

MINISTERIO DE INDUSTRIA  
REGISTRO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL



ESPAÑA

(19) ES	(11) 460649	(10) A 1
(21)		
(22)	FECHA DE PRESENTACION 2-30-1977	

PATENTE DE INVENCION

(30) PRIORIDADES: (31) NUMERO	(32) FECHA	(33) PAIS
32 395/76	4 de agosto de 1.976	INGLATERRA

(47) FECHA DE PUBLICIDAD	(51) CLASIFICACION INTERNACIONAL	(62) PATENTE DE LA QUE ES DIVISIONARIA
	G 05 B	

(64) TITULO DE LA INVENCION
SISTEMA DE CONTROL, DENOMINADO ADAPTATIVO-PREDICTIVO, PARA PROCESOS MONO ó MULTIVARIABLES.

(71) SOLICITANTE (S)
D. JUAN MARTIN SANCHEZ

DOMICILIO DEL SOLICITANTE
Calle Alava 75 - BARCELONA - 5 (ESPAÑA)

(72) INVENTOR (ES)
D. JUAN MARTIN SANCHEZ

(73) TITULAR (ES)

(74) REPRESENTANTE
D. JOSE MIGUEL GOMEZ-ACEBO Y POMBO

Esta invención concierne a un sistema de control, que denominamos adaptativo-predictivo, que utiliza un calculador digital para llevar a cabo el control adaptativo de procesos mono ó multivariables, con parámetros conocidos ó desconocidos, con ó sin retardos puros, de tal manera que el vector salida dinámica del proceso es predicho y el vector control, que debe aplicarse al proceso, es calculado con el fin de que el vector salida dinámica predicho sea igual al vector salida dinámica deseada para el proceso.

La invención incumbe a un sistema de control adaptativo para procesos mono ó multivariables con parámetros conocidos ó desconocidos que pueden variar con el tiempo, y con o sin retardos puros. El campo de aplicaciones es ilimitado, por ejemplo puede ser aplicado a sistemas en áreas tan diversas como aeronáutica, electrotécnica, ingeniería química, etc.

Ejemplos de procesos en los que el sistema de control adaptativo-predictivo ha sido aplicado son el control monovariable de un avión, donde el ángulo de elevación es controlado por la posición del elevador, y el control multivariable de una columna de destilación, donde las composiciones en la base y en la cabeza son controladas por los caudales de reflujo y vapor.

Es bien conocido que el rendimiento de un sistema de control basado en una estructura con parámetros constantes se deteriora cuando los parámetros dinámicos del proceso varían de una forma imprevisible que no puede ser medida directa ó indirectamente.

En los últimos años se han desarrollado técnicas de control para tratar de resolver este problema, las más notables de las cuales se han basado en la teoría de los sistemas

adaptativos con modelo de referencia, que básicamente opera en una de las dos siguientes formas:

1) Realiza una estimación adaptativa en tiempo real de los parámetros y las variables de estado del proceso, a partir de la cual un regulador adaptativo calcula el control que debe aplicarse al proceso, ó 2) Calcula el control que debe aplicarse al proceso por medio de un dispositivo de control adaptativo con el fin de que la salida del proceso siga a la salida de un modelo de referencia.

En general, en los dos casos previamente mencionados la estructura de control requiere el diseño de un corrector y las dificultades encontradas en el cálculo de los parámetros de dicho corrector cuando el orden del proceso aumenta restringe severamente el campo de aplicaciones de estas técnicas.

La presente invención utiliza un calculador digital para llevar a cabo el control adaptativo de procesos mono ó multivariantes con parámetros conocidos ó desconocidos y variables con el tiempo y con ó sin retardos puros, de tal manera que el vector salida dinámica del proceso es predicho y el vector control, que debe aplicarse al proceso, se calcula con el fin de que el vector salida dinámica predicho sea igual al vector salida dinámica deseado, y esto es realizado en cada instante de muestreo ó control por un número de simples y específicas operaciones.

La materialización de la invención será descrita de una forma general con la ayuda de las figuras que a continuación se indicarán, posteriormente los resultados de una aplicación particular del sistema de control serán mostrados.

La figura 1 muestra la estructura general y concep-

tual del sistema de control adaptativo-predictivo.

La figura 2 muestra la columna de destilación a la cual se aplicó el sistema de control adaptativo-predictivo para realizar el control multivariable de las composiciones en la base y en la cabeza, consideradas como salidas, por medio de los caudales de reflujo y vapor, considerados como entradas.

La figura 3 muestra los resultados de un experimento de control adaptativo-predictivo de la columna de destilación considerada.

Tal como muestra la figura 1, el sistema de control, en cada instante de muestreo  $K$ , puede comportarse de las dos maneras siguientes:

1.- Siguiendo el camino 1, un operador humano ó automático 2, puede directamente imponer el vector control  $\underline{u}(K)$ , que es la entrada al proceso 3 y al bloque de identificación 4 en el instante de muestreo  $K$ ; dicho bloque de identificación utiliza un modelo adaptativo-predictivo 5 para calcular una estimación  $\underline{\hat{d}}(K)$ , del vector salida del proceso, y el error de esta estimación  $\underline{e}(K)$ , que es la diferencia entre el vector salida del proceso  $\underline{Y}(K)$  y  $\underline{\hat{d}}(K)$ , será utilizado para ajustar, a través de un mecanismo de adaptación 6, los parámetros del previamente mencionado modelo adaptativo-predictivo. Este modo de operación será llamado acción pasiva de identificación.

2.- Siguiendo el camino 7 los parámetros del modelo adaptativo-predictivo serán ajustados como se ha explicado anteriormente, pero en este caso el vector control que se aplica al proceso será calculado por el bloque de control 8, utilizando el mismo modelo adaptativo-predictivo ajustado, de tal manera que el vector salida deseada del proceso en el instante  $K+r+1$ ,

$\underline{d}_1 (K+r+1)$ , será igual al vector salida predicha en el mismo instante  $K+r+1$ , donde  $r$  es el número de periodos de muestreo de retardo observado ó convenientemente considerado en el proceso.  $\underline{d}_1 (K+r+1)$  será calculado en el instante  $K$  por el bloque de consigna 9 en respuesta a las señales de entrada que a dicho bloque llegan generadas por el operador 2. Este modo de operación será llamado acción activa de control ó de mando.

Para controlar el proceso, el sistema de control adaptativo-predictivo utilizará siempre valores incrementales de los vectores salida, entrada y perturbaciones medibles del proceso, y si se desea el vector control puede ser sometido a un conjunto de límites antes de ser aplicado; en consecuencia, tomando en cuenta la concepción descrita previamente, las operaciones específicas que el sistema de control llevará a cabo, con la ayuda de un calculador digital, en cada instante de muestreo  $K$  durante su acción de control se describen a continuación:

a) Medida  $y$ , si se considera conveniente, filtraje de las variables de salida del proceso para obtener el vector salida del proceso  $\underline{Y}_p (K)$ , la dimensión del cual se puede considerar igual a  $n$ .

b) Cálculo del vector salida del proceso incremental  $\underline{Y} (K)$  por:

$$\underline{Y} (K) = \underline{Y}_p (K) - \underline{Y}_p (K-\gamma) \quad (\text{equ. 1})$$

Donde  $\gamma$  es un entero que puede ser convenientemente elegido.

c) Cálculo de la estimación  $\underline{d} (K)$  del vector salida del proceso incremental por medio del modelo adaptativo-predictivo del bloque de identificación, que puede ser definido por:

$$\underline{d}(K) = \sum_{i=1}^h A_i(K-1) \underline{Y}(K-i-r_1) + \sum_{i=1}^f B_i(K-1) \underline{u}(K-i-r) +$$

$$+ \sum_{i=1}^g C_i(K-1) \underline{w}(K-i-r_2) \quad (\text{equ. 2})$$

Donde los vectores  $\underline{u}(K-i-r)$  y  $\underline{w}(K-i-r_2)$  se obtienen por:

5 
$$\underline{u}(K-i-r) = \underline{u}_p(K-i-r) - \underline{u}_p(K-i-r-\gamma) \quad (\text{equ. 3})$$

$$\underline{w}(K-i-r_2) = \underline{w}_p(K-i-r_2) - \underline{w}_p(K-i-r_2-\gamma) \quad (\text{equ. 4})$$

10 Donde  $\underline{u}_p(K-i-r)$  y  $\underline{w}_p(K-i-r_2)$  son los vectores control y perturbaciones medibles de dimensiones  $n_1$  y  $m$  en los instantes  $K-i-r$  y  $K-i-r_2$ , respectivamente. En la ecuación 2 los enteros  $h$ ,  $f$  y  $g$  pueden ser convenientemente elegidos, y asimismo los enteros  $r_1$  y  $r_2$  pueden ser también convenientemente elegidos teniendo en cuenta las medidas disponibles ó predecibles de los vectores salida del proceso y perturbaciones, respectivamente.

15 Las matrices  $A_i(K-1)$ ,  $B_i(K-1)$  y  $C_i(K-1)$  del modelo adaptativo-predictivo tienen dimensiones apropiadas y sus valores corresponden al valor previo antes de ser ajustadas en el instante  $K$ . Si la dimensión del vector control es mayor que la del vector de salida entonces, en la mayor parte de los

20 casos, condiciones suplementarias pueden añadirse para obtener una solución de control única, ó simplemente algunas de las componentes del vector control pueden incluirse en el vector perturbaciones; como un caso particular consideraremos que  $n_1 = n$ .

25 d) Cálculo del vector error de estimación por:

$$\underline{e}(K) = \underline{Y}(K) - \underline{d}(K) \quad (\text{equ. 5})$$

e) Cálculo de los valores ajustados en el instante  $K$  de los parámetros  $a_{ijq}(K)$ ,  $b_{ijq}(K)$  y  $c_{ijq}(K)$ , que son los

30 elementos en la línea  $j$  y la columna  $q$  de las matrices  $A_i(K)$ ,

$B_i(K)$  y  $G_i(K)$ , respectivamente, por medio de los siguientes algoritmos:

$$a_{ijq}(K) = \beta_{a_{ijq}} \alpha_j(K) e_j(K) Y_q(K-i-r_1) + a_{ijq}(K-1) \quad (\text{equ. 6})$$

5 
$$b_{ijq}(K) = \beta_{b_{ijq}} \alpha_j(K) e_j(K) u_q(K-i-r) + b_{ijq}(K-1) \quad (\text{equ. 7})$$

$$c_{ijq}(K) = \beta_{c_{ijq}} \alpha_j(K) e_j(K) w_q(K-i-r_2) + c_{ijq}(K-1) \quad (\text{equ. 8})$$

Donde  $e_j(K)$ ,  $Y_q(K-i-r_1)$ ,  $u_q(K-i-r)$  y  $w_q(K-i-r_2)$  son las componentes respectivas de los vectores  $\underline{e}(K)$ ,  $\underline{Y}(K-i-r_1)$ ,  $\underline{u}(K-i-r)$  y  $\underline{w}(K-i-r_2)$ , respectivamente.  $\beta_{a_{ijq}}$ ,  $\beta_{b_{ijq}}$  y  $\beta_{c_{ijq}}$  son coeficientes que pueden ajustarse convenientemente, y  $\alpha_j(K)$  ( $j = 1, n$ ) son funciones de  $K$  que pueden elegirse entre el amplio margen de posibilidades que permiten las conocidas técnicas de identificación paramétrica por el método del gradiente. Una elección particular de estas funciones puede ser la siguiente:

20 
$$\alpha_j(K) = 1 / \left[ 1 + \sum_{i=1}^h \sum_{q=1}^n \beta_{a_{ijq}} Y_q(K-i-r_1)^2 + \sum_{i=1}^f \sum_{q=1}^n \beta_{b_{ijq}} u_q(K-i-r)^2 + \sum_{i=1}^g \sum_{q=1}^m \beta_{c_{ijq}} w_q(K-i-r_2)^2 \right]$$

(equ. 9)

f) Cálculo del vector salida deseada incremental  $\underline{d}_1(K+r+1)$ , que puede ser llevado a cabo por el bloque de consigna de la siguiente manera:

1.- Cálculo del vector salida deseada del proceso  $\underline{d}_p(K+r+1)$  de dimensión  $n$ , que puede realizarse de diversas formas, por ejemplo utilizando un modelo de referencia con una dinámica deseada ó utilizando cualquier otro diseño que tome en cuenta la dinámica deseada y también las medidas previas ó predichas

30

de las salidas ó de las entradas del proceso. Un ejemplo de este último tipo de diseño puede ser definido por la siguiente ecuación:

5 
$$\underline{d}_p(K+r+1) = \sum_{i=1}^t F_i \underline{Y}_p(K+r+1-r_1-i) + \sum_{i=1}^s H_i \underline{V}(K+1-i) \quad (\text{ecu. 10})$$

Donde  $\underline{Y}_p(K+r+1-r_1-i)$  y  $\underline{V}(K+1-i)$  son los vectores salida del proceso, y entrada del bloque de consigna en los instantes de muestreo  $K+r+1-r_1-i$  y  $K+1-i$ , respectivamente.

10  $\underline{V}(K+1-i)$  es un vector de dimensión  $n$ , que es generado directamente por el operador; y las matrices  $F_i (i= 1, t)$  y  $H_j (j = 1, s)$  así como los enteros  $t$  y  $s$ , pueden ser elegidos libremente, teniendo en cuenta la dinámica deseada.

2.- A partir del valor del vector salida deseada para el proceso  $\underline{d}_p(K+r+1)$ , el vector salida incremental deseada  $\underline{d}_1(K+r+1)$  puede ser facilmente calculado de distintas formas; una de ellas generalmente conveniente cuando  $\gamma > r$ , es la mostrada por la siguiente ecuación:

20 
$$\underline{d}_1(K+r+1) = \underline{d}_p(K+r+1) - \underline{Y}_p(K+r+1-\gamma) \quad (\text{ecu. 11})$$

Si se considera necesario el valor de  $\underline{d}_1(K+r+1)$  puede ser limitado.

g) Cálculo del vector de control de acuerdo con los siguientes puntos:

25 1.- A partir del modelo adaptativo-predictivo ajustado, el vector salida del proceso incremental predicho  $\underline{d}'_1(K+r+1)$ , en el instante de muestreo  $K+r+1$ , dependerá del vector control incremental  $\underline{u}(K)$ , y es dado por la ecuación:

30 
$$\underline{d}'_1(K+r+1) = \sum_{i=1}^h A_i(K) \underline{Y}(K+r+1-r_1-i) + \sum_{i=1}^f B_i(K) \underline{u}(K+1-i) +$$

$$+ \sum_{i=1}^g C_i(K) \underline{w}(K+r+1-r_2-i) \quad (\text{ecu. 12})$$

El vector control incremental  $\underline{u}(K)$  se calcula haciendo el vector salida incremental del proceso predicho  $\underline{d}'_1(K+r+1)$  igual al vector salida incremental deseada  $\underline{d}_1(K+r+1)$ , y en consecuencia se obtiene por:

$$\begin{aligned} \underline{u}(K) = & B_1^{-1}(K) \underline{d}_1(K+r+1) - B_1^{-1} \sum_{i=2}^f B_i(K) \underline{u}(K+i-1) - \\ & - B_1^{-1}(K) \sum_{i=1}^h A_i(K) \underline{y}(K+r+1-r_1-i) - B_1^{-1}(K) \sum_{i=1}^g C_i(K) \underline{w}(K+r+1-r_2-i) \end{aligned} \quad (\text{ecu. 13})$$

2.- A partir de  $\underline{u}(K)$ , el vector control se calculará por:

$$\underline{u}_p(K) = \underline{u}(K) + \underline{u}_p(K-1) \quad (\text{ecu. 14})$$

h) Si se desea el vector control  $\underline{u}_p(K)$  puede ser sometido a un conjunto de límites antes de ser aplicado al proceso.

En su aplicación el sistema de control adaptativo-predictivo puede utilizar los valores incrementales de los vectores de entrada, salida y perturbaciones como se ha descrito previamente; pero otra manera de aplicar el sistema es calcular los valores incrementales de los vectores de entrada, salida y perturbaciones con respecto a algunos vectores constantes elegidos convenientemente y, en consecuencia, en las ecuaciones descritas previamente las ecuaciones 1, 3, 4, 11 y 14 necesitan ser modificadas respectivamente como sigue:

$$\underline{y}(K) = \underline{y}_p(K) - \underline{y}_{pc} \quad (\text{ecu. 15})$$

$$\underline{u}(K-i-r) = \underline{u}_p(K-i-r) - \underline{u}_{pc} \quad (\text{ecu. 16})$$

$$\underline{w}(K-i-r_2) = \underline{w}_p(K-i-r_2) - \underline{w}_{pc} \quad (\text{ecu. 17})$$

$$\underline{d}_1(K+r+1) = \underline{d}_p(K+r+1) - \underline{Y}_{pc} \quad (\text{ecu. 18})$$

$$\underline{u}_p(K) = \underline{u}(K) + \underline{u}_{pc} \quad (\text{ecu. 19})$$

5            Además, cuando se considera conveniente dar valores  
específicos a algunos de los parámetros del modelo adaptativo-  
-predictivo (por ejemplo, debido a un cierto conocimiento del  
proceso), dichos valores pueden ser dados a los respectivos  
parámetros, y los coeficientes  $\beta$  correspondientes se fijarán  
10 igual a cero. También es posible parar las operaciones de  
ajuste de los parámetros del modelo adaptativo-predictivo tan-  
to tiempo como se considere conveniente.

          Cuando el sistema actúa según su acción pasiva de  
identificación, solo necesita realizar las operaciones a hasta  
15 e, y esta acción de identificación puede llevarse a cabo en  
tiempo real ó en tiempo diferido, e incluso entre instantes de  
muestreo.

          Puede observarse que en la operación g para calcular  
 $\underline{u}(K)$ , la matriz  $B_1(K)$  debe de invertirse. El riesgo de singu-  
20 laridad de la matriz  $B_1(K)$  puede ser practicamente siempre evi-  
tado añadiendo un número de retardos puros conveniente a las  
componentes de los vectores de entrada y salida del proceso,  
y controlando el proceso resultante. Un ejemplo experimental  
ilustrativo de esta forma de actuar se presenta en esta paten-  
25 te.

          Otra forma de aplicar el sistema de control es poner  
el modelo adaptativo-predictivo en tal forma que el vector  
 $\underline{d}(K)$  no sea la estimación del vector  $\underline{Y}(K)$ , sino la estimación  
de cualquier otro vector de entrada ó salida en un instante de  
30 muestreo previo; el error de esta estimación se utilizará para

ajustar el modelo adaptativo-predictivo.

En algunos casos, una forma equivalente de aplicar el sistema de control que aquí se presenta, es descomponerlo en un conjunto de sistemas con una salida y varias entradas, cada uno de estos sistemas impondrá una condición que deben verificar los componentes del vector control en cada instante de muestreo, y a partir del correspondiente conjunto de  $n$  ecuaciones lineales el vector control puede calcularse en cada instante de muestreo.

Finalmente, las ganancias estáticas del proceso pueden ser modificadas multiplicando las componentes de los vectores, ó vectores incrementales, de salida, entrada y perturbaciones, por ganancias escalares, y también la dinámica del proceso puede ser modificada de una forma análoga; en este caso, el sistema de control ó mando controlará el proceso a través del control del proceso modificado.

Ejemplo experimental: Control multivariable de una columna de destilación binaria.

El sistema de control adaptativo-predictivo, previamente descrito, ha sido aplicado al control multivariable de las composiciones en la base y en la cabeza (en % de peso en metanol) de una columna de destilación binaria, en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alberta, Edmonton, Alberta (Canadá).

Como puede verse en la figura 2, la columna de destilación 10 recibe la alimentación 11 en el cuarto plato, el producto de cabeza se recoge en el condensador 12, refrigerado por agua, de donde pasa, una vez condensado al depósito 13.

En el experimento que presentaremos se pretende controlar las composiciones del producto en la cabeza, que se ex-

trae del depósito 13, y del producto que se recoge en la base de la columna 10 y se extrae por 15.

5 Se utilizan como variables de control el caudal de reflujo 16 y el caudal de vapor 17 que calienta el dispositivo calorífico 18 en la base de la columna. Para ello utilizamos un computador digital 19 que recibe las medidas de la composición del producto en la cabeza y en la base realizadas por una célula de capacidad 20 y un dispositivo de gas cromatográfico 21, respectivamente, y manda los puntos de consigna (setpoint) de los reguladores 22 y 23 de los caudales del reflujo y del vapor. La columna disponía además del siguiente equipo: dos reguladores indicadores de nivel de líquido 24, dos indicadores de caudal 25, un regulador indicador de presión 26, dos reguladores de temperatura 27 y un regulador de caudal 28.

15 Las variables de control fueron los caudales de reflujo y vapor, y el periodo de muestreo fué de 256 seg. Debido a este largo periodo de muestreo, no existe un retardo entre la composición en la cabeza y los caudales de reflujo y vapor. Existe un retardo de un periodo de muestreo entre la composición en la base y el caudal de vapor, este retardo es debido al tiempo de análisis necesario para medir la composición en la base; y el retardo entre la composición en la base y el caudal de reflujo se observó igual a dos periodos de muestreo. Ninguna perturbación significativa actuó sobre el proceso.

25 Para evitar el problema de la singularidad de  $B_1(K)$ , discutido anteriormente, un retardo de un periodo de muestreo se le añade a la medida de la composición en la cabeza; en consecuencia, la componente correspondiente del vector salida del proceso que concierne a la composición en la cabeza en el instante de muestreo  $K$ , es la medida de la composición en la cabe

30

za en el instante K-1; asimismo dicha componente en el instante K+1 es ya conocida en el instante K.

De acuerdo con las circunstancias descritas previamente, en cada instante de muestreo K, la secuencia de operaciones ejecutada por el sistema de control adaptativo-predictivo, durante su acción de control, fué la siguiente:

1.- Medida de las composiciones en la cabeza y en la base para obtener el vector salida del proceso  $\underline{Y}_p(K)$ , las componentes del cual son la composición en la cabeza medida en el instante K-1,  $Y_{p1}(K)$ , y la composición en la base medida en K,  $Y_{p2}(K)$ .

2.- El número de períodos de muestreo de retardo considerado para el proceso r es, en este caso, igual a 1, y el entero  $\gamma$  se eligió igual a 2; en consecuencia el vector salida incremental se calcula según:

$$\underline{Y}(K) = \underline{Y}_p(K) - \underline{Y}_p(K-2) \quad (\text{ecu. 20})$$

3.- En el modelo adaptativo-predictivo, los enteros h, f y  $r_1$  fueron elegidos igual a 3, 4 y 0, respectivamente, y no se consideró un vector de perturbaciones; en consecuencia, el vector salida incremental estimado se calculó según:

$$\begin{bmatrix} d_1(K) \\ d_2(K) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^3 A_i(K-1) \begin{bmatrix} Y_1(K-i) \\ Y_2(K-i) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^4 B_i(K-1) \begin{bmatrix} u_1(K-i-1) \\ u_2(K-i-1) \end{bmatrix}$$

(ec. 21)

Donde  $d_1$  y  $Y_1$  son las componentes en relación con la composición en la cabeza, y  $d_2$  y  $Y_2$  son las componentes en relación con la composición en la base.  $u_1$  y  $u_2$  son los caudales incrementales de reflujo y vapor, respectivamente. El vector

control incremental se obtiene según:

$$\underline{u}(K-i-1) = \underline{u}_p(K-i-1) - \underline{u}_p(K-i-3) \quad (\text{ecu. 22})$$

5 Donde  $\underline{u}_p(K-i-1)$  es el vector control aplicado en el instante  $K-i-1$ . Las matrices  $A_i(K-1)$  ( $i=1,3$ ) y  $B_i(K-1)$  ( $i = 1,4$ ) fueron elegidas del siguiente modo:

10

$$A_1(K-1) = \begin{bmatrix} a_{111}(K-1) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad A_2(K-1) = \begin{bmatrix} a_{211}(K-1) & 0 \\ 0 & a_{222}(K-1) \end{bmatrix} ;$$

$$A_3(K-1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & a_{322}(K-1) \end{bmatrix} ;$$

15

$$B_1(K-1) = \begin{bmatrix} b_{111}(K-1) & b_{112}(K-1) \\ 0 & b_{122}(K-1) \end{bmatrix} ;$$

20

$$B_2(K-1) = \begin{bmatrix} b_{211}(K-1) & b_{212}(K-1) \\ b_{221}(K-1) & b_{222}(K-1) \end{bmatrix} ;$$

25

$$B_3(K-1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{321}(K-1) & b_{322}(K-1) \end{bmatrix} ;$$

30

$$B_4(K-1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{421}(K-1) & 0 \end{bmatrix}$$

4.- Cálculo del vector error como se ha indicado en la ecuación 5.

5 5.- Cálculo de los valores ajustados en el instante K de los parámetros de las matrices  $A_i(K)$  ( $i = 1,3$ ) y  $B_i(K)$  ( $i = 1,4$ ), según las ecuaciones 6, 7 y 9, teniendo en cuenta que no se consideraron perturbaciones y que el valor de los coeficientes  $\beta$  era 0,1, excepto para aquellos parámetros cuyo valor se fijó igual a cero, en cuyo caso el valor de los correspondientes coeficientes  $\beta$  se anuló también.

10 6.- Las componentes del vector salida deseada para el proceso  $\underline{d}_p(K+2)$  en el instante K+2,  $d_{p1}(K+2)$  y  $d_{p2}(K+2)$ , en relación con las composiciones en la cabeza y en la base respectivamente, se calcularon según las siguientes ecuaciones escalares, que son un caso particular de la ecuación 10:

15 
$$d_{p1}(K+2) = \sum_{i=1}^2 f_{1i} Y_1(K+2-i) + \sum_{i=1}^2 h_{1i} V_1(K+1-i) \quad (\text{ecu. 23})$$

$$d_{p2}(K+2) = \sum_{i=1}^2 f_{2i} Y_2(K+1-i) + \sum_{i=1}^3 h_{2i} V_2(K+1-i) \quad (\text{ecu. 24})$$

20 Donde  $V_1(K+1-i)$  y  $V_2(K+1-i)$  son las componentes concernientes a las composiciones en la cabeza y en la base, respectivamente, del vector entrada del bloque de consigna  $\underline{V}(K+1-i)$  en el instante K+1-i. Los parámetros de las ecuaciones 23 y 24 se eligieron iguales a los de un modelo de segundo orden, sin y con un retardo de un periodo de muestreo, respectivamente, una frecuencia natural de 0,0056 rad./seg., y un coeficiente de amortiguamiento y una ganancia estática iguales a 1. Dado que el valor de la previamente mencionada ganancia estática es la unidad, las componentes  $V_1(K+1-i)$  y  $V_2(K+1-i)$

25

30 tienen el significado físico de ser los valores de consigna

(setpoint) para las composiciones en la cabeza y en la base, respectivamente, en el instante  $K+1-i$ .

En la ecuación 23 el valor  $Y_1(K+1)$  fué calculado previamente según:

$$5 \quad Y_1(K+1) = Y_{p1}(K+1) - Y_{p1}(K-1) \quad (\text{ecu. 25})$$

Siendo  $Y_{p1}(K+1)$  el valor de la composición en la cabeza medido en el instante  $K$ .

10 A partir de  $\underline{d}_p(K+2)$  el vector salida incremental deseada para el proceso se calcula según:

$$\underline{d}_1(K+2) = \underline{d}_p(K+2) - \underline{Y}_p(K) \quad (\text{ecu. 26})$$

15 Las componentes de  $\underline{d}_1(K+2)$ ,  $d_{11}(K+2)$  y  $d_{12}(K+2)$ , en relación con las composiciones en la cabeza y en la base, fueron limitadas a los valores absolutos 0,3 y 0,6 %, respectivamente.

7.- Cálculo del vector de control según:

$$20 \quad \underline{u}(K) = B_1^{-1}(K) \underline{d}_1(K+2) - B_1^{-1}(K) \sum_{i=2}^4 B_i(K) \underline{u}(K+1-i) - \\ - B_1^{-1}(K) \sum_{i=1}^3 A_i(K) \underline{Y}(K+2-i) \quad (\text{ecu. 27})$$

$$\underline{u}_p(K) = \underline{u}(K) + \underline{u}_p(K-2) \quad (\text{ecu. 28})$$

25 8.- Los valores absoluto e incremental de  $\underline{u}_p(K)$  fueron sometidos a un conjunto de límites antes de ser aplicados al proceso.

30 La figura 3 muestra, desde el inicio de la acción de control, los resultados de un experimento de 6 h. 24 min. de duración, en el cual la columna de destilación fué controlada por el sistema de control adaptativo-predictivo.

En la figura 3, en los diagramas A, B, C y D, se representa, en ordenadas, la composición en la cabeza (%), la composición en la base (%), el caudal de reflujo (g/s) y caudal de vapor (g/s), respectivamente, y en abscisas el tiempo en instantes de muestreo.

Los valores iniciales de los parámetros del modelo adaptativo-predictivo fueron elegidos racionalmente, y el sistema de control se comportó según su acción pasiva de identificación durante dos instantes de muestreo antes de empezar la acción de control. Cuando la acción de control empieza, el sistema de control conduce las composiciones en la cabeza y en la base de la columna desde 96,5 y 1 % a 96 y 3 %, respectivamente. Posteriormente, en el instante 29, mientras se mantiene la composición en la base al 3 %, la composición en la cabeza es llevada al 97 %; y en el instante 55, la composición en la base es llevada del 3 al 5 %, mientras la composición en la cabeza se mantiene al 97 %.

Es de hacer notar que el problema del control multivariable de una columna de destilación binaria, que el sistema adaptativo-predictivo ha resuelto con toda satisfacción, ha sido durante mucho tiempo un ejemplo frecuentemente citado de dificultades en el control de procesos químicos multivariables y con interacciones.

Descrita suficientemente la naturaleza del invento, así como la manera de realizarlo en la práctica, debe hacerse constar que las disposiciones anteriormente indicadas son susceptibles de modificaciones de detalle en cuanto no alteren su principio fundamental.

REIVINDICACIONES

1<sup>a</sup>.- Sistema de control, denominado adaptativo-predictivo, para procesos mono ó multivariantes, con parámetros conocidos ó desconocidos, con ó sin retardos puros, caracterizado porque puede actuar según una acción de control ó según una acción pasiva de identificación, utilizando en ambos casos un calculador digital; cuando se comporta de acuerdo con la acción de control ajusta los parámetros de un modelo adaptativo-predictivo por medio de algoritmos que responden a la técnica de estimación paramétrica del gradiente, y que a partir de este modelo calcula el vector control, en cada instante de muestreo, de tal manera que el vector salida predicha del proceso es igual al vector salida deseada para el proceso, correspondiendo ambos vectores a un instante posterior en un cierto número de períodos de muestreo al instante considerado, dependiendo el mencionado número del retardo que se considera para el proceso; que calcula el vector control, y si se desea, lo somete a un conjunto de límites antes de ser aplicado al proceso; que cuando se comporta de acuerdo con la mencionada acción pasiva de identificación ajusta los parámetros del modelo adaptativo-predictivo de la forma explicada anteriormente, pero en este caso el control que se aplica al proceso puede ser impuesto por el operador, pudiendo ejecutarse dicha acción pasiva en tiempo real ó tiempo diferido:

2<sup>a</sup>.- Sistema de control, según la reivindicación 1, caracterizado porque el mencionado sistema de control puede ser aplicado utilizando valores incrementales de los vectores entrada, salida y perturbaciones con respecto a sus valores en un instante anterior en un cierto número de períodos de muestreo al instante considerado, ó utilizando valores incrementales de

m/c

los previamente mencionados vectores con respecto a vectores constantes convenientemente elegidos.

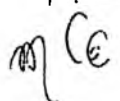
5 3<sup>a</sup>.- Sistema de control, según la reivindicación 1 y 2, caracterizado porque la mencionada salida deseada para el proceso puede ser calculada en cada instante de muestreo por el bloque de consigna, utilizando un clásico modelo de referencia ó utilizando un diseño que tenga en cuenta la dinámica deseada y los vectores salida del proceso previamente medidos ó conocidos.

10 4<sup>a</sup>.- Sistema de control, según las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque el control del proceso real puede llevarse a cabo a través del control de un proceso transformado obtenido añadiendo convenientemente retardos a las componentes de los vectores salida y/ó entrada del proceso real.

15 5<sup>a</sup>.- Sistema de control, según las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque el mencionado sistema de control puede en algunos casos ser descompuesto en un conjunto de  $n$  sistemas con una salida y varias entradas, a partir del cual el vector control será calculado durante la acción de control.

20 6<sup>a</sup>.- Sistema de control, según las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque, durante la operación del sistema, el ajuste de los parámetros del modelo adaptativo-predictivo puede ser parado tanto tiempo como sea considerado conveniente, para todos ó solamente para algunos de los parámetros del modelo adaptativo-predictivo, asignándole a los parámetros que no son ajustados cualquier valor deseado.

25



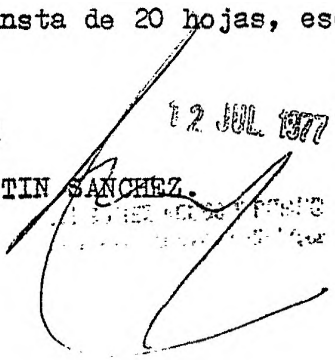
7<sup>a</sup>.- Sistema de control, denominado adaptativo-predictivo, para procesos mono ó multivariab<sup>l</sup>es, tal y como queda sustancialmente descrito en la presente Memoria e ilustrado en los adjuntos dibujos.

5 Esta Memoria consta de 20 hojas, escritas a máquina por una sola cara.

Madrid

12 JUL 1977

D. JUAN MARTIN SANCHEZ.



mte

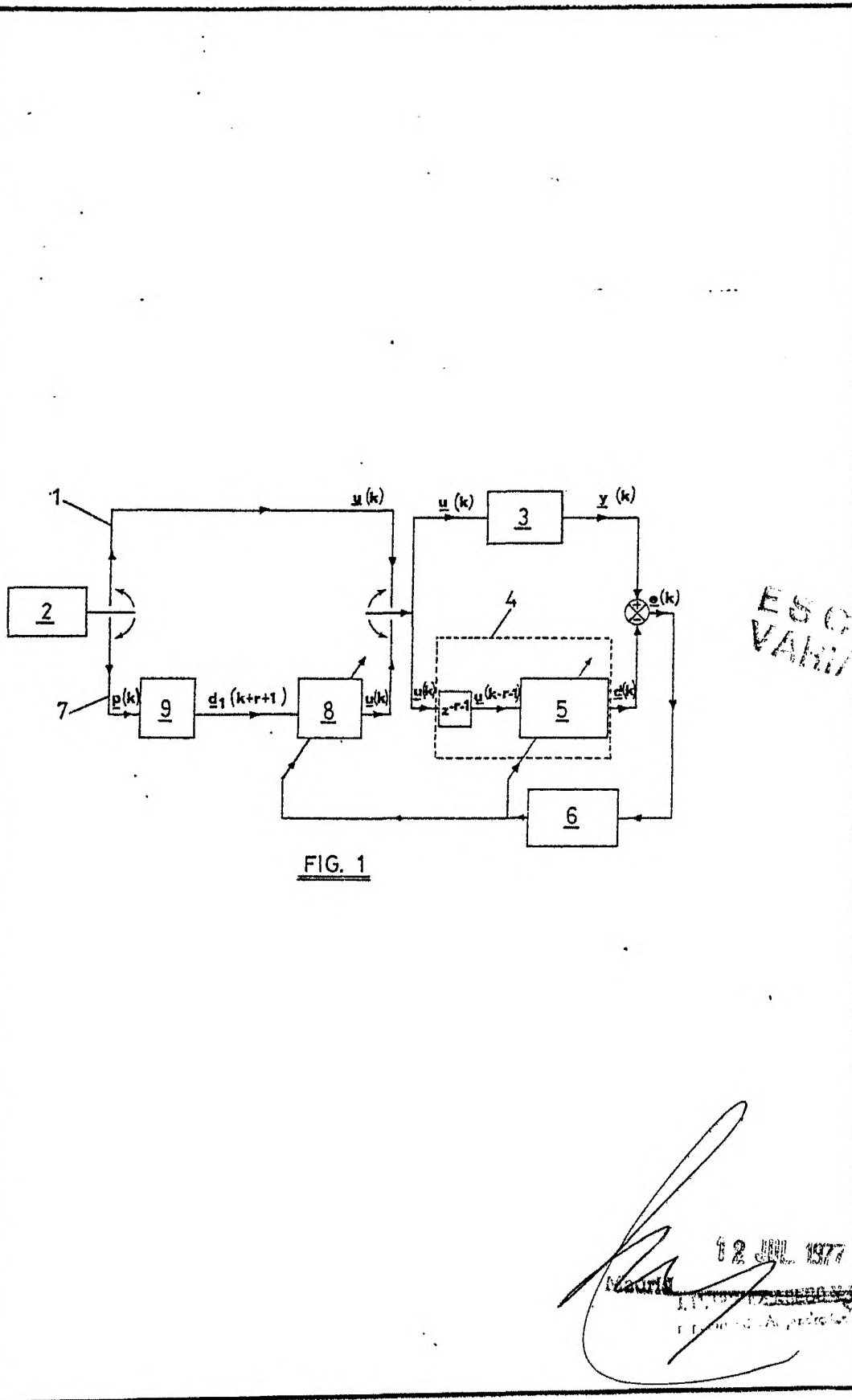
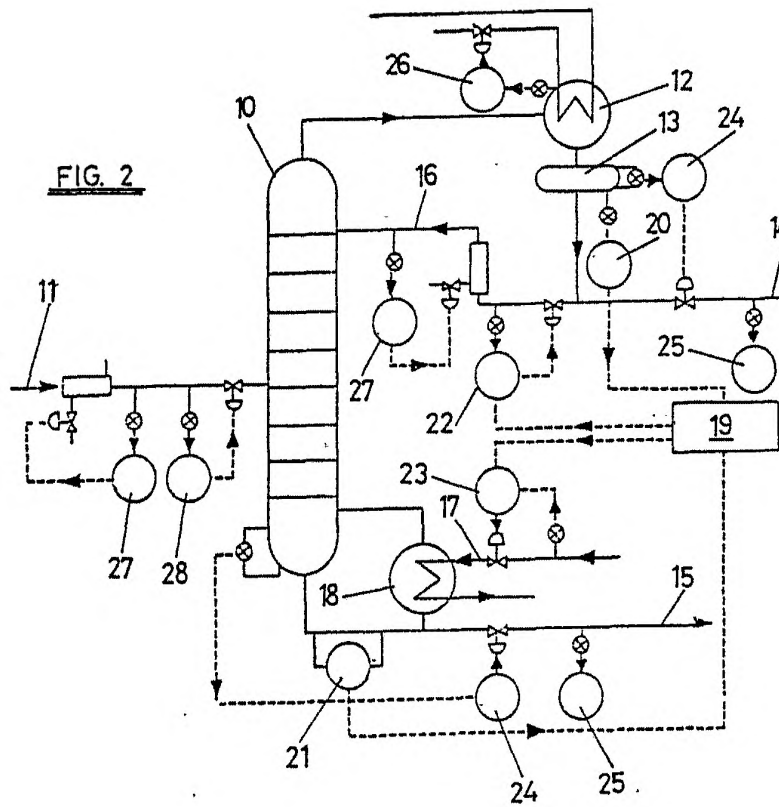


FIG. 1

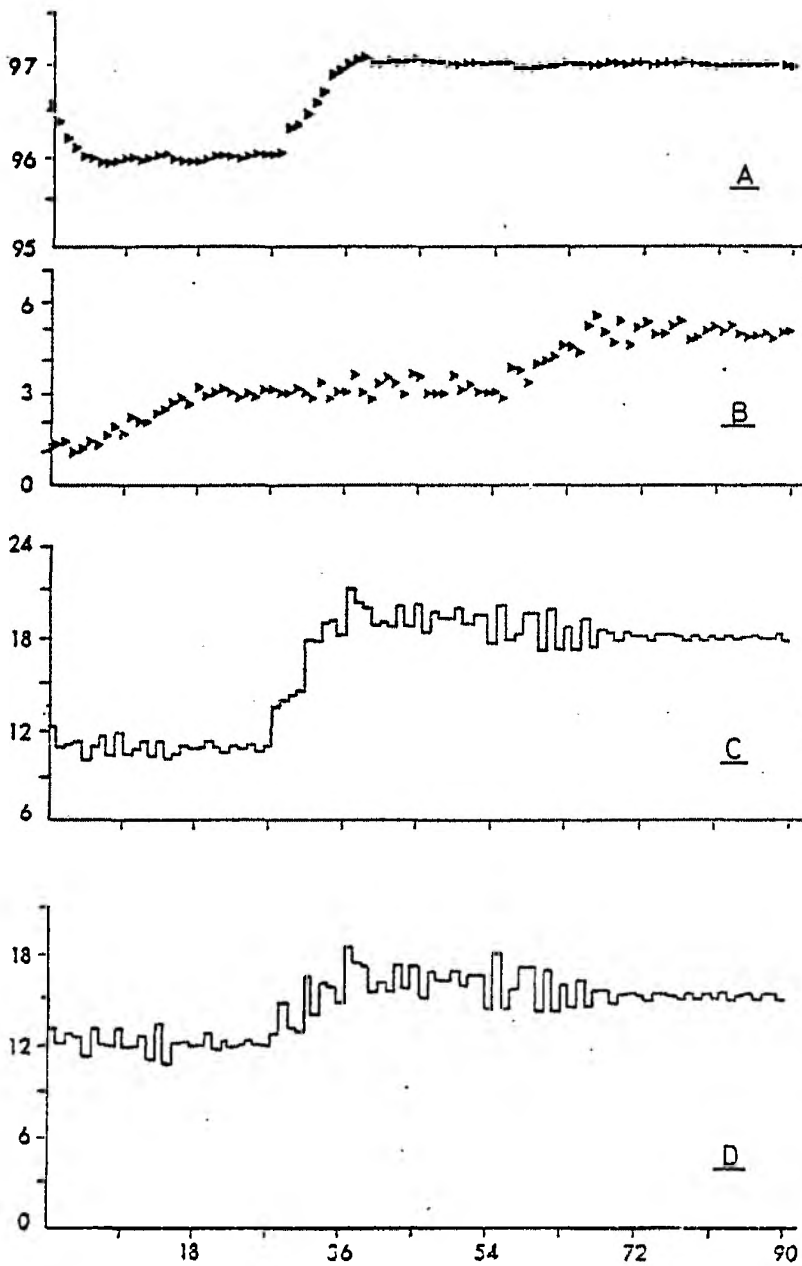
ESCALA  
VARIABLE

12 JUL 1977  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



ESCALA  
VARIABLE

Madrid 12 JUL 1977  
I. M. GONZALEZ ALONSO INGENIERO  
p.p. Firmador: Alonzo, etc. C. 100154



ESCALA VARIABLE

FIG. 3

Madrid, 1975  
F. M. GÓMEZ ACEDO Y PUMBO  
p.p. Firmado: Alejandro Calle López