, y en direcci3n descendente para corregir temperaturas de gas.

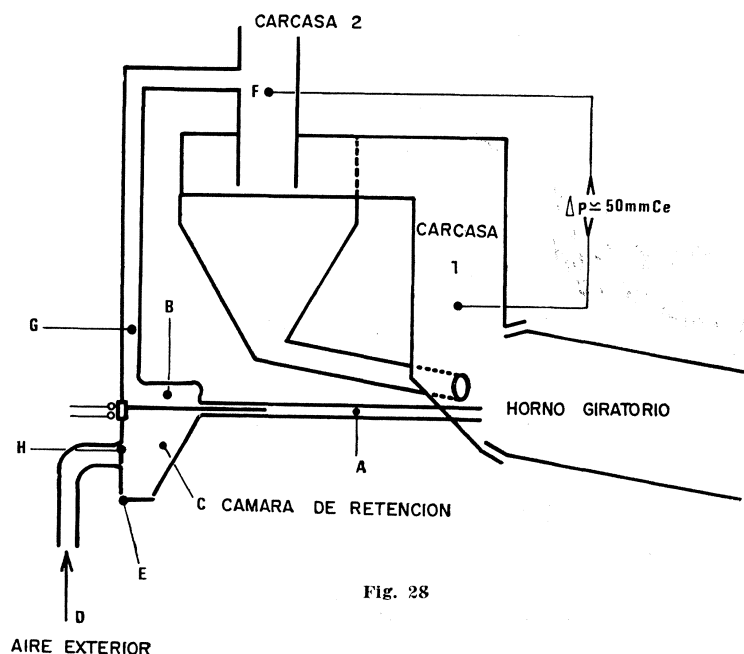
Pero lo indispensable comienza al nivel de las medidas, que son en este caso particularmente delicadas:

- *Material*: La dificultad consiste en medir únicamente los productos que fluyen y en liberarse de los efectos de pared y de la influencia de los gases parásitos. Habitualmente se utilizan cañas pirométricas.
- *Gases*: Tras el fracaso de las cañas pirométricas usuales, se ha tratado de utilizar pirómetros ópticos, tales como el pirómetro de dos colores. Desgraciadamente, no se sabe lo que hace falta buscar... ¿el material?, ¿la pared del horno?, ¿los gases?, ¿la llama?

Algunos buscan en el eje con la esperanza de integrar los polvos, la llama, los gases. Esto es demasiado.

Los gases son habitualmente transparentes, y una medida pirométrica es ordinariamente impropia. Ahora bien, los gases son los que deben medirse si se desea utilizar esta medida como base de la regulaci3n de combustible o de flujo (para regularizar los intercambios térmicos).

Por ello preconizamos una verdadera medida de la temperatura del gas a la salida del horno rotatorio. En la figura 28 se da el principio de ello: se ve la uni3n horno rotatorio y base del intercambiador con el último cicl3n representado.



Se coloca una caña seca (A) a nivel del altar por el que fluye el material, de tal manera

que se encuentre tanto como sea posible en una zona poco polvorienta. Esta caña (A) termina en un foso de decantación (C) y en el eje se coloca una caña pirométrica de tal manera que no "vea" más que débilmente el horno. El foso de decantación está unido a la carcasa 2 del intercambiador (tubo G). Como existe una pérdida de carga no despreciable entre la carcasa 1 y la carcasa 2, cierta cantidad de gas recorrerá el circuito $A \rightarrow F$. Por razones de material, se puede disminuir la temperatura del gas facilitando una toma de aire exterior ajustable (válvula H) que, en una instalación perfecta, puede ser regulada mediante un termopar (G).

Para lograr buenos intercambios, hay que mantener velocidades de gas del orden de 20 m/s en la canalización de toma con objeto de que las modificaciones de las depresiones en los dos pisos no intervengan en la medida.

Hay que concebir la canalización (A) de acero refractario (temperatura del gas 1.000°C), calorifugarla hasta el nivel de la cabeza del pirómetro, y mantener la temperatura (G) a nivel de 250° a 350°C. En este caso, la medida es posible y se hace fácil regular los intercambios térmicos descendentes (caudal combustible o velocidad de flujo).

3.18. Temperatura de salida de los gases

Este nivel de temperatura debe regularse con mucho cuidado. Se comprueba en efecto que desviaciones relativas, del orden del 3 ó 4 %, influyen considerablemente en el funcionamiento del proceso.

Por otra parte, un buen conocimiento de la medida regulada permite buscar el punto de funcionamiento mínimo que conduce —para un funcionamiento óptimo— a un ahorro sustancial de calorías.

Como, por otro lado, es difícil intervenir en un nivel intermedio entre la entrada y la salida, es lógico comprobar que las regulaciones usuales comprenden a menudo este artificio.

Para la vía húmeda, en los esquemas 29 y 30 se ve la explicación del sistema de regulación. Se ha elaborado más el esquema de la figura 29, ya que en ella se hace intervenir un valor de consigna de la temperatura de salida (función de la carga del horno). La figura 31 es la representación eléctrica de este principio.

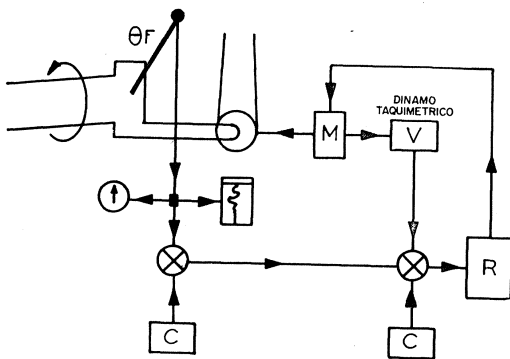


Fig. 29

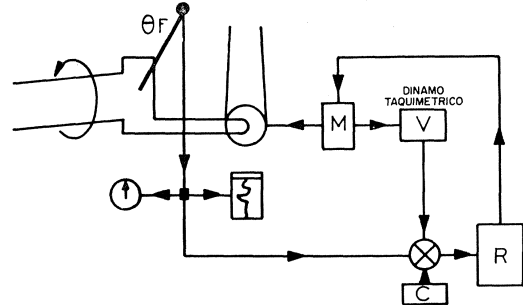


Fig. 30

El esquema eléctrico de la figura 32, es la imagen simplificada de una regulación sin consigna de temperatura.

Para la vía semiseca, se combina la regulación de temperatura con una estabilización de la depresión PA_2 .

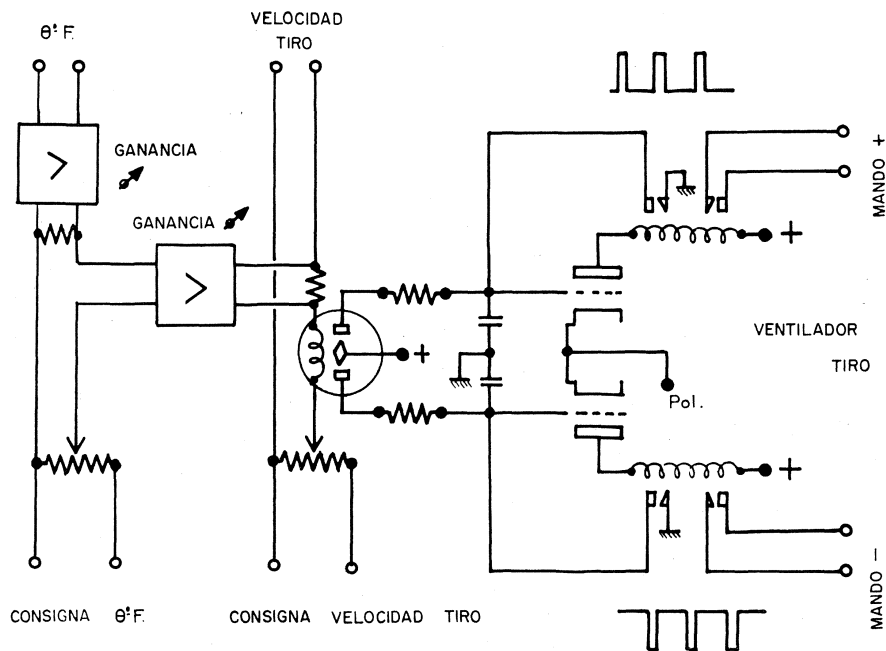


Fig. 31

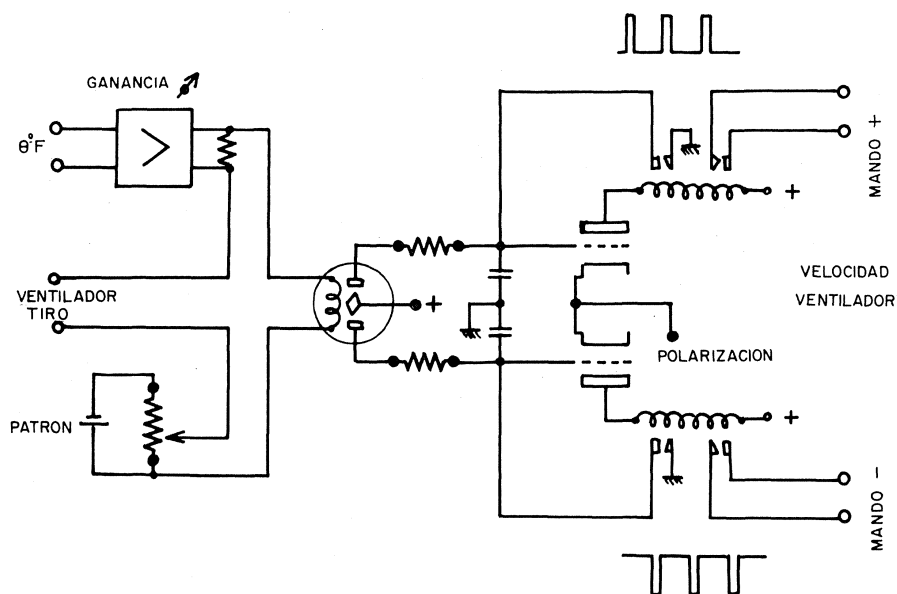


Fig. 32

Esta temperatura dirige la consigna de la depresión. Las desviaciones introducen variaciones proporcionales de depresión (fig. 33).

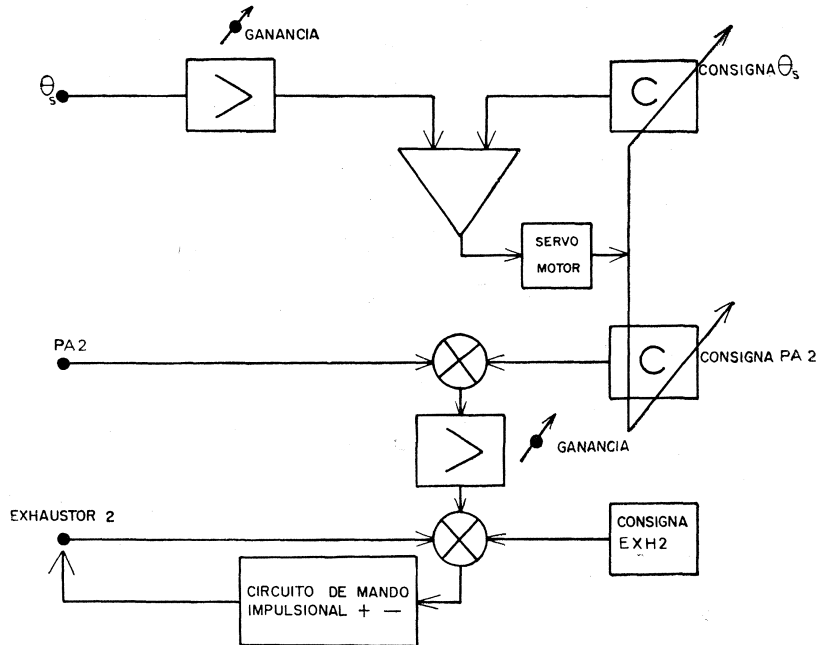


Fig. 33

Para la vía seca, el esquema es idéntico al de la vía húmeda, a reserva de admitir variaciones muy limitadas.

4.2. Circuitos anexos

4.21. Caso de doble torre

Cuando, por razones de caudal, el intercambiador vertical es doble, hay que asegurarse del buen equilibrio de los dos circuitos paralelos. Para hacer esto, y como la temperatura de los gases de salida se halla en estrecha correlación con la alimentación de material, se puede ejercer una acción sobre los caudales de cada circuito a partir de la diferencia de las dos temperaturas.

Esta regulación clásica, pero indispensable en este caso preciso, no requiere ningún comentario. Es lamentable pensar que únicamente la entrada es accesible. Para el resto de la doble torre no existe ningún medio de regulación.

4.22. Oxígeno

Puede sorprenderse uno de no haber oído hablar de este parámetro tan importante para la conducción de la sección de cocción. Existen, sin embargo, realizaciones o, al menos, proyectos de realizaciones.

Desgraciadamente (aparte de la vía húmeda), el problema tecnológico se sitúa a nivel del captador o, más exactamente, de la toma de gas, que se obtura demasiado fácilmente, hasta el punto de hacerla inutilizable en un sistema continuo.

Sin embargo, cuando esta medida es buena, se puede regular con ella el caudal de combustible, ya que la temperatura de zona actúa sobre la velocidad de flujo; los resultados obtenidos son relativamente buenos. Esta regulación corrige las variaciones de tiro y de caudal gaseoso.

También se puede utilizar para moderar las acciones excesivas del regulador de cocción. Esta solución simplista es la que preconizamos.

3.3. Circuitos complejos

Los circuitos complejos resultan de la interpenetración de dos o más fenómenos íntimamente ligados y que actúan sobre una magnitud única. Ya hemos tenido ocasión de citar el circuito temperatura de salida-depresión bajo la cámara II. Nos hace falta demostrar cómo se puede pensar en regular el problema de los desplazamientos de la zona de cocción.

Ante todo hay que medirlos y, como se trata de estimar un gradiente de temperatura, se debe definir la temperatura en dos puntos. En ausencia de un captador que pueda efectuar esta operación, se puede tomar como primer valor la temperatura de zona y como segundo la temperatura en medio de la instalación. También se puede escoger la temperatura de aire secundario si se sabe que el desplazamiento de zona le es imputable.

El ajuste de la relación es desgraciadamente muy empírico, pues depende de la geometría de la zona y de los intercambios térmicos pre y post zona.

El valor de este gradiente, comparado con una consigna, puede influir:

- en la velocidad de flujo;
- en el caudal de aire primario;
- en la temperatura de aire primario;
- en el ángulo de pulverización,

ya sea incluso como modificador del consumo de combustible.

Hemos experimentado tales circuitos, pero la experiencia no es concluyente si no es a condición de conocer bien el origen de la perturbación.

La figura 34 es una copia de registro en el que se han incluido:

- la temperatura del aire secundario;
- la temperatura de zona;
- la equipresión en la cabeza del horno;
- la temperatura de los humos;
- el valor del caudal de fuel-oil.

En esta experiencia, la equipresión es regulada y mantenida a 1 mm de c. a., lo que elimina un fenómeno perturbador.

Se puede observar la tendencia evolutiva y las relaciones estrechas que existen entre la temperatura del aire secundario y la temperatura de zona. Es probable que una reacción sobre la otra, pero en el procedimiento de medida puntual de la zona de cocción, pequeños desplazamientos de zona implican fuertes variaciones del nivel de temperatura. Esta consideración se desprende de la pendiente muy grande de la temperatura, que puede alcanzar 70°C por metro lineal.

En este caso particular es necesaria una acción sobre el ajuste del fuel-oil, así como una estabilización de la temperatura de zona.

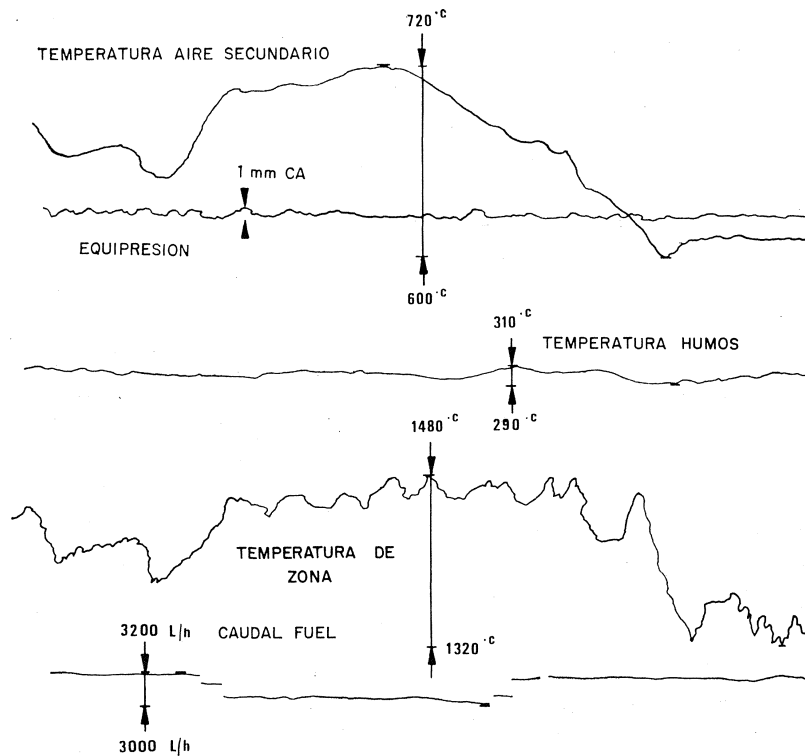


Fig. 34

4. EL CALCULADOR ANALOGICO

4.1. Introducción

Se pueden imaginar numerosos circuitos de regulación, diferentes a los que se han indicado anteriormente. Su puesta en servicio mejora el funcionamiento de los aparatos. Los resultados son tanto más sensibles cuanto mayor número de estos dispositivos se colocan a lo largo de la instalación.

Hay que abstenerse de concebir una regulación independiente o esperar un funcionamiento perfecto, sin imaginar una serie de operaciones a lo largo del proceso. En efecto, los reguladores cumplirán tanto mejor su misión cuanto más limitadas sean las variaciones en más y en menos.

Si, por ejemplo, uno se conformara con instalar una regulación de la zona de cocción, numerosas perturbaciones como el flujo de material, el nivel de preparación, el volumen gaseoso o, incluso, las condiciones de enfriamiento del clínker, las características de los parámetros que influyen sobre la llama, llegarían a anular las ventajas esperadas.

Por ello se asocian circuitos entre sí, independientes o estrechamente ligados.

4.2. Ajustes y valores de consigna

Hasta entonces las numerosas regulaciones se concebían para una respuesta directa. En otros términos, cada regulador funciona *alrededor de un valor de consigna*. Para algunos, los más usuales, se define únicamente el parámetro ajustado, ya que el órgano regulador es poco firme. Para otros, como los que se describen anteriormente, se impone una consigna y el parámetro ajustado en el órgano regulador.

En uno y otro caso, la elección del valor de consigna corresponde a un funcionamiento definido del horno. Generalmente el criterio correspondiente es el caudal o la producción.

Ahora bien, los ajustes —tanto más numerosos cuanto más evolucionada es la instalación— no son fácilmente accesibles. Igualmente, la precisión de los valores de consigna que hay que alcanzar para un caudal determinado es difícil de calcular.

Un ejemplo hará comprender mejor las razones por las que se considera imperfecta, e incluso ineficaz, la regulación tal y como se la concibe habitualmente.

Supongamos un horno que funciona con su caudal nominal y que implica cierto número de regulaciones. Por lo tanto, se observan los siguientes valores de ajuste:

Producción	0°C Zona	0°C Sistema cadenas	0°C Humos	0°C Aire secundario	O ₂
1.000 t/día	1.420	860	170	620	3 %

Para una producción distinta se encontrará:

800 t/día	1.430	880	180	600	4 %
600 t/día	1.450	890	185	590	4 %

Si los valores de consigna que corresponden a los valores medios que hay que alcanzar son imperativos para un funcionamiento óptimo de los reguladores, se ve que el ajuste no se aplica nada más que a un solo modo de funcionamiento.

4.3. Enunciado de las características esenciales de las regulaciones C.E.R.I.L.L.H.

4.31. Sensibilidad

El empleo de reguladores habituales en los procedimientos de evolución lenta, tales como los que poseemos en nuestra industria, presenta dificultades inherentes al largo tiempo de transferencia de los circuitos (desplazamiento del material en una hora, por ejemplo).

Parece que la ventaja de una proporcionalidad de acción, ligada a una gran sensibilidad del regulador, permite dominar mejor los fenómenos perturbadores.

Pero sabemos que los circuitos de centro reacción, a causa de los desfases internos —representados en nuestro caso por tiempos de transferencia no despreciables—, son inesta-

bles más allá de una cierta ganancia de circuito. En lugar de intentar dominar las rotaciones de fase, donde en nuestros procedimientos se penetran mutuamente demasiadas variables, hemos estimado preferible limitar la excursión del órgano regulador. Con este procedimiento se puede conservar una sensibilidad máxima, suponiendo que el captador es fiel y preciso.

4.32. Circuito de retorno

Para conseguir una proporcionalidad entre la medida y la acción, se introduce una fracción de la posición o del valor del órgano ajustado de tal manera que se satisfaga la ecuación:

$$E \pm \Delta E = v \pm \Delta v + vc ,$$

en la cual:

E = Imagen del fenómeno perturbador.

v = Imagen del grado de acción.

vc = Consigna.

Eso equivale a definir:

E med. = Valor medio del parámetro y su correspondiente v med. = Valor medio del ajuste.

Así como $\frac{\Delta E}{\Delta v} = Q$ = coeficiente de proporcionalidad.

Existen diferentes medios para construir un esquema eléctrico conforme con esta definición y en particular:

— *El montaje en acoplador eléctrico* (véase regulación de la zona de cocción).

En este caso se es dueño de la relación Q autorizando una excursión más o menos grande al servomotor.

— *El montaje en saturación*, actuando, por ejemplo, sobre los límites de amplificador dispuesto en alguna parte del circuito (véase regulaciones de humos).

4.4. Los caudales variables

4.41. Modificación voluntaria de la producción del horno

En este capítulo examinaremos rápidamente las condiciones evolutivas de una instalación cuando se decide modificar su producción.

4.411. Examen de la conducción manual

Poco después del arranque, que consiste en un cierto número de secuencias: puesta en marcha progresiva y en un orden dado de motores, ventiladores, etc., el operario observa atentamente su cuadro de medida y efectúa sucesivamente un gran número de operaciones destinadas a dominar el funcionamiento de su horno.

La progresión termina con la puesta en régimen óptimo, y, muy a menudo máximo, de la instalación.

Sin embargo, los criterios de optimización en los caudales intermedios son completamente subjetivos y poco seguros. Este hecho no es imputable a los aparatos de medida, sino más precisamente a dos causas:

- 1) ausencia de nociones precisas de valores *medios* reales a diferentes tipos de funcionamiento;
- 2) dificultades de traducciones precisas e instantáneas por el operador, de las variables transmitidas al cuadro o registradas.

Con frecuencia es así como uno se conforma con observar que “el horno sigue funcionando”, y en particular, que las condiciones de clinkerización son buenas (observaciones visuales de la zona de cocción).

4.412. Evolución de los parámetros

En una instalación determinada, si se registran los parámetros importantes, se comprueba que un buen número de éstos evoluciona en función del caudal. Esta evolución puede ser, en los límites predicados, considerada como lineal. Fuera de estos límites, las variaciones siguen leyes cualesquiera de pendiente rápida muy a menudo, lo que denota la presencia de saturación en el procedimiento, como, por ejemplo, los taponamientos, los atascos de diferentes zonas, etc.

En la figura 35 están representadas las evoluciones de algunas variables.

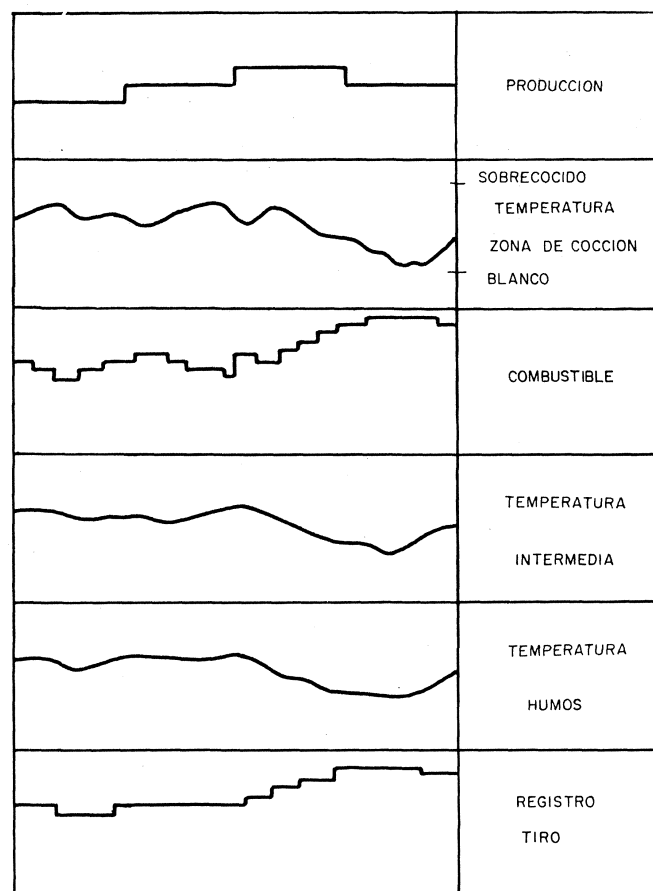


Fig. 35

4.413. *Intervención del operador*

El operador interviene frecuentemente en cada nivel de caudal, efectuando una nueva progresión cuando el horno parece estabilizado.

Si durante la progresión del régimen no se alcanza un nivel de temperatura, y según la amplitud de la desviación, el operador reduce su alimentación.

El funcionamiento en escalera es, por lo tanto, inevitable, y los escalones son variables y ligados con el estado del horno.

Se recuerda que ninguna regulación es apta para controlar el horno en estas condiciones (aparte de los valores constantes que hay que mantener como la temperatura de la zona de cocción o la equipresión en la cabeza del horno).

Parece ser, pues, que una vigilancia constante de la evolución de los parámetros de la instalación junto a la medida en condiciones reales de los mismos aportaría una ayuda considerable a la conducción del horno.

4.42. *Modificaciones fortuitas del caudal del horno o de cualquier otra variable*

4.421. *Examen de la conducción manual*

Cualquiera que sea la razón, ocurre que un desarreglo llega a perturbar el funcionamiento normal de la instalación. Este accidente puede producirse, en estabilización o en progresión, y no es siempre advertido.

Este desarreglo puede afectar a toda o parte de la instalación e implantar un régimen de marcha anormal.

No siempre se denota instantáneamente una falta de alimentación de pasta. En este caso se observan perturbaciones en la conducción y en particular en los sistemas "vía seca".

Si se regula la instalación, las estabilizaciones desempeñarán su papel limitando tanto como sea posible la perturbación accesoria.

Imaginemos, por ejemplo, que la regulación con caudal constante relaciona estrechamente velocidad de rotación del horno/caudal de pasta y que este caudal se mide a partir de la velocidad de rotación del "caracol" o de la noria.

Si se falsea la medida del caudal de material, la relación teórica $\frac{V_f}{Q \text{ pasta}}$ cambia.

Por esta razón proponemos una regulación anexa de regularización de nivel del vaso que asocia el caudal de las bombas con el relleno del vaso (figura 36).

A pesar de todo, esta precaución que se toma es insuficiente para modificar las características de intervención sobre el proceso.

Igualmente, cualquier parámetro puede retransmitirse con un error. En este caso, se notará naturalmente una acción extensa de los reguladores vecinos, pero ningún caso podrá adaptarse íntegramente si la desviación es grande.

4.422. *Dificultades de retorno a una marcha adaptada*

Así, en marcha manual o automática, y en caso de desarreglo de una variable, la instalación se perturba de manera considerable, sin que sea posible remediarlo fácilmente.

Se comprueban fluctuaciones y modificaciones en el funcionamiento del horno y la úni-

ca medida que hay que llevar a cabo es encontrar el término medio que satisfaga estas condiciones. La elección de este nuevo funcionamiento es empírica.

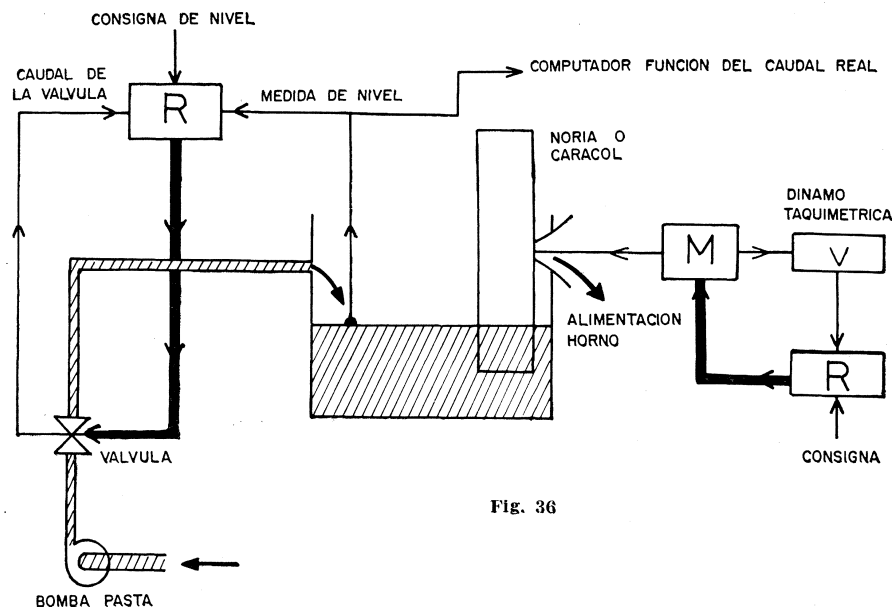


Fig. 36

Si una cadena de regulador está en servicio, los desarreglos son tales que debe decidirse su puesta "fuera de circuito".

4.5. El calculador C.E.R.I.L.H.

Las anteriores consideraciones nos han llevado a concebir *un funcionamiento de las regulaciones cualquiera que sea el caudal del horno.*

A continuación veremos las posibilidades de tal dispositivo.

4.51. Definición de los modos de funcionamiento

4.511. Cálculo de valores de consigna de cada regulador

Con un estudio teórico se podría calcular el valor medio alcanzado por cada parámetro bajo control de regulación.

Se trataría, sin embargo, de un valor teórico medio, que depende estrictamente del comportamiento individual de cada parámetro influyente interesado.

Por ello, en ausencia de reglas, de elementos de cálculo, de funciones o de ecuaciones matemáticas verdaderas, parece indispensable sentar las bases de unos determinantes en el *estudio estadístico* del comportamiento usual del horno. Actualmente operamos de la siguiente manera:

4.512. *Estudio en función del caudal*

4.5121. *Método estadístico clásico*

Se efectúa la selección de n parámetros interesados que son:

- los valores consigna que hay que mantener (1);
- los valores *medios*, correspondientes a los parámetros reguladores (1);
- los valores *medios*, correspondientes a los parámetros regulados (1).

Todos estos valores son función del caudal de la instalación.

La estadística se efectúa en el mayor número de datos posibles, y se interesa por los valores que entran en los circuitos múltiples y por los valores de los órganos de regulación en general.

Por eso, se extraen valores sacados durante las etapas anteriores de funcionamiento manual.

Si la instalación lo permite, se acumulan datos estableciendo unos escalones de producción durante períodos en que se carga la instalación.

Finalmente, se determinan unos puntos de funcionamiento que una interpolación extiende a los valores intermedios.

En esta fase, ya es posible detectar unos funcionamientos intermedios, incoherentes y, de este modo, corregir el valor medio instantáneo (se entiende por instantáneo, el valor que resulta de uno de puesta en carga).

Se objetará que el valor extraído en progresión no es el que se ha obtenido en el escalón a un nivel de caudal definido. El escalonamiento voluntario a diferentes regímenes suprime esta desviación.

Además, la regulación modera estas desviaciones hasta hacer compatibles los resultados obtenidos de los valores medios tipo.

En la figura 37 se hace un recuento de las variables esenciales. Con este objeto se ha escogido un ejemplo sencillo de variaciones limitadas.

4.5122. *Método estadístico mediante calculadoras numéricas*

El C.E.R.I.L.H. se ocupa en utilizar este potente medio para intentar extraer los valores medios verdaderos, en conexión con el caudal por una parte, pero también en función de numerosos parámetros.

La regla del juego consiste en sacar n parámetros e imaginar m funciones en las que estos parámetros están representados como piloto, o como resultante.

El estudio es sumamente complejo y necesita, aparte de la concepción de programas de cálculo adaptados, una serie de estudios de funcionamiento muy diversos. Más adelante veremos la fórmula intermedia adoptada.

4.513. *Leyes de variaciones de los parámetros*

Se han determinado los métodos empíricos de cálculo y con el estudio del funcionamien-

(1) Incluso si los ajustes no son elementos que participan en la regulación.

to se puede fijar cierto número de valores que, por ejemplo, se resumen en el siguiente gráfico (fig. 37). Esto conduce a definir las curvas de funcionamiento intermedias trazadas en dicha figura.

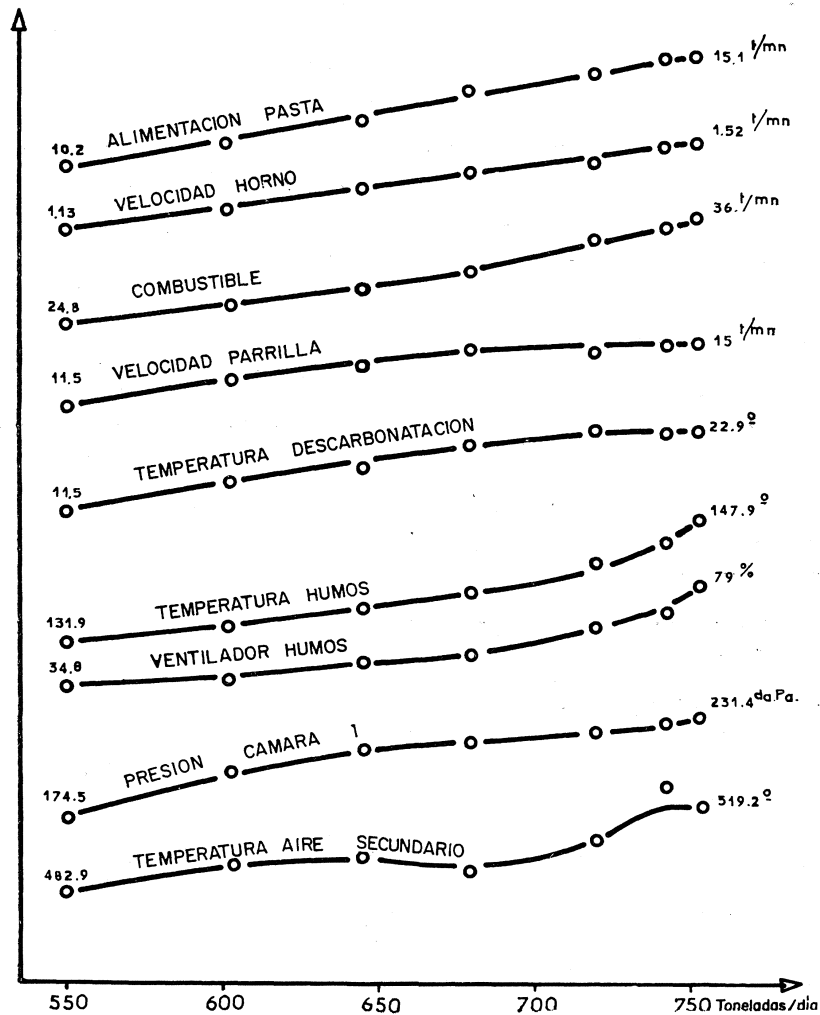


Fig. 37

Sin embargo, es probable que los elementos de valores extraídos experimentalmente no concuerden (o sean divergentes) con los valores reales. Existen dos causas en estos errores:

1º) La lectura es efectuada por un vigilante, que no puede tener una noción exacta de la media de medida. Efectivamente su lectura horaria se realiza en un tiempo corto: 1 minuto por ejemplo y sólo refleja el funcionamiento instantáneo de la instalación en el momento preciso. En otras palabras, sacando un órgano regulador del valor anterior: el combustible o el tiro por ejemplo, el operario toma en cuenta este último valor como valor medio de la hora pasada. Por lo tanto, falsea involuntariamente la estadística.

2º) Puede mantenerse permanentemente un funcionamiento anormal en función de los criterios seguidos por la costumbre: mantenimiento de una temperatura más allá de su valor, etc.

Estos dos tipos de error se detectarán por un examen profundo del funcionamiento de la instalación y con los métodos indicados anteriormente. Además no serán los resultados del estudio estadístico los que permitirán reducir las desviaciones en *marcha manual*, pues numerosas consideraciones, en particular las que resultan de los límites de detección, de estimación de los niveles de temperaturas de gases, o de material, harán una detección imperfecta de los valores verdaderos y obligarán a prever cierto número de precauciones y de medidas de salvaguardia.

Si se regula la instalación, será posible someter la medida, el control y la regulación a unos límites más estrechos y a lo sumo *al valor medio* óptimo.

4.52. *Introducción del sistema en los reguladores y circuitos*

En el párrafo anterior se da a entender que aparte de los múltiples circuitos de regulación, la obtención de valores medios de los valores reguladores multiplica las regulaciones.

Un ejemplo situará el tema:

Regulación de la temperatura de escape de gases.

Los valores habituales que hay que considerar son, por ejemplo:

- la temperatura de los gases de escape;
- eventualmente (procedimiento C.E.R.I.L.H.), el valor de la eficacia del tiro.

En el circuito ligado con el computador hay que tomar:

- la temperatura *media* de los gases en función del caudal;
- el valor *medio* de la velocidad del ventilador exhaustor;
- el valor *medio* en función del caudal de las válvulas,

en función de las perturbaciones con que se encuentran habitualmente.

Esto implica, por lo tanto, cierto número de regulaciones auxiliares que establece una estabilización a las velocidades, a los caudales, etc.

4.53. *Autovigilancia de los parámetros regulados y reguladores*

4.531. *Caudal de crudo*

En los ejemplos que se dan, así como en las realizaciones llevadas a cabo, el parámetro *PILOTO* se define como el caudal de crudo.

Todos saben que este caudal guarda estrecha relación con la producción del horno, aunque dicha relación sea modificada por varios factores: se citará el valor del CO_3Ca , la cantidad de agua de la pasta o de la materia prima. Estos factores están representados por la pérdida al fuego. En una relación elemental se puede decir, pues, que el caudal del horno es una función directa del caudal de materia prima.

$Q_{\text{horno}} = KG$ materias primas;

el valor de K depende del crudo.

Así, el examen estadístico de una producción está ligado con el caudal de la instalación, sacándose un valor medio de un crudo o de una pasta determinada.

Es posible introducir ambos elementos perturbadores: H_2O y valor del CO_3Ca , para fijar, en función de la producción deseada, el valor medio de los caudales pasta y crudo cualquiera que sea el valor real de las variables.

Estas intervenciones son entonces accesibles en forma de potenciómetros marcados en porcentaje. De este modo, la corrección efectuada permite fijar el caudal real del horno coordinando todos los valores con el funcionamiento óptimo.

4.532. *Niveles de temperatura, caudales, velocidades*

Por el mismo principio, habiéndose establecido la autovigilancia, es posible hacer una modificación de la producción si una cualquiera de las variables se desplaza demasiado —a pesar de la acción de las regulaciones— de su valor real.

Según las variables escogidas, y la amplitud de la desviación tolerada, se actuará sobre el nivel de producción en un tiempo de transferencia determinado. El escollo radica en la “personalidad” de la instalación que, como todos saben, presenta siempre su caso particular, incluso si es alimentada con un crudo y un combustible semejantes.

Pero he ahí que el estudio importante estadístico informa sobre el comportamiento del horno y sobre sus reacciones ante las intervenciones sucesivas.

4.533. *Principio de los circuitos “vigilancias” del computador del C.E.R.I.L.H.*

En la figura 38 se muestra el principio de concepción del computador.

Cierto número de potenciómetros de ley lineal alimentados con tensiones estabilizadas fijarán un valor de consigna medio en función de la producción.

Si el potenciómetro es lineal, la ley de variación en función del ángulo puede responder a la ley:

$$V_{med.} = \alpha \cdot V_p + \beta.$$

Esta ley satisface a la mayoría de las curvas que poseen en su parte esencial una ley lineal. Se aplica, pues, a la curva evolutiva del potenciómetro la pendiente de la tangente a esta curva.

Se disponen tantos potenciómetros como órganos o valores de medida están bajo control.

El eje único de los potenciómetros puede ser puesto en movimiento por un servomotor que recibe estas consignas de varios datos:

- 1º) caudal instantáneo medido;
- 2º) vigilancia de los parámetros bajo control.

4.5331. *Caudal instantáneo*

Existe la posibilidad de marcar la producción que hay que alcanzar. Este valor eléctrico se compara con el que se obtiene al instante por el computador. Si existe una desviación, se envía una orden continua al servomotor mediante un reloj, cuyo fin es el de definir con precisión la pendiente de elevación o de disminución de la producción.

Para llevar a cabo esto, divide en períodos de tiempo (variable) el mando continuo dirigido al servomotor. De esta forma es posible decidir una elevación en n toneladas/hora, ya que todos los órganos potenciométricos describen e imponen a los reguladores la evolución de los órganos bajo control y los valores de consigna de los niveles regulados.

4.5332. Principio de un circuito de vigilancia

En la figura 38 se representa un circuito de vigilancia del computador.

Este sistema aumenta la seguridad de funcionamiento.

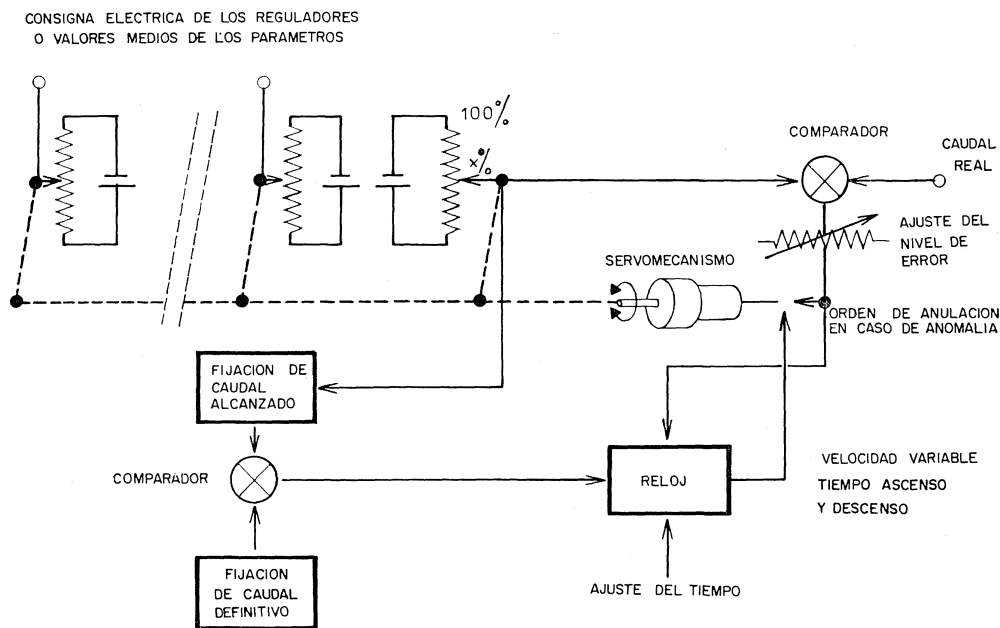


Fig. 38

Supongamos que del computador viene una solicitud de aumento de caudal y que, por diversas razones, el caudal de material no puede cambiar. Se produce cierto desequilibrio entre el valor deseado y el valor real. Cuando alcanza el umbral, suprime la acción en curso. Si la desviación es muy grande (como, por ejemplo, a raíz de una dificultad de desplazamiento), el computador sigue el valor real del caudal.

Para asegurarse de la evolución continua normal, se compara el valor real obtenido y el valor fijado en el computador. La desviación ajustable eventual origina la aparición de la secuencia prioritaria siguiente:

La diferencia entre la indicación del computador y el valor real suprime la acción progresiva de elevación —eventualmente de descenso— del sistema “indicación caudal definitivo alcanzado” y actúa directamente sobre el servomecanismo de producción hasta anular la desviación entre la indicación del computador y el valor verdadero. Por supuesto todos los demás parámetros se ajustan de nuevo con el nuevo caudal. Se halla esta circunstancia en caso de que falle la alimentación de material. Este procedimiento permite aumentar la seguridad de funcionamiento.

4.5333. Principio de los circuitos múltiples

Aún se pueden aumentar las posibilidades de regulación haciendo que actúe el computador por órdenes lógicas en que se penetran mutuamente varios parámetros. Así en la determinación del caudal entrarán como valor o como corrector cierto número de elementos que proporcionarán un modo de funcionamiento óptimo. En la figura 39 se precisa esta última posibilidad en un ejemplo de aplicación que alcanza a tres variables, mostrándose en el cuadro I las acciones llevadas a cabo. Se puede aclarar el funcionamiento tal como se indica en la figura.

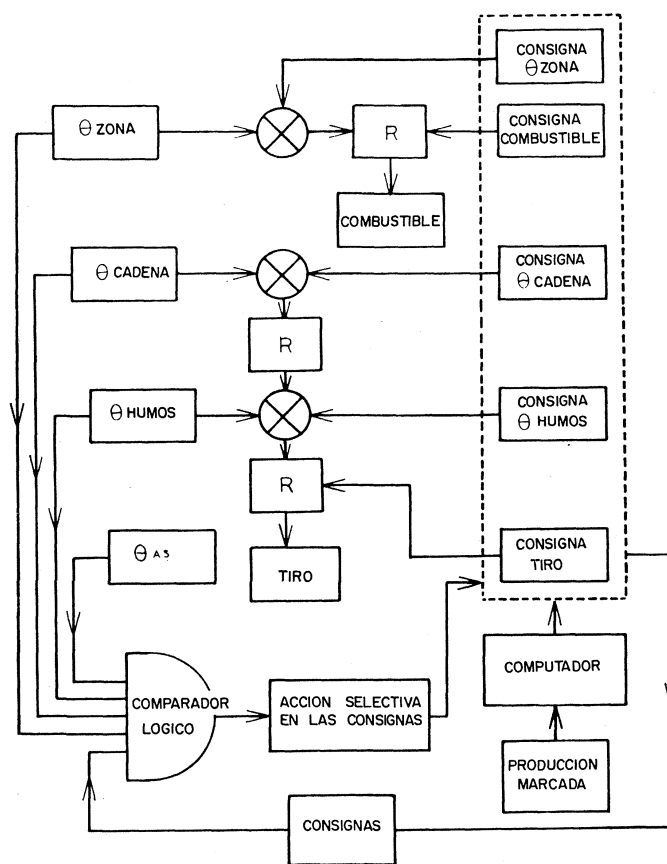


Fig. 39

Las tres variables son, en el ejemplo citado:

- la temperatura en la zona de cocción;
- la temperatura en la zona de descarbonatación;
- la temperatura de los humos.

La primera puede corregirse mediante una modificación del combustible; la segunda, por una modificación lenta y progresiva del grado de llenado, y la tercera, por una intervención en el tiro.

Pero el cuadro I señala que existen interacciones diferentes o acumuladas. Así, un au-

mento paralelo de las temperaturas de zona y de descarbonatación puede indicar un desplazamiento de zona y el remedio no consiste en modificar el combustible.

C U A D R O I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ZONA DE COCCION CALIENTE	ZONA DE COCCION FRIA	ZONA CALIENTE	ZONA CALIENTE	ZONA + CALIENTE	ALEJAMIENTO DE ZONA	ACERCAMIENTO DE ZONA	ZONA DE ENFRIAMIENTO	MOVIMIENTO DE MATERIAL	FALTA DE PREPARACION DEL MATERIAL
θ_z										
θ_d	-	-								
θ_f	-	-	-	-		-	-			
θ_{AS}			(+)	(-)				(+)	(-)	
ACCIONES	COMBUSTIBLE	COMBUSTIBLE	COMBUSTIBLE EN -	COMBUSTIBLE EN -	COMBUSTIBLE EN -	COMBUSTIBLE SIN CAMBIO	COMBUSTIBLE SIN CAMBIO	COMBUSTIBLE EN +	VELOCIDAD DEL HORNO	TIRO
					TIRO EN -	AIRE PRIMARIO	AIRE PRIMARIO			

En tal caso, existen probablemente medios de corregir la fluctuación anunciada y, por consiguiente, otros modos de acción más elaborados que los anteriores.

Si se pueden detallar, por examen crítico, todas las condiciones de marcha de una instalación y evaluar además, no ya las tendencias, sino las desviaciones, es posible construir en el computador los circuitos enunciados. Se ve el modo de acción sobre la figura 39, en que las "puertas" son accionadas por el signo y la amplitud de las señales que le son retransmitidas. Se observará que puede intervenir un cuarto factor en caso de que sea semejante el resultado. Es la situación 7 y 8 del cuadro I.

Todas estas modificaciones conducen al propio nivel del valor de consigna extraído del computador. En ciertos casos extremos, que denotan una interdependencia estrecha, la fuente que alimenta el potenciómetro interesado del computador es la resultante del cúmulo de otros parámetros.

Hemos precisado que es útil tener en cuenta *todas las variables de la instalación*: posición de las válvulas, velocidad de los motores, etc.

En general, las leyes de variación de estos parámetros son lineales y están ligadas con el caudal de la instalación. Se puede por tanto admitir que son de la forma:

$$P = \alpha \cdot Q + \beta.$$

Una vez más la experimentación define los valores de las variables.

Estas variables son, en particular, las siguientes:

- el caudal del crudo (para un marcaje directo);
- la velocidad del horno;
- la velocidad de los ventiladores de tiro;
- la posición de las válvulas;
- el caudal del combustible (en primera aproximación, pues habría que tener en cuenta los diferentes rendimientos).

Para todo este conjunto, la pendiente α es variable, así como el coeficiente β , según el parámetro.

Para las demás variables, en particular todas las que atañen al proceso, las evoluciones no son obligatoriamente lineales, debiéndose incluir en la cadena unos circuitos correctores.

Tomemos como ejemplo la evolución de la temperatura de humos de la figura 37, reproducida por una línea de puntos en la figura 41.

Se puede asimilar la curva entre 550 y 700 t/día a una recta de ecuación $y = \alpha \cdot x + \beta$.

Tras un punto de inflexión, se traza una segunda porción de recta entre 700 y 750 t/día. Si la curva es más compleja, se pueden definir tantos segmentos de recta como sean necesarios.

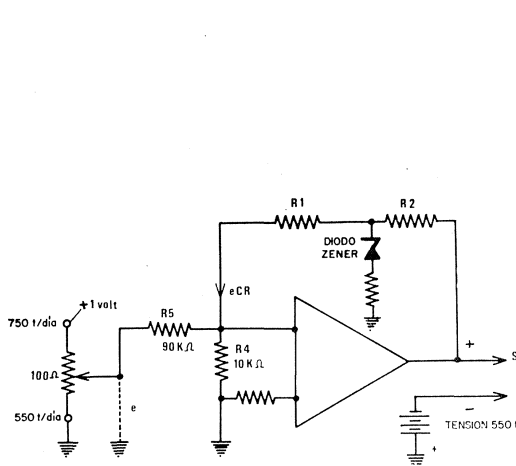


Fig. 40

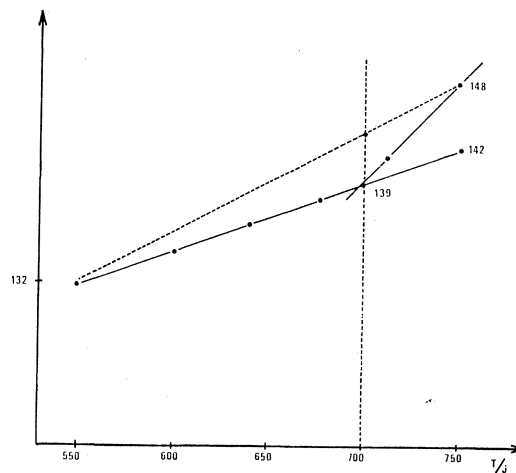


Fig. 41

Como por otra parte el computador no dará nada más que valores de consigna útiles para una zona 500 a 750 t/día (en este ejemplo), el dispositivo eléctrico se concebirá de la siguiente manera (fig. 40).

Un potenciómetro P unido al computador posee un cursor que describe el recorrido para un caudal de material que corresponde a la desviación 550 a 750 t/día.

La tensión entre el cursor y un extremo pasa por un reductor 1/10, que aísla el circuito de entrada del amplificador. Se encuentra entre sus bornas $\frac{e}{10}$.

El amplificador posee una ganancia en circuito abierto $> 1.000.000$. La tensión de salida máxima de este amplificador es de 10 voltios.

Para evitar una saturación se escoge una tensión de salida media de 2 voltios. Si, por ejemplo, se toma $E = 1$ voltio, la ganancia del circuito debe ser de:

$$\frac{e}{10} \cdot G = 2 \text{ voltios};$$

$$G = 20.$$

Lo cual hace que:

$$G = \frac{K}{1 + r \cdot K},$$

siendo:

K = ganancia en circuito abierto.

r = coeficiente de reacción igual a la relación de las resistencias $R'_4/R_1 + R_2$.

Como $K \rightarrow \alpha$, se escribe:

$$G = \frac{1}{r} = R'_4 + \frac{R_1 + R_2}{R'_4}.$$

En realidad R'_4 es el valor resultante de poner en paralelo R_4 y R_5 , es decir: $R'_4 = 9 K \cdot \Omega$.

Resulta que:

$$R_1 + R_2 = 9 K \cdot \Omega \cdot 20 = 180 K \cdot \Omega.$$

Consideremos la posición del punto de inflexión. Se sitúa en 700 t/día, es decir que de 550 a 700 t/día, la amplificación es constante y fijada en 20.

En este intervalo, el cursor se desplaza las tres cuartas partes de su recorrido, siendo la tensión de salida de:

$$\frac{1}{10} \cdot \frac{3}{4} \cdot e \cdot G = 1,50 \text{ voltios.}$$

En este mismo intervalo, la temperatura pasa de 132° a 139°; 5°C, es decir, con una pendiente de:

$$\frac{1,5}{7,5} = 0,2 \text{ voltios/}^\circ\text{C,}$$

lo que fija un valor de tensión aditiva a la salida de: $0,2 \times 132 = 26,4$ voltios. A partir de 700 t/día (139,5°C), la pendiente debe cambiar y tener un valor de 9,5°C para 50 toneladas.

Sin entrar en detalles de cálculos, se constituye un puente reductor compuesto de un elemento no lineal (diodo Zener), cuya tensión de codo corresponde al punto de inflexión

deseado. A este valor existe conducción y la tensión de reinyección resulta:

$$e_{CR} = S \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} + V_z \right) \frac{R'_4}{R_1 + R_2/R_3} ,$$

siendo:

V_z la tensión Zener, con la condición de que $R_1 > R_3$.

5. APLICACION

5.1. Ejemplos de aplicación en una instalación de vía húmeda

La instalación descrita se aplica a un horno en vía húmeda cuyas características esenciales son las siguientes:

- constructor: Fives-Lille;
- longitud: 130 m;
- diámetros: \varnothing : 3,75 m; \varnothing : 4,25 m;
- enfriador de parrilla: Fuller;
- caldeo: carbón; después mezcla carbón fuel-oil;
- humedad pasta: 38 a 42 %;
- consumo calorífico: 1.364 kcal/kg clínker.

Los circuitos de regulaciones son:

5.11. Circuitos principales

- *Regulación de la temperatura de la zona*, con intervención posible en el punto de consigna por el dispositivo “desfase zona”.
- *Regulación de la temperatura de humos.*
- *Regulación del caudal de material crudo.*
- *Grado de llenado constante*: velocidad horno, caudal material, etc.
- *Regulación de la temperatura del aire primario.*
- *Regulación de la temperatura del aire secundario*: regulación de la presión bajo la primera cámara.
- *Estabilización de la velocidad del horno.*

5.12. Circuitos auxiliares

Todos los valores medios definidos necesarios para el computador:

- nivel de la pasta;
- velocidades del horno;
- velocidades del ventilador de tiro;
- velocidades del ventilador del enfriador;
- temperatura del clínker.

5.13. *Computador*

Este aparato fija los valores medios, en función de la producción, de:

- velocidad del horno;
- caudal de la pasta;
- temperatura de humos;
- temperatura del aire secundario;
- presión bajo cámara enfriador;
- posición de las válvulas de tiro;
- velocidad media parrilla enfriador.

5.14. *Circuitos de vigilancia*

El correcto relleno de la noria es regulado por un captador de nivel (C.E.R.I.L.H.). Este hace funcionar las válvulas de admisión de la pasta que las bombas envían al vaso, pero también precisa la posición del nivel de relleno. En caso de que existan perturbaciones en el caudal, se ejerce la acción sobre el computador. El control del parámetro permite un funcionamiento muy seguro.

5.15. *Valores estabilizados: resultados*

- La temperatura de la zona se ha estabilizado en 10°C aproximadamente, como lo indica el registro 614-1. En la marcha manual se habían comprobado frecuentes diferencias del orden de 100°C.
- La temperatura de humos se ha precisado en 2°C aproximadamente, mientras que la marcha manual admitía 30° a 50°C de diferencia. Además la puesta en marcha del computador ha demostrado que el funcionamiento del horno admitía bajar el valor medio 30°C.
- La temperatura del aire secundario se ha fijado en 20°C aproximadamente.
- La presión bajo la primera cámara del enfriador tiene un recorrido máximo de 15 mm de c. a.
- La temperatura del aire primario se mantiene en 2°C aproximadamente.
- La velocidad del horno es en lo sucesivo constante (variaciones del orden de 2 s/vuelta), mientras que antes existían importantes deslizamientos.

Por consiguiente, el funcionamiento general de la instalación se ha simplificado. Ya no se denotan fluctuaciones importantes de marcha del material en el horno.

Un aumento del tonelaje se ha hecho posible al mismo tiempo que se disminuye la vigilancia que, en lo sucesivo, consiste en asegurarse no del estado del horno, sino del funcionamiento del equipo de regulación y del buen estado de los órganos reguladores.

La carga automática del horno poco tiempo después de su puesta en marcha libera al conductor de tener que elegir la acción sobre los parámetros, asegurando un funcionamiento óptimo de esta instalación.

El papel del vigilante se limita a fijar de antemano el caudal que hay que alcanzar y a definir la velocidad de elevación o de descenso de la producción.

La ganancia calorífica no es nula, pudiendo cifrarse en el 5 % aproximadamente.

La ganancia de producción es más sensible, ya que alcanza el 20 %.

Por último, es fácil fabricar clínker de calidad constante. Particularmente puede modificarse el índice de cal libre.

Naturalmente es difícil cifrar los ahorros de funcionamiento: duraciones de campaña, aumento de la vida del refractario. La aplicación de la regulación no puede por menos que actuar favorablemente.

En conclusión, la fábrica de cemento interesada declara que el equipo se ha amortizado en menos de 4 meses.

5.2. Ejemplos de aplicación en una vía seca

La instalación puesta bajo regulación es un horno S F A C, con intercambiador en contra corriente, vía seca integral. Nuestro propósito no es el de describir la originalidad del procedimiento, pero debemos, a pesar de todo, precisar que se trata de un horno con *caudal variable*. Por lo tanto, hay que mantener la sustentación de las partículas de crudo cualquiera que sea el caudal gaseoso procedente de la combustión.

Para realizar esta adaptación, se efectúan dos reciclados, uno directamente ligado con el caudal del horno, y el otro que asegura un nivel de temperatura constante en la base del intercambiador.

La variación de caudal puede alcanzar el 50 % del caudal mínimo.

Ha habido, pues, que concebir un conjunto automático capaz de asegurar este funcionamiento variable.

Características

- Horno giratorio: longitud, 57 m; \varnothing 4,5 m.
- Intercambiador vertical: 4 niveles de ciclón;
un reciclado de caudal: 30 % del caudal máximo;
un reciclado de finos: 10 %.
- Enfriador de parrilla: Fuller (4 compartimientos).
- Caldeo: fuel-oil.

5.21. Circuitos principales

— Regulación de la temperatura de la zona con intervención posible en el punto de consigna del dispositivo desfase de zona que puede unirse posteriormente a un analizador de CaO libre.

- *Regulación del caudal materia cruda.*
- *Grado de llenado constante.*
- *Regulación de la temperatura del aire secundario:*

regulación de la presión bajo la primera cámara.

- *Regulación de la equipresión (cabeza del horno):*

acción sobre el exhaustor del Fuller.

- *Regulación de la temperatura de los gases expulsados.*
- *Regulación de la temperatura en la base del intercambiador.*
- *Regulación de los gases a la salida del intercambiador.*

5.22. Circuitos auxiliares

Todos los valores medios definidos, necesarios para el computador:

- caudal del crudo;
- recirculación del caudal gaseoso;
- velocidad del horno;
- velocidad de la parrilla;
- velocidad o caudal del ventilador enfriador;
- temperatura de salida del clinker.

5.23. Computador

Una vez definida la noción de producción, el computador fija los valores:

- velocidad del horno;
- caudal del crudo;
- temperatura de humos;
- temperatura del intercambiador;
- reciclado del caudal gaseoso;
- presión bajo cámara del enfriador;
- aire insuflado a otras cámaras;
- tiro exhaustor (media);
- caudal medio combustible.

5.24. Circuitos de control

El caudal real del crudo impone un funcionamiento variable del computador por un circuito de retorno.

El equilibrado, después de hallar un funcionamiento normal, y tan pronto como se precisa la tendencia, se opera de manera automática.

Evolución del caudal

Se puede alcanzar un nivel de producción (elevación o descenso) en unos tiempos variables y ajustables; la variación de pendiente va de 20 a 200 t/h. Con seguridad se puede poner a punto la instalación en unos minutos.

5.25. Valores estabilizados — Resultados

La temperatura de zona se mantiene a $\pm 10^{\circ}\text{C}$ aproximadamente y las fluctuaciones registradas proceden muy a menudo de variaciones de desplazamiento del material en la torre.

El funcionamiento del enfriador es automático, cualquiera que sea el valor de la producción. En los límites 490 t/día — 950 t/día, el computador fija con precisión los valores de consigna.

La estabilización de los parámetros es satisfactoria hasta el punto de anular la intervención húmeda durante varios días consecutivos.

La frecuencia con que se producen las avalanchas ha disminuido considerablemente, pero cuando éstas se producen es fácil modificar automáticamente, mediante el computador, el caudal de la instalación para que el horno se adapte a esta dificultad.

Pendientes que alcanzan 100 t/día no tienen influencia notable en el comportamiento del horno.

Esta instalación sólo tiene un circuito de control. Este nos ha mostrado la importancia de este género de circuitos y esta aplicación la extendemos a la casi totalidad de las variables.

Los esquemas de funcionamiento que se dan a continuación serán comentados directamente, así como sus resultados.

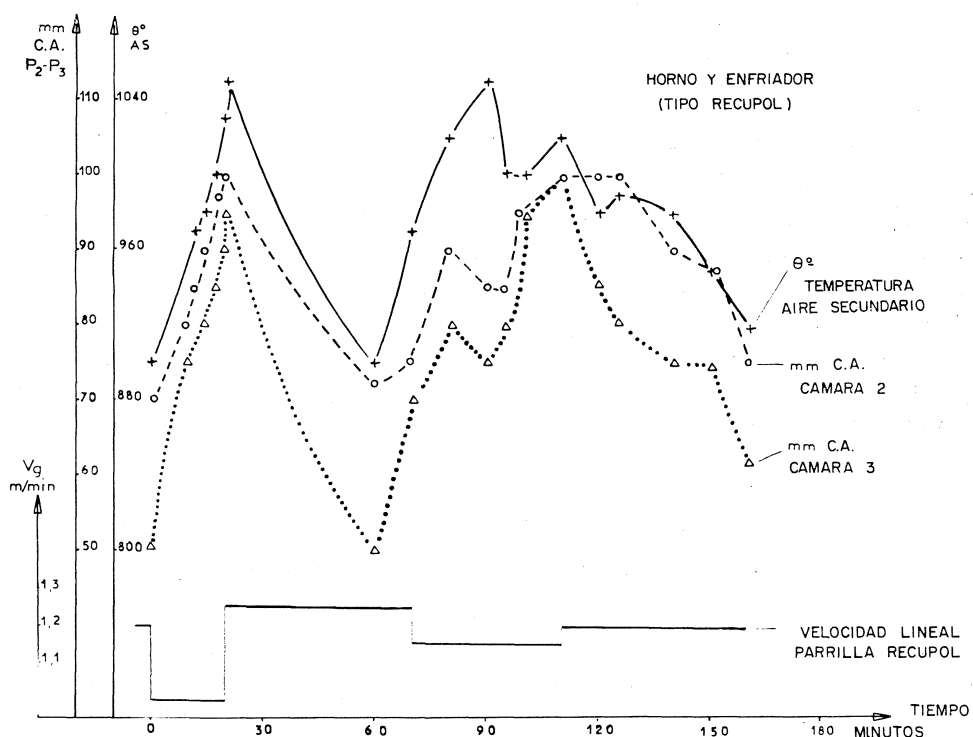


Fig. 42

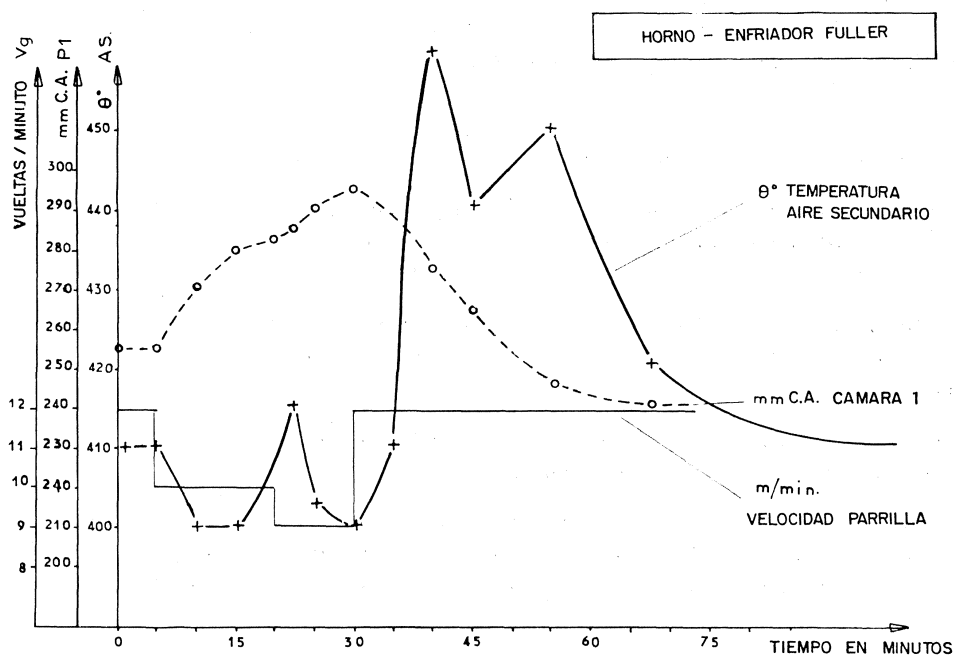


Fig. 43

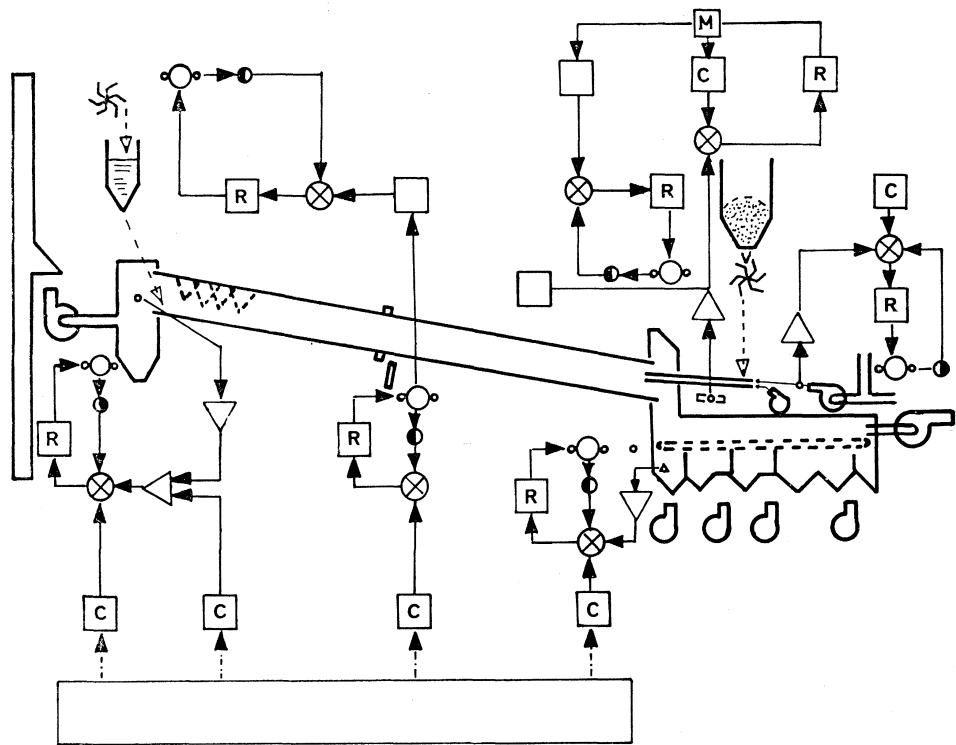
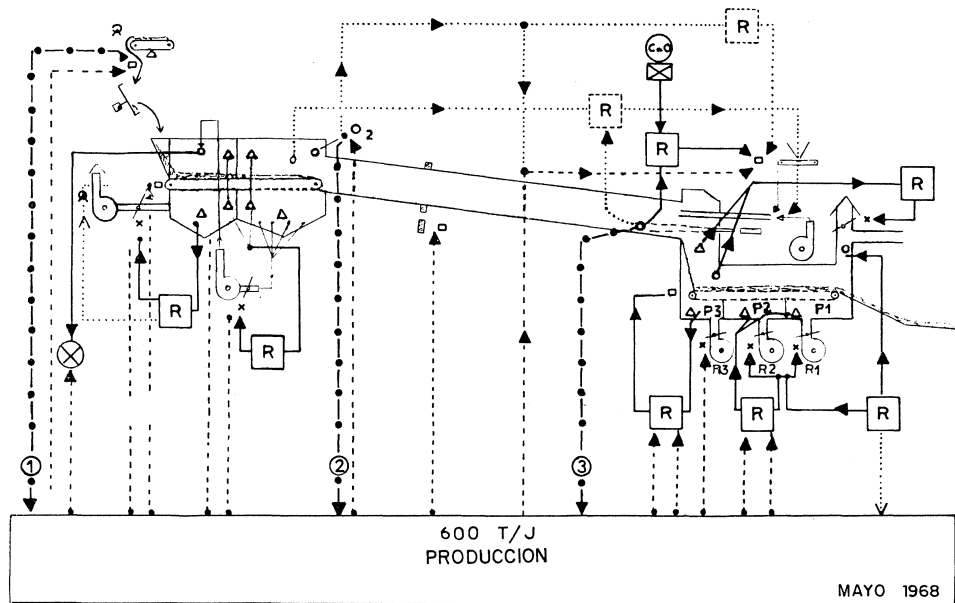
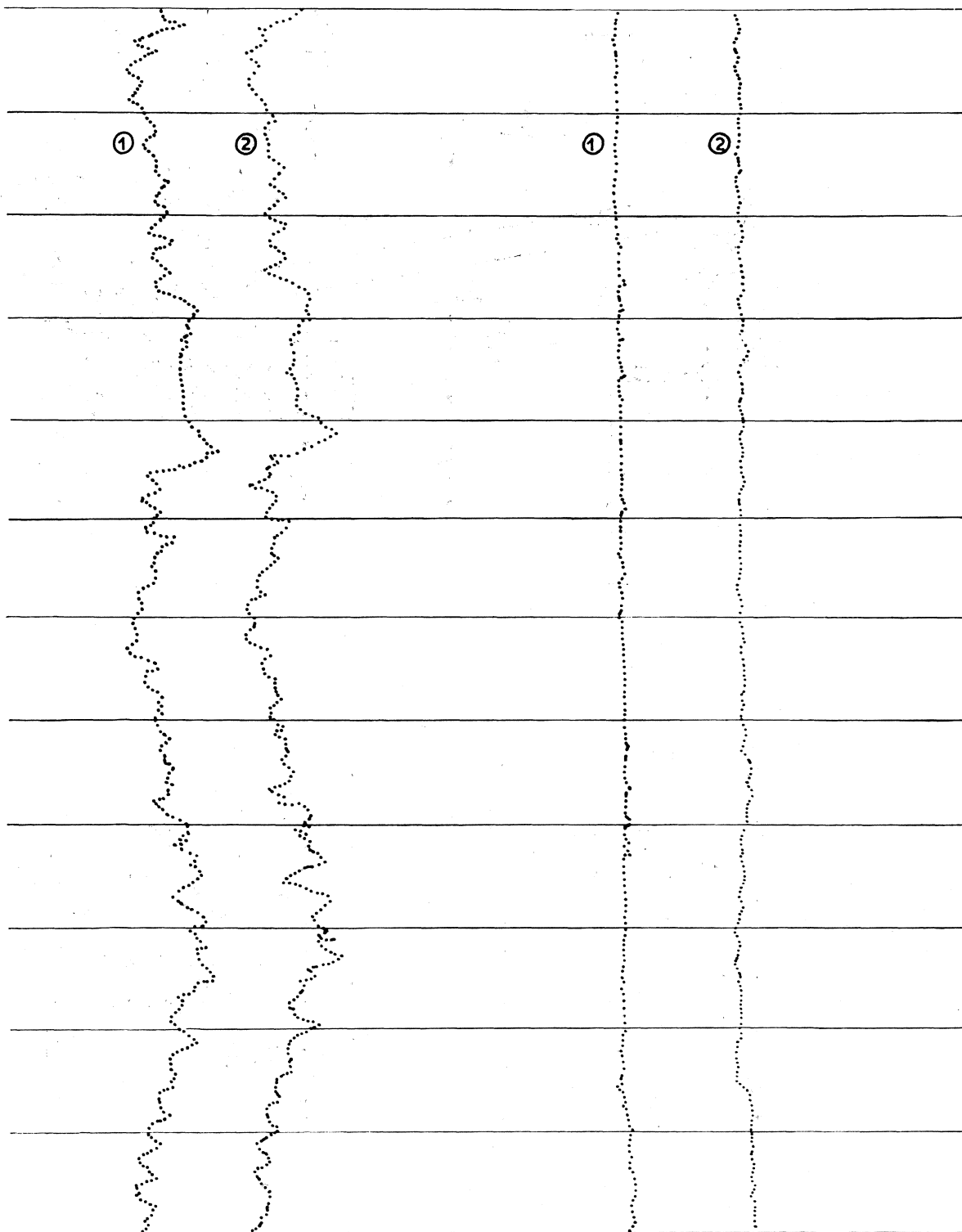


Fig. 44



- | | | | |
|------------|-------------------------------------|---|------------------|
| —•••••→ | CIRCUITOS DE CONTROL CON PRIORIDAD | ○ | TEMPERATURA |
| —→ | CIRCUITOS PRINCIPALES DE REGULACION | △ | PRESION |
| ·····→ | CIRCUITOS SECUNDARIOS DE REGULACION | □ | VELOCIDAD |
| - - - - -→ | CONSIGNAS DADAS POR EL COMPUTADOR | * | POSICION ANGULAR |
| | | ⊗ | CAUDAL |

Fig. 45.—Computador analógico CERILH.



- ① DEPRESION CAMARA 1
- ② DEPRESION CAMARA 2

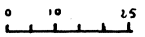
ESCALA 8 mm = 10 mm C. A. 

Fig. 46

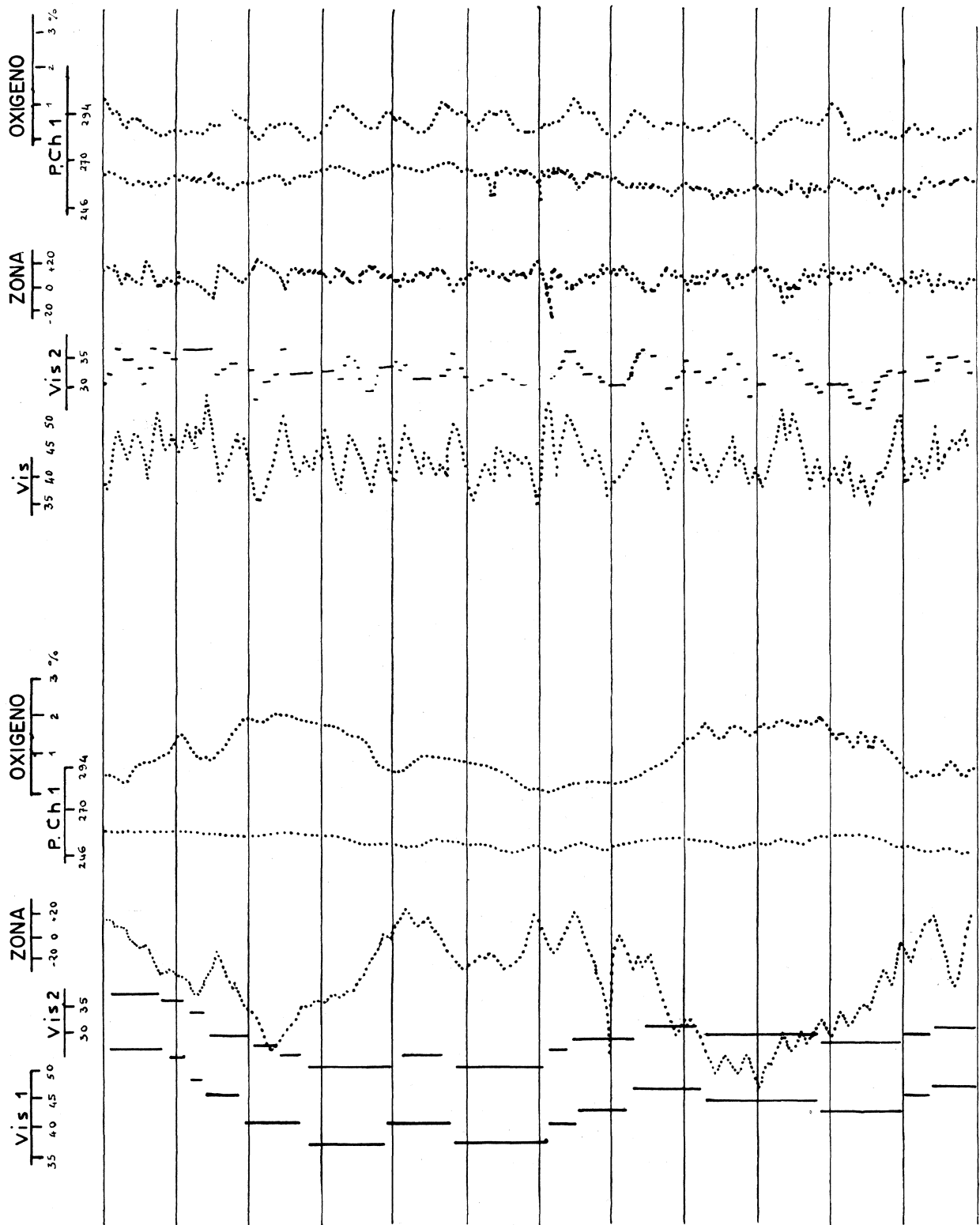


FIG. 47

COLOQUIO

Señor MANJON: Yo quisiera felicitarle por esta brillante exposición. Somos fabricantes de elementos de control y al comienzo de su intervención nos mostró ser partidario del calculador analógico. Nosotros somos también partidarios de esa solución. Fabricamos calculadoras digitales; pero quisiera preguntarle, ¿cuáles son las razones en que se basa Vd. para estimar más interesante en el campo de la cementería la solución analógica?

Sr. MINERBE: Creo que la primera razón, en mi opinión personal, es el dinero. No hablaré más que de algunas otras. La técnica numérica es muy poderosa, pero no se ha pensado para la industria del cemento; se ha pensado para otras cosas. Es un poco como si yo tuviera un burro y un carro y quisiera aplicar el equipo electrónico de un avión a reacción. Correría naturalmente el riesgo de no poder utilizarlo. No podría utilizarlo por no poseer la información suficiente, ya que lo que hace avanzar al burro es una zanahoria y el conocimiento de las rutas.

Esta es una de las razones; pero hay otras fundamentales, y es que lo lógico funciona en tiempos reales. Miren Vds., los calculadores numéricos muy evolucionados, muy poderosos, requieren toda una organización para las traducciones múltiples a que obligan. Esto obliga a que se pague por ello unos precios muy elevados, mientras que la otra solución trabaja sin parar, porque, cuando tiene unas señas, se compara con otras de modo permanente.

También se podrá decir que el calculador numérico puede calcular en una décima de segundo y se llega al mismo resultado, pero quizás como es una máquina muy poderosa ha de servir para muchas cosas, se la puede tener haciéndola trabajar en otras cosas más lentas. Yo estaré a favor del calculador numérico el día en que se puedan conocer las ecuaciones.

El día en que se conozcan las ecuaciones es posible que el calculador analógico desaparezca, aunque ahora no sea ésta la tendencia en Europa. Pero desde el punto de vista de la analogía y de su tiempo real, creo que, con todo, la mejor respuesta es que se trata de una cuestión de precio. Al comparar un equipo con otro, la comparación es un coeficiente de precio que representa por lo menos un 20 ó un 30 %. En mi opinión, esta respuesta es suficientemente satisfactoria. Es dura, pero satisfactoria.

Además, tenga Vd. en cuenta una cosa, el calculador automático se ve ya en industrias de cemento muy grandes. Hoy día se hacen hornos de 3.000 ó 4.000 t diarias. Naturalmente un calculador hará el mismo trabajo para un horno de 4.000 t diarias que si se emplea para un horno que no haga más que 500 toneladas.

Pero si se comparan los precios y los gastos de inversión resulta, por una parte, que se han gastado millares de millones para automatización. Por otra parte, van a gastar las mismas cantidades y en cambio el equipo valdrá menos. La rentabilidad no se asegura

y puedo citar casos particulares. Es cierto que con las técnicas modernas ha aumentado en un 20 % la producción de un horno determinado. Ahora bien, quizás no tenga esto tanto valor cuando se piensa que por el precio de los aparatos que se han puesto allí se hubiera podido hacer otro horno.

La temperatura del aire secundario es para mí un parámetro muy importante desde el punto de vista de la marcha del horno. Por otra parte, parece que la temperatura del aire secundario influye sobre la posición, el desplazamiento e incluso sobre la geometría de la zona. La cuestión que expongo no tiene nada que ver con la automatización, pero es interesante para todo el mundo.

La automación es importante desde el punto de vista del horno, y, por consiguiente, también de la posición de la citada zona.

Sr. MANJON: *¿Pero cómo se asegura la temperatura del aire?*

Sr. MINERBE: *Es evidente cómo actuaríamos, cómo la podríamos variar; desde el momento en que se admite que las variaciones de la posición de la zona están muy influenciadas por la temperatura del aire secundario, ya puede uno servirse de ello para fijar una posición determinada o para hacer variar dicha posición.*

Pero habría que establecer las leyes que ligan, que relacionan la posición de la zona de cocción en función de una temperatura. Esto podrá hacerse a condición de mantener una constancia de todos los demás parámetros. Pero hay muchos parámetros entre los más importantes. Quizás es una cosa que podría hacerse, pero no veo bien como se puede variar fácilmente la temperatura del aire secundario, a no ser actuando sobre el grado de llenado de la parrilla, para que el caudal de los ventiladores siga constante. Así sí se podría hacer.

Cito un caso, el primero, en que vieron Vds. un horno que ahora se encuentra bajo esta forma de regulación desde hace 8 años. Es un horno en Francia en una instalación de vía húmeda, pero esta instalación ha mostrado algo muy extraordinario que no se ha reproducido en otras; ocurrió una cosa bastante espectacular, quizás porque se pudo dominar la temperatura del aire secundario con bastante precisión. La zona de cocción habitualmente tiene anillos, en donde el clínker va saltando de uno a otro. Esa zona de cocción de 15 m de longitud se hizo completamente lisa. El refractario no se cambia más que cada 2 años, porque no hay destrucción del material. Es un caso totalmente particular que se ha producido, pero, si tratan Vds. de hacer tentativas similares, probablemente no lo reproducirán. Realmente prueba que si se dominan bien los parámetros de cocción, se puede llegar a eso.