



(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 292 907**

(51) Int. Cl.:

H03K 3/00 (2006.01)

H03K 3/84 (2006.01)

G01R 31/28 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Número de solicitud europea: **03255190 .5**

(86) Fecha de presentación : **21.08.2003**

(87) Número de publicación de la solicitud: **1391990**

(87) Fecha de publicación de la solicitud: **25.02.2004**

(54) Título: **Método y aparato para producir señales de perturbación.**

(30) Prioridad: **22.08.2002 US 225675**

(45) Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.03.2008

(45) Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.03.2008

(73) Titular/es: **AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, Inc.**
7201 Hamilton Boulevard
Allentown, Pennsylvania 18195-1501, US

(72) Inventor/es: **Kothare, Simone L. y**
Mandler, Jorge Anibal

(74) Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y aparato para producir señales de perturbación.

La presente invención se refiere a un método y un aparato para producir señales de perturbación.

En una realización, la presente invención se refiere a un método y un aparato para el ensayo de bucle abierto y la identificación de sistemas para generar modelos de un sistema para el control basado en el modelo del sistema. En una realización, la presente invención se refiere a un método de identificación de sistemas de una naturaleza multivariable que usa señales de multifrecuencia binarias amigables para la instalación en combinación con técnicas de modelación paramétricas multivariable, para conseguir economías de tiempo significativas en el tiempo de ensayo.

Un método de caracterización de la dinámica de un sistema consiste en aplicar señales de perturbación en los canales de entrada y medir la respuesta del sistema a estas señales. Las señales de entrada y salida se procesan entonces para que proporcionen una estimación de la dinámica del sistema. El procedimiento es conocido como de identificación de sistemas.

En gran parte de la literatura y la técnica anterior sobre identificación de sistemas, se ha puesto poca atención en el diseño de la propia señal de perturbación, aparte del hecho de que las señales deben ser persistentemente excitantes. En el caso de sistemas lineales, esto significa que la señal debe extenderse adecuadamente puentando el ancho de banda del sistema que se identifica. Una de las razones principales para esta falta de atención ha sido un énfasis en la literatura sobre técnicas de identificación de sistemas para modelos paramétricos (por ejemplo, una suma de funciones exponenciales es adecuada para una respuesta escalonada, una función de transferencia discreta o continua, una representación espacial de estado, etc.). El foco principal han sido modelos de función de transferencia discreta de sistemas invariantes de tiempo, lineales, de entrada única, salida única (SISO). Bajo estas circunstancias, no hay usualmente mucho que se pueda escoger entre diferentes diseños de señales de perturbación. No obstante, esta es una situación bastante idealizada en muchas aplicaciones y, en la práctica, existen muchas posibilidades de diseño de la señal.

Por ejemplo, el requisito teórico de una excitación persistente en las señales de entrada coincide a menudo con consideraciones prácticas “amigables para la instalación”. Para que sea amigable para la instalación, es conveniente que una señal de entrada: sea tan corta como es posible; no requiera accionadores para limitar o superar las restricciones de tamaño; y que origine la mínima perturbación en las variables controladas (es decir, baja variancia y pequeñas desviaciones del punto establecido). Por lo tanto, es conveniente diseñar una señal que proporcione un compromiso razonable entre estar excitada persistentemente y ser amigable para la instalación.

Una cuestión importante en la mayoría de las aplicaciones industriales es saber si estas pueden ser señales y técnicas que minimicen el tiempo consumido en la recogida de datos para la identificación del sistema. Cuando se identifica un sistema de múltiples entradas múltiples salidas (MIMO), es deseable también obtener varias señales no correlacionadas estadísticamente, facilitando de ese modo la separación de las diversas relaciones de entrada/salida del sistema. Asimismo, cuando el propósito del ejercicio de identificación del sistema es obtener un modelo para un controlador basado en el modelo, es conveniente identificar la región de frecuencias más adecuada para el funcionamiento de bucle cerrado y las señales de perturbación de diseño para excitar el sistema principalmente en esta región.

Considerando la identificación en el dominio del tiempo, el uso de las señales escalonadas es una práctica común. En adición, un trabajo importante aparece en los años 1960 y 1970, y se usan señales obtenidas a partir de las señales pseudo aleatorias (es decir, señales determinísticas con propiedades similares a las de las señales aleatorias) basadas en secuencias de registro de desplazamientos.

La facilidad de generar señales basadas en secuencias binarias de longitud máxima usando circuitos de registros de desplazamiento ha originado que estas sean usadas en un amplio abanico de aplicaciones. Otros tipos de señales periódicas han encontrado poca aplicación porque no pueden ser generadas fácilmente usando circuitos de registros de desplazamiento. Estas son denominadas señales pseudoaleatorias multinivel (conocidas también como señales m). Asimismo, en el dominio del tiempo, el uso de señales no periódicas y la correlación no periódica ha sido investigada en el área de las comunicaciones durante al menos los últimos años.

Considerando la identificación de dominio de la frecuencia, Señales de Perturbación para la Identificación de Sistemas editado por Keith Godfrey (1994) es una referencia que aporta una cantidad significativa de material sobre el tema. No obstante, no hay ejemplos en los que modelos obtenidos con diferentes señales de entrada sean comparados y las intensidades y debilidades de los diferentes diseños de las señales de perturbación son puestas de manifiesto. No obstante, el libro es todavía útil pues muestra al lector la diversidad de opciones de diseño de señales de perturbación disponibles en la literatura.

Sobre la cuestión de la identificación del sistema para el control basado en el modelo y, más concretamente, el control predictivo del modelo (MPC), ha surgido interés recientemente en la comunidad de control automático. El ensayo escalonado se adopta a menudo en la recogida de datos para el modelado de MPC.

El ensayo escalonado supone que solamente un canal de entrada se mueve en un instante dado. Cada movimiento escalonado es mantenido durante un periodo de tiempo relativamente largo. A menudo, cada movimiento de entrada es mantenido durante un valor medio de la mitad del tiempo de establecimiento del procedimiento y una serie de 15-20 movimientos puede ser ejecutada para cada entrada. En términos de sus características de frecuencia, señales escalonadas tienden a resaltar el comportamiento de estado uniforme y no se enfocan, por lo tanto, sobre el compartimento (más rápido) de bucle cerrado. Esto significa que puede ser obtenido un modelo con malas propiedades dinámicas. La estimación de tiempo de ensayo de la planta para el ensayo T_{test} de MPC (Control Predictivo de Modelo), puede llegar a ser prohibitivamente larga para sistemas con largo tiempo de establecimiento del procedimiento y/o gran número de variables independientes. Por ejemplo, en un procedimiento de separación de aire típico, T_{test} puede fácilmente variar entre 1 y 2 meses dependiendo de las características de procedimiento particulares. El tiempo de ensayo de la instalación excesivo se transforma a menudo en proyectos de MPC práctica y económicamente irrealizables.

La razón principal para este largo periodo de ensayo es el hecho de que el ensayo escalonado acentúa el comportamiento de la baja frecuencia, y el estado de uniformidad, del procedimiento. Esto se transforma en movimientos escalonados de larga duración. No obstante, con el propósito de controlar el procedimiento, la información de procedimiento en el ancho de banda del bucle cerrado es la información más importante para controlar satisfactoriamente el funcionamiento. La diferencia entre las anchuras de banda de bucle cerrado y bucle abierto incrementa la rapidez con la que el controlador devuelve el bucle cerrado en comparación con la respuesta del bucle abierto.

Por tanto, pueden obtenerse economías en el tiempo de ensayo de planta y mejores modelos para el control enfocando los modelos para un comportamiento del controlador satisfactorio, en oposición a los modelos obtenidos con el propósito de vencer por medio de una percepción física dentro del procedimiento dado. Esta realización ha sido explotada en la realización preferida de la presente invención con la reducción del tiempo de ensayo.

El gran número de movimientos escalonados usados a menudo en el ensayo escalonado puede originar también el alargamiento de un ensayo de planta. Un gran número de movimientos escalonados se desea generalmente para minimizar los efectos del ruido sobre los datos, especialmente cuando una gran relación de señal a ruido (S/N) no es posible durante el ensayo. Además, perturbaciones no medidas, cambios ambientales, o cambios en el modo de funcionamiento durante un ensayo pueden originar que una o más respuestas de salida se desplacen. Ese desplazamiento de las respuestas de salida puede requerir una acción correctora que, a su vez, puede conducir a una correlación no deseada entre los canales de entrada. Esto significa que, más adelante en la recogida de datos, es necesario un conjunto de datos sin correlación entre los canales de entrada implicados. Expuesto con otras palabras, han de ser recogidos más datos.

La técnica expuesta de reducir el tiempo de ensayo de la instalación, al mismo tiempo que se extrae información importante para el control del procedimiento de una manera amigable para la instalación y sin comprometer (y posiblemente mejorar) la calidad de los modelos obtenidos, es un desafío. Este es el enfoque de una realización de la presente invención, que proporciona un método de producción de señales de perturbación que puede ser adaptado para excitar un número predeterminado de variables de entrada de un sistema, para ensayar ese sistema con el propósito de obtener modelos para la síntesis de un controlador basado en el modelo, comprendiendo el método las operaciones de:

a) proporcionar parámetros de entrada del sistema;

b) generar una pluralidad de señales de multifrecuencia binarias (BMF) basadas en los parámetros de entrada;

c) calcular el espectro de frecuencias de las señales BMF generadas en la operación (b);

d) seleccionar una de las señales BMF del conjunto de señales BMF de la operación (b), cuyo espectro de frecuencias se selecciona de modo que coincida estrechamente con un espectro de frecuencias deseado especificado por los parámetros de entrada;

e) usar la señal de BMF seleccionada de la operación (d) como una primera señal de perturbación para ensayar el sistema; y

f) desplazar la señal BMF seleccionada de la operación (d) un tiempo de retardo de las muestras para crear una copia retardada de la señal de BMF seleccionada en la operación (e) para que sea usada como una segunda señal de perturbación para ensayar el sistema.

La presente invención proporciona también un aparato correspondiente.

Realizaciones de la presente invención se describirán a continuación a modo de ejemplo con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

la Figura 1A es un gráfico que ilustra una señal de BMF a modo de ejemplo;

la Figura 1B es un gráfico que ilustra el espectro de frecuencias de la señal de BMF a modo de ejemplo de la Figura 1A por medio de un conjunto especificado de armónicos en una ventana de frecuencias seleccionada;

ES 2 292 907 T3

la Figura 2A es un gráfico que ilustra la función de autocorrelación (ACF) de la señal de BMF a modo de ejemplo de la Figura 1A;

las Figuras 2B, 2C y 2D son gráficos que ilustran la función de correlación transversal (CCF) de la señal de BMF a modo de ejemplo de la Figura 1A con una copia retardada de la misma;

la Figura 3 es una vista general de un diagrama de bloques de un ensayo rápido de la planta a modo de ejemplo;

la Figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo de generación de un conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente;

la Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo de generación de un conjunto de señales de perturbación de BMF amigables para la planta;

la Figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo alternativo para generar un conjunto de señales de perturbación de BMF amigables para la planta;

la Figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo para generar un conjunto de señales de perturbación amigables para la planta, casi no correlacionadas estocásticamente;

la Figura 8 es un gráfico de señales de ensayo de salida a modo de ejemplo que ilustra los criterios de amigabilidad de la planta que se juzgan;

la Figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo de generación de un conjunto de señales de perturbación de BMF amigables para la planta casi no correlacionadas estocásticamente;

la Figura 10 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo de análisis de datos de un ensayo de la planta; y

la Figura 11 es un conjunto de gráficos que ilustran un modelo de matriz a modo de ejemplo de la planta para el control basado de modelo.

En una realización, la presente invención implica el diseño de un ensayo de planta rápido para obtener un modelo de sistema para el control basado en el modelo de un sistema, tal como una unidad de separación de aire (ASU), una planta de monóxido de carbono e hidrógeno (HyCO), o una planta de licuefacción de gas natural (LNG) que tenga múltiples canales de entrada (manipulados) y múltiples canales de salida (controlados). Un sistema a modo de ejemplo se muestra como la planta 320 en la Figura 3. Se ha de entender que otras plantas químicas, tales como plantas petroquímicas, u otros sistemas complejos, que incluyan sistemas electrónicos y mecánicos, pueden ser accionados convenientemente por medio de un controlador basado en un modelo pueden ser ensayados también de acuerdo con realizaciones de la presente invención.

Una importante consideración en ese tipo de ensayo es la generación de señales de perturbación usadas para ensayar la respuesta del sistema a la perturbación de sus niveles de entrada. Señales de Perturbación para la Identificación de Sistemas, editada por K. Godfrey, Prentice Hall International, Ltd., 1994, proporciona un conocimiento general sobre el diseño de señales de perturbación para desarrollar modelos basados en los datos de la planta y se incorpora en esta memoria por su referencia.

Preferiblemente, las señales de perturbación deben ser excitadas persistentemente en el sistema para ayudar a disminuir el tiempo necesario para realizar el ensayo del sistema. Otra consideración es que la amplitud de la señal debe ser convenientemente grande para que proporcione una relación (S/N) de señal a ruido suficiente para que la respuesta del sistema sea determinada de la salida. Las amplitudes de la señal no deben ser preferiblemente tan grandes que originen niveles de salida que sobrepasen límites aceptables. Adicionalmente en un ensayo de planta multivariable, la interacción entre la perturbación simultánea de diversos canales de entrada puede afectar a los niveles de salida. Esto significa que para ayudar a garantizar un ensayo amigable para la planta, en el que los niveles de salida permanezcan dentro de límites aceptables, puede ser conveniente detectar las señales de perturbación potenciales sobre un modelo simplificado de la planta antes del ensayo real.

Asimismo, es conveniente para las diversas señales de perturbación que sustancialmente no estén correlacionadas estocásticamente unas con respecto a otras, permitiendo de ese modo análisis más simples y potencialmente más precisos de los datos de ensayo. Adicionalmente, es conveniente para la señal de perturbación puentear al ancho de banda del sistema que se ensaya. También es conveniente para la potencia de las señales de perturbación que estén concentradas y bien distribuidas dentro de la ventana de frecuencias del sistema.

Señales de Multifrecuencia Binarias

Unas señales, a modo de ejemplo, que pueden ser usadas como señales de perturbación, son las señales de multifrecuencia binarias (BMF). La creación de señales BMF fue primero descrita por A. Van den Bos en Construcción de Señales de Ensayo de Multifrecuencia Binarias en el primer Symposium IFAC sobre Identificación en Sistemas de

Control Automático, Praga (1967). Van den Bos, con R.G. Krol, presentaron además diseños de señales de BMF en Síntesis de Señales Binarias de Intervalo Discreto con Espectro de Amplitud de Fourier Especificado, International Journal de Control, 30 (1970), el cual permite que las señales BMF sean creadas con espectro de frecuencias especificado de usuario por medio de un cierto número de armónicos. M.R. Buckner y T.W. Kerlin examinaron también
 5 diseños para señales de BMF en Señales Binarias Óptimas para Mediciones de Respuesta de Frecuencia de Reactor, Nuclear Science and Engineering, 49 (1972). Buckner y Kerlin fueron capaces de crear dos señales de BMT no correlacionadas generando una señal de BMF basada en armónicos pares solamente y una señal de BMF basada en armónicos impares solamente. Usando esta solución solamente dos señales de BMF no correlacionadas estocásticamente pueden ser generadas.

10 La Figura 1A es una amplitud en función del número de intervalos de conmutación que ilustra una señal de BMF a modo de ejemplo. El gráfico muestra un periodo de esta señal periódica. La señal varía entre el nivel 100 superior y el nivel inferior 102. En el gráfico a modo de ejemplo de la Figura 1A la señal de BMF se muestra centrada sobre
 15 alrededor de cero con una amplitud de una unidad arbitraria. Ese tipo de señal de BMF a modo de ejemplo puede ser usado como una señal de perturbación durante un ensayo de la planta para determinar la respuesta de un sistema a perturbaciones, tales como un ensayo de la planta para el control basado en un modelo. Durante un ensayo rápido de la planta, a modo de ejemplo, la señal de BMF puede estar centrada sobre un nivel de entrada inicial predeterminado y la amplitud puede ser ajustada convenientemente para que proporcione una señal de perturbación de excitación máxima, mientras mantiene un funcionamiento amigable para la planta.

20 El ancho de banda puentado por una señal de BMF puede ser en gran parte determinado por dos parámetros, el instante de conmutación y el periodo. Estos parámetros pueden ser determinados a partir de la respuesta anticipada del sistema basada en el estudio previo (tal como una simulación dinámica del sistema, por ejemplo), observaciones de la planta de datos empíricos recogidos con anterioridad para el ensayo de la planta o la experiencia con plantas similares.
 25 El tiempo, T_{sw} de conmutación, de la señal de BMF (es decir, el tiempo mínimo entre cambios de nivel) está basado en la constante de tiempo del bucle abierto dominante, τ_{dom} , del sistema que ha de ser ensayado y no debe ser más larga que $\pi\tau_{dom}$. La respuesta convenientemente más rápida del sistema durante el funcionamiento del bucle cerrado puede acortar T_{sw} . La reducción de T_{sw} puede a menudo estar afectada por un factor 2 ó 3, pero este factor puede ser incluso mayor si se desea un control de realimentación agresivo y se juzga que puede conseguirse.

30 La longitud de un periodo, P , de señal de BMF, está basada en el tiempo, T_{ss} , de establecimiento estimado del sistema que se ha de ensayar y el tiempo de conmutación. Para un sistema de primer orden, $\tau_{dom} = T_{ss}/5 = T_{99\%}/5$, $\tau_{dom} = T_{97\%}/4$ y $\tau_{dom} = T_{99\%}/3$ (donde $T_{n\%}$ representa el tiempo que requiere capturar el $n\%$ de la respuesta del sistema). Estas relaciones pueden ser extendidas para los sistemas de orden superior. Para puentear completamente los armónicos de
 35 la ventana de frecuencias deseada del sistema de bucle abierto, P es convenientemente al menos de $2\pi T_{ss}$. En la situación en que solamente se desea la información con respecto a las frecuencias importantes de control, el tiempo T_{eff} de establecimiento se sustituye en la ecuación por el periodo de la señal, y por tanto el periodo de BMF puede ser acortado, a menudo por un factor de 0,8 ó 0,6. Asimismo, el número total de veces, N , que conmuta, en un periodo de la señal de BMF único debe ser un entero. N es seleccionado típicamente como un número par para garantizar una
 40 señal de BMF con valor medio cero, pero ese tipo de selección no es necesaria. Además puede ser preferible que N sea una potencia de dos para garantizar que no hay fuga espectral durante el tratamiento de señales de la transformación rápida de Fourier, que se usa a menudo como parte del análisis de datos de ensayo. La señal de BMF a modo de ejemplo en la Figura 1A incluye 32 unidades de T_{sw} .

45 Las señales de BMF son generadas como señales de dominio de la frecuencia. Por lo tanto, el uso de señales de BMF puede permitir un control más preciso sobre el espectro de frecuencias de las señales de perturbación en comparación con otras clases, a modo de ejemplo, de señales de perturbación, tales como señales pseudoaleatorias multinivel o PRBS. Paquetes de software matemáticos, tales como MATLAB®, incluyen algoritmos que pueden ser
 50 usados para generar señales de BMF. La ventana de frecuencias deseada y el espectro de frecuencias para una señal de BMF a modo de ejemplo pueden ser especificados durante la generación de la señal de BMF. Aunque el espectro de frecuencias sobre los armónicos especificados puede ser razonablemente bien controlado mediante esta especificación, puede no proporcionar una concentración conveniente de la potencia de señales de BMF dentro de la ventana de frecuencia especificada.

55 La Figura 1B ilustra el espectro 104 de frecuencias de la señal de BMF a modo de ejemplo de la Figura 1A a través de una ventana de frecuencias de dieciséis armónicos. Un espectro 106 de frecuencias deseado a modo de ejemplo usado para generar las señales de BMF se proporciona para referencia. En un procedimiento de selección de la señal de perturbación a modo de ejemplo, un cierto número de espectros de frecuencia de señales BMF pueden ser comparados
 60 con el espectro de frecuencias de señales deseado. La selección de una señal de BMF particular puede estar basada en un valor medio ponderado de cualquiera de las diferencias absolutas o las diferencias cuadráticas entre la contribución de las señales de BMF en cada armónico y la contribución deseada.

La Figura 2A es un gráfico de la función de autocorrelación periódica (ACF) de la señal de BMF ilustrada a modo de ejemplo en la Figura 1A. Se ha de tener en cuenta que la ACF para las señales de BMF puede ser seleccionada
 65 convenientemente para que no estén polarizadas y relativamente cerca de cero durante un periodo, P , de la señal, como en este ejemplo. Generalmente la relación entre el valor de pico y el valor intermedio más alto es convenientemente mayor que 5:1 para garantizar una falta significativa de correlación entre los canales de entrada durante un tiempo de establecimiento eficaz.

Las Figuras 2B-D son gráficos de la función (CCF) de correlación transversal entre la señal de BMF a modo de ejemplo de la Figura 1A y copias retardadas de la misma. Estos gráficos parecen necesariamente ser similares al gráfico de ACF de la Figura 2A, a excepción de un retardo. La CCF en la Figura 2B corresponde al gráfico de ACF que está retardado para que empiece en el punto 200 en la Figura 2A. Las CCF's en las Figuras 2C y 2D están retardadas para que correspondan a gráficos que empiezan en los puntos 202 y 204, respectivamente. Por lo tanto las CCF's entre una señal de BMF a modo de ejemplo y copias retardadas de la misma pueden ser seleccionadas de modo que no estén polarizadas y próximas a cero durante el tiempo de retardo. Un conjunto a modo de ejemplo de señales de BMF retardadas puede ser creado, estando retardada cada una de ellas una cantidad establecida a partir de la señal previa en el conjunto. Esto significa que es posible crear un conjunto de señales no correlacionadas casi estocásticamente, retardando la señal de BMF.

En un ensayo a modo de ejemplo de las respuestas del sistema es conveniente que cada señal de perturbación de BMF sucesiva sea generada retardando la señal previa al menos T_{eff} (es decir, tiempo suficiente para que las respuestas del sistema se hayan establecido sustancialmente dentro de la escala de tiempos apropiada antes de que la correlación transversal entre cualquiera de las señales llegue a ser significativa). Si el retardo mínimo entre cualquier par de señales es mayor que T_{eff} , entonces la porción inicial de la CCF, para periodos de tiempo menores que T_{eff} , entre cualquier par de señales de BMF en el ejemplo establecido puede ser centrada y casi cero. También es conveniente para un periodo de las señales de BMF que sea al menos tan largo como el máximo retardo de cualquier señal de perturbación con respecto a cualquier otra señal de perturbación en el conjunto más T_{eff} .

Puesto que la CCF entre cualquier par de estas señales de perturbación de entrada en el conjunto pueden ser desactivada a voluntad y puesta a cero durante al menos un tiempo de establecimiento eficaz, la desconvolución de las relaciones de entrada/salida (I/O) usadas para estimar la dinámica del procedimiento se simplifica grandemente.

La relación entre el retardo máximo deseado entre cualquier par de señales de perturbación y el periodo de las señales de perturbación puede imponer una condición adicional en el periodo de la señal de BMF mínimo. Por ejemplo, si el número de canales, m , de entrada es mayor que seis, entonces el periodo mínimo de la perturbación de BMF puede ser convenientemente aumentado a mT_{eff} .

Se ha de tener en cuenta también que, puesto que T_{eff} representa durante cuanto tiempo el sistema puede continuar para responder a la excitación de la señal de entrada dentro de la escala de tiempo pertinente de control, es conveniente que los datos de salida obtenidos durante el primer T_{eff} del ensayo sean descartados y no usados para el análisis de los datos de ensayo y que el ensayo se extienda al menos un periodo de tiempo de establecimiento eficaz más allá de un único periodo, P , de señal de BMF. Por lo tanto, la duración mínima deseada de un ensayo, t_{test} , a modo de ejemplo, de un sistema de entrada múltiple que usa señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente puede ser dada por la Ecuación 1:

$$t_{\text{test}} = P + T_{\text{eff}} = (2\pi + 1)T_{\text{eff}}, \text{ para } m \leq 6$$

$$t_{\text{test}} = P + T_{\text{eff}} = (m + 1)T_{\text{eff}}, \text{ para } m > 6 \quad \text{Ecuación 1}$$

Puesto que T_{eff} está basado en el tiempo de establecimiento más largo del sistema y las características a largo plazo de las respuestas del procedimiento pueden no ser apropiadas para el control, pueden ser posibles ensayos más cortos. Ensayos más largos pueden ser usados para incrementar la relación S/N, y mejorar convenientemente los resultados del ensayo, especialmente en el caso de señales de salida muy ruidosas debidas al ruido de sensor o procedimiento.

Resumen

La Figura 3 es un diagrama de bloques que proporciona una visión general de alto nivel de un procedimiento de ensayo de la planta a modo de ejemplo para generar un modelo de la planta para el control basado en el modelo. Aunque el diagrama de bloques de la Figura 3 describe una realización del procedimiento de ensayo que utiliza señales de perturbación de BMF, se contempla que otras señales multivariable, tales como señales binarias pseudoaleatorias, señales aleatorias multinivel, o sinusoides en fase de Schroeder, puedan ser usadas como señales de perturbación en vez de las anteriores. Las Señales de perturbación para la identificación del Sistema describen diseños posibles para las señales pseudoaleatorias multinivel y binarias pseudoaleatorias. Directrices para el diseño de múltiples sinusoides en fase de Schroeder no correlacionadas fueron descritas por D.E. Rivera en las notas del corto curso, Principios de Identificación de Sistemas (1999), en la Universidad de Estado de Arizona, incorporadas aquí por su referencia.

La señal 304 de BMF madre es generada por la rutina 302 de generación de la señal, usando parámetros estimados 300. Los parámetros estimados pueden estar basados en observaciones empíricas de la planta 320, como se muestra. Los parámetros estimados 300 pueden ser obtenidos también a partir de una simulación dinámica de la planta (si existe una) o de la experiencia basada en otras plantas de una naturaleza similar. Es conveniente que cierto número de señales de BMF sea generado por la rutina 302 de generación de señales de BMF y luego una señal 304 de BMF madre es seleccionada de este grupo de señales de perturbación de BMF de prospección. La selección de la señal 304 de BMF de madre se basa convenientemente en parámetros estimados 300 y se examina con mayor detalle con respecto a la Figura 4, más adelante.

La señal 304 de BMF madre seleccionada se usa para generar señales 308 de BMF retardadas, no correlacionadas estocásticamente. Un método a modo de ejemplo de generación de estas señales de BMF retardadas consiste en usar el multiplexor con separadores 306 de retardo. La señal de BMF madre se repite un cierto número de veces. Todas las señales originadas menos una son cargadas entonces dentro de los separadores de retardo. Cada separador de retardo deberá retardar la señal un tiempo predeterminado, preferiblemente $1 T_{\text{eff}}$ en el primer separados, $2 T_{\text{eff}}$ en el segundo separador, etc. El tiempo de retardo predeterminado es preferiblemente un número entero de muestras, o de tiempos de conmutación para simplificar y mejorar la precisión de los análisis del ensayo, pero la cantidad de muestras de retardo puede no ser un entero. Que es naturalmente equivalente a usar un tiempo de muestreo modificado cuyo tiempo de retardo es un múltiplo entero. Seleccionando un tiempo de muestreo que satisfaga esta condición y usando este para muestrear tanto las señales de entrada como de salida durante el ensayo de la planta es importante evitar seudónimos. Alternativamente, otros métodos, tales como un programa de software ejecutado por un ordenador de propósito general o un procedimiento de retardo iterativo en el que la señal de perturbación generada más recientemente es copiada y retardada una cantidad establecida para generar la señal de perturbación siguiente, puede ser usada para generar las señales 308 de BMF retardadas.

En la Figura 3, se muestran dos señales 308 de BMF retardadas, que proporcionan señales de perturbación para una planta que tiene tres canales de entrada. El ejemplo de tres canales de entrada es solamente para facilitar la ilustración. El número de canales de entrada se determina preferiblemente por el alcance del controlador basado en el modelo. Los canales de entrada adicionales pueden incrementar la complejidad del procedimiento 324 de análisis de los datos de ensayo de la planta, y pueden incrementar el tiempo mínimo de ensayo como se describe anteriormente en la Ecuación 1. En un ejemplo de una instalación de separación de aire, el número de canales de entrada puede estar comprendido entre ocho y diez. Incluso puede usarse un mayor número de canales de entrada, que depende del alcance del controlador basado en el modelo.

Una vez que se generan suficientes señales de perturbación, estas señales son asignadas a los canales de entrada y se seleccionan las amplitudes de las señales de entrada estimadas iniciales. Las señales de perturbación se ensayan entonces como entradas para el modelo simplificado de la planta 310. El modelo simplificado de la planta 310 está basado convenientemente en un conocimiento *a priori* acerca de la planta 320, como se muestra. Este conocimiento *a priori* de la planta puede incluir: datos de la planta; una simulación dinámica de la planta; y un conocimiento del funcionamiento/ingeniería de la planta. Adicionalmente, criterios amigables para la planta pueden ser desarrollados a partir de este conocimiento previo. El desarrollo del modelo simplificado de la planta 310 se describe detalladamente más adelante con respecto a las Figuras 6 y 7.

El modelo simplificado de la planta 310 genera señales 312 de salida estimadas, que corresponden a las señales 322 de salida de la planta. El número de canales de salida se determina preferiblemente por el alcance del controlador basado en el modelo. En la vista general a modo de ejemplo de la Figura 3, se muestran dos señales 322 de salida de la planta, y dos señales 312 de salida estimadas correspondientes. La selección de dos canales de salida es solamente para propósitos ilustrativos. El número de canales de salida puede estar comprendido, por ejemplo, entre 20 y 25 para una planta de separación de aire, pero puede haber incluso un mayor número de canales de salida si se desea. Los canales de salida adicionales pueden incrementar la complejidad y duración del procedimiento 324 de análisis de los datos.

El uso del modelo simplificado de la planta 310 atiende convenientemente dos funciones, ayudando a garantizar la funcionalidad de la planta del ensayo y ayudando a alcanzar la excitación máxima del sistema durante el ensayo. La amigabilidad de la planta es una consideración importante para un ensayo de la planta. Si la salida de la planta ha sido forzada más allá de ciertos niveles mediante señales de entrada de perturbación no amigables para la planta durante un ensayo de la planta, la seguridad y/o las limitaciones de especificación de productos pueden ser violadas. Por lo tanto, es conveniente garantizar que un ensayo de planta propuesto es amigable para la planta antes del ensayo de planta real. El hecho de no ser amigable para la planta puede tener distintas causas, incluyendo una señal de perturbación de entrada con una amplitud demasiado grande, o interacciones entre las señales de perturbación que excitan dos o más canales. Los criterios de amigabilidad de la planta pueden ser establecidos por señales 312 de salida estimadas de modelo simplificado de la planta 310, como se ilustra mediante líneas de trazos en los gráficos de señales 312 de salida estimadas. Mientras las señales 312 de salida estimadas permanecen dentro de estos criterios, el ensayo de la planta a modo de ejemplo resultante es probable que sea amigable para la planta.

Es posible que las amplitudes de las señales de perturbación de entrada sean establecidas suficientemente pequeñas para que la amigabilidad de la planta sea sustancialmente garantizada, pues ese tipo de ensayo no excita significativamente el sistema. Mayor excitación del sistema durante el ensayo es conveniente para incrementar la relación S/N (señal a ruido) en los canales de salida, simplificando de ese modo el análisis de los resultados del ensayo. Usando el modelo simplificado de la planta 310 para evaluar el ensayo de planta propuesto, puede ser determinada la excitación del sistema. Cuanto más alta sea la relación S/N, menor será el número de ciclos de ensayo que puede ser conveniente promediar juntos para obtener un modelo adecuado de control de la planta. Por lo tanto, maximizando S/N se puede disminuir el tiempo requerido para ejecutar el ensayo de la planta de bucle abierto. Se considera que dos o tres ciclos de ensayo pueden ser convenientes para ayudar a reducir el efecto del ruido sobre el análisis de los datos que se ensayan dependiendo del grado de ruido hallado en las señales de salida.

En el modo de simulación, la simulación o el programa 314 de optimización determinan si cualquiera de las señales 312 de salida estimadas ha excedido los criterios de amigabilidad de la planta. Las señales 312 de salida estimadas

pueden ser vigiladas para determinar la excitación del sistema prevista y, por lo tanto, la amigabilidad de la planta estimada de un conjunto particular de señales de perturbación de entrada y las amplitudes asignadas. Esto puede implicar un procedimiento iterativo con amplitudes de las señales de perturbación de entrada estimadas y asignaciones 315 que se devuelven al modelo simplificado de la planta 310 y comprobadas. Las señales 312 de salida nuevamente estimadas son analizadas y el procedimiento repetido hasta que se determina una excitación apropiada, establecida de modo amigable para la planta de las señales de perturbación de entrada.

En el modo de optimización, el programa 314 de simulación u optimización puede calcular las amplitudes de las señales de perturbación de entrada óptimas para un conjunto de opciones de asignación de señales de entrada que se proporciona. El modo de optimización de la simulación o el programa 314 de optimización pueden ser una rutina de optimización autocontenida, que determine las amplitudes de la señal de perturbación de entrada y las asignaciones basadas en el modelo simplificado de la planta 310, que puede estar incorporado en la rutina de optimización. Por tanto, la optimización puede ser un procedimiento de la operación uno.

Una vez que las amplitudes y las asignaciones deseadas de las señales 318 de perturbación de entrada han sido determinadas, los datos que representan las amplitudes y las asignaciones de las señales de perturbación de entrada son suministrados a los generadores 316 de señales sobre el canal 315 de datos y los datos que representan las formas de las señales, tales como los retardos de tiempo entre niveles binarios, son suministrados a los generadores 316 de señales sobre el canal 307 de datos. La transferencia de datos en la Figura 3 se caracteriza como la transmisión sobre un canal de datos por facilidad de ilustración, pero se contempla que la transferencia de datos pueda alternativamente ser efectuada por medio de una descarga de ordenador o la transferencia física de dispositivos de memoria tales como una cinta, disco o medio de registro de IC (circuito integrado). La transferencia de datos puede implicar también la introducción de reglajes sobre los generadores de señales manualmente a partir de información transmitida electrónicamente o impresa.

Suponiendo que la planta se hace funcionar aproximadamente a las condiciones de funcionamiento normales en el momento del ensayo de la planta, las señales 318 de perturbación proporcionan datos que representan desviaciones de los valores de la variable de entrada (manipulados) a partir de estas condiciones de funcionamiento normales. Las señales 322 de salida, de los canales controlados de salida, de la planta 320 son medidas mediante sensores dentro de la planta y almacenados para análisis por el procedimiento 324 de análisis de datos de ensayo de la planta.

Los datos que representan señales 318 de perturbación son suministrados al procedimiento 324 de análisis de datos de ensayo de la planta desde los generadores 316 de señales sobre el canal 317 de datos. Convenientemente, usando la entrada física dentro del sistema, los canales de salida pueden ser separados en conjuntos de canales de salida muy interactivos. Los conjuntos de canales de salida muy interactivos contienen señales de salida del sistema que presentan un grado significativo de interdependencia. Los datos de estos canales se analizan preferiblemente juntos usando un método de identificación de subespacios de múltiples entradas/múltiples salidas (MIMO) o un Algoritmo exógeno autorregresivo (ARX). Los datos de los canales de salida que presentan menos interacción con otros canales de salida pueden ser analizados separadamente usando modelos paramétricos más simples de entrada múltiple/salida única (MISO) (espacio de estado, ARX, ARMAX, error de salida, Box-Jenkins, etc.). El uso de estos diversos modelos se describe detalladamente más adelante con respecto a la Figura 10.

Descripción Detallada del Gráfico de Flujo de la Figura 4

La Figura 4 es un gráfico de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMF para ser usadas en un ensayo de planta rápida para crear un modelo de planta para el control basado en el modelo de la planta. Se proporcionan varios parámetros usados para generar las señales, operación 400. Estos parámetros se determinan basándose en el conocimiento "a priori" del sistema que se ha de ensayar. Estos parámetros pueden estar basados en observaciones empíricas del sistema, o, alternativamente pueden ser obtenidos de una simulación dinámica de la planta (si existe alguna) o de la experiencia basada en otras plantas de una naturaleza similar. Para las plantas existentes los datos empíricos deducidos del funcionamiento de la planta son a menudo preferibles, debido a la complejidad de los sistemas considerados generalmente. En el caso de mejora del sistema de control de una planta que ya está en funcionamiento y ha sido sometida a un cierto número de sistemas de control en el pasado, la experiencia de los operadores de la planta y datos de largo plazo de los sistemas de control anteriores pueden proporcionar cantidades significativas de datos empíricos a partir de los cuales pueden ser determinados los parámetros de las señales de perturbación de entrada.

Los parámetros proporcionados en la operación 400 incluyen preferiblemente el tiempo de establecimiento del sistema, una ventana de frecuencia importante de control para las señales de perturbación, y un espectro de frecuencias para las señales de perturbación sobre los armónicos de la ventana de frecuencia seleccionada. El tiempo T_{eff} eficaz de establecimiento se determina, en la operación 42, basándose en las constantes de tiempo de las diversas salidas del sistema y de la agresividad del controlador de control basado en el modelo que está diseñado para el sistema. T_{eff} es la longitud del periodo de tiempo durante el cual un sistema puede todavía ser reactivo con un grado significativo a una perturbación después de haberse producido la perturbación dentro de una escala de tiempo aplicable de control. La clave para determinar T_{eff} está, por lo tanto, sobre la salida del sistema que tiene la constante de tiempo más larga. El tiempo de establecimiento para un bucle abierto, sistema de primer orden puede ser definido como igual a cinco veces la constante de tiempo del procedimiento más larga en el sistema. En un sistema de bucle cerrado, tal como un sistema que funciona bajo un control basado en el modelo, aunque el tiempo de establecimiento puede ser significativamente

más corto que el tiempo de establecimiento del bucle abierto debido al efecto de realimentación desde el controlador, que preferiblemente tiende a restaurar el sistema en el estado de funcionamiento óptimo deseado más rápidamente. El método a modo de ejemplo de la Figura 4 está diseñado para crear un conjunto de señales de perturbación de BMF no correlacionadas casi estocásticamente para ser usado como parte de un ensayo de planta rápido a modo de ejemplo.

5 Puesto que el propósito de este ensayo de la planta a modo de ejemplo es crear un modelo aplicable de control de la planta para el control basado en el modelo, el parámetro de tiempo de establecimiento efectivo determinado en la operación 402 puede ser acortado sustancialmente del tiempo de establecimiento del bucle abierto, dependiendo de la agresividad de la realimentación de control basada en el modelo deseado. En muchos casos T_{eff} puede ser el 60% del tiempo de establecimiento del bucle abierto.

10 Una ventana de frecuencia adecuada de control es también seleccionada, operación 404. Esta ventana de frecuencia es seleccionada convenientemente para puentear las frecuencias pertinentes de control del sistema. La menor frecuencia capturada en esta ventana, v_{low} , de frecuencia es igual a la inversa del periodo de la señal de BMF. El periodo mínimo de la señal, P , de BMF y por consiguiente el máximo de v_{low} está relacionado con T_{eff} como se describe en la

15 Ecuación 1. La frecuencia más alta capturada en esta ventana, v_{high} , de frecuencia está limitado por la frecuencia de Nyquist de la señal de BMF determinada mediante el tiempo, T_{sw} , de conmutación, como se muestra en la Ecuación 2:

$$v_{high} \leq v_{Nyquist} \Rightarrow \frac{\infty}{\tau_{dom}} \leq \frac{\pi}{T_{sw}} \quad \text{Ecuación 2}$$

20 donde ∞ es un factor que representa la velocidad de la respuesta de bucle cerrado como un múltiplo de la respuesta de bucle abierto. ∞ es típicamente 2 ó 3, pero puede ser incluso mayor. El control de realimentación generalmente acorta el tiempo de respuesta del sistema y, por lo tanto, es preferible para v_{high} ser aumentado correspondientemente en comparación con el límite alto en el ancho de banda del sistema de bucle abierto. Este incremento preferible en

25 v_{high} es a menudo de un factor de dos o tres, pero puede ser incluso mayor, dependiendo de la agresividad del control de realimentación deseado y factible.

Después de la selección de la ventana de frecuencias adecuada de control en la operación 404, se selecciona un

30 espectro de frecuencias de la señal de perturbación deseada por medio de armónicos dentro de la ventana de frecuencia, operación 408. La potencia de la señal se distribuye a lo más sobre (N-1) armónicos. Un espectro 106 de frecuencias de la señal de perturbación deseada a modo de ejemplo para N=16 se ilustra en la Figura 1B. La potencia deseada en cada armónico puede estar basada en el conocimiento de la planta empírico que proporciona el interior considerando la importancia de las respuestas anticipadas en ciertos márgenes de frecuencia. El espectro de frecuencias deseado puede

35 tener como objetivo armónicos en un cierto margen, tales como perturbaciones de baja frecuencia, como se muestra en la Figura 1B, o puede distribuir la potencia de la señal de perturbación sustancialmente de modo igual entre todos los armónicos.

Un cierto número de señales de BMF de ensayo es generado, operación 408, usando los parámetros proporcionados en la operación 400. Los paquetes de software matemáticos comerciales, tales como MATLAB®, pueden incluir algoritmos para generar señales de BMF, que pueden ser usados para la operación 408. Alternativamente, se puede escribir un programa de software de propósito especial o un circuito de propósito especial puede ser designado para generar señales de BMF. El número de señales de BMF de ensayo generado puede ser determinado por el usuario, pero puede estar típicamente en el margen de 20 a 50. Cuanto mayor sea el número de señales de BMF de ensayo generado

45 más probable es que sea generada una señal con un espectro de frecuencias que case aproximadamente con el espectro de frecuencias deseado de la operación 406. La generación de un mayor número de señales de BMF de ensayo puede originar también una concordancia final más estrecha para la señal finalmente seleccionada en la operación 416. Alternativamente, las señales de BMF de ensayo pueden ser generadas una cada vez y ensayadas hasta que se encuentre una señal que tenga un espectro de frecuencias que se aproxime suficientemente al espectro de frecuencias deseado de la operación 406.

Los espectros de frecuencia de las señales de BMF de ensayo generados en la operación 408 son calculados, operación 410. Estos espectros son usados para seleccionar una de las señales de BMF de ensayo como una señal de BMF madre para un ensayo de la planta a modo de ejemplo, operación 412. Un método a modo de ejemplo de

55 selección de esta señal de BMF madre basado en maximizar la potencia útil de la señal para un factor de amplitud aceptablemente bajo se muestra en las operaciones 414 y 416 de la Figura 4. Se considera que pueden ser usados también otros métodos de selección de una señal de BMF madre, tales como minimizando el factor de amplitud de la señal para una potencia de señal útil razonablemente alta. La reducción del factor de amplitud tiende a reducir asimismo la potencia útil. Por lo tanto un buen compromiso entre una potencia de señal útil alta y un factor de

60 amplitud bajo es un desafío en el diseño de las señales de BMF. Es conveniente que el factor de amplitud de la señal de perturbación sea todo lo bajo que es posible para maximizar el procedimiento de excitación para una amplitud de señal dada, pero también es conveniente maximizar el porcentaje de potencia útil para evitar desperdiciar potencia de la señal fuera de la ventana de frecuencia de interés y para mejorar la relación S/N de las señales de salida durante el ensayo de la planta. Si el factor de amplitud es minimizado sin tener en cuenta la pérdida de potencia útil, un ensayo

65 que se ejecute durante el mismo tiempo que un ensayo que tenga un mayor porcentaje de potencia útil puede capturar menos información, lo cual puede conducir a modelos menos exactos del sistema. Por lo tanto, puede ser conveniente mantener al menos un porcentaje mínimo de potencia útil (quizás el 90%) cuando se selecciona la señal de BMF madre minimizando el factor de amplitud.

En el método de selección de la señal de BMF madre a modo de ejemplo, el conjunto de señales de BMF de ensayo se reduce a un subconjunto de solamente aquellas señales que tienen el 100% de potencia útil y pueden adicionalmente ser seleccionadas para tener un factor de amplitud mínimo para las semillas aleatorias iniciales. Es típicamente posible seleccionar un cierto número de señales de un conjunto a modo de ejemplo de señales de BMF de ensayo con el 100% de potencia útil y, por lo tanto, el método del ejemplo de la Figura 4 usa un criterio del 100% de potencia útil para la selección en la operación 414, pero se considera que puede ser conveniente seleccionar un subconjunto de señales con potencia útil tan baja como del 90% y luego seleccionar además el subconjunto para factores de amplitud mínimos.

Fuera del subconjunto de las señales de BMF de ensayo que satisfacen el criterio de la operación 414, se selecciona una señal de BMF de madre que mejor case con el espectro de frecuencias deseado de la operación 406. La selección de la señal de BMF madre puede estar basada en un valor medio ponderado de cualquiera de las diferencias absolutas o las diferencias cuadráticas entre la contribución de cada armónico de las señales de BMF de ensayo en el subconjunto de señales seleccionado en la operación 414 y la contribución deseada del espectro de frecuencias deseado de la operación 406.

La señal de BMF madre seleccionada puede ser asignada como la señal de ensayo de perturbación para el primer canal de entrada del sistema que se ensaya, operación 418. Esta asignación inicial puede ser cambiada para mejorar la amigabilidad de la planta del ensayo, como se describe más adelante con referencia a las Figuras 7 y 9.

La señal de BMF madre seleccionada se usa también para generar señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente adicionales para otros canales de entrada, operación 420 en el método a modo de ejemplo de la Figura 4. La primera señal de perturbación adicional en este método a modo de ejemplo puede ser generada retardando la señal de BMF madre el tiempo, T_{eff} , de establecimiento eficaz, operación 422. La señal de perturbación adicional puede ser asignada entonces como la señal de ensayo de perturbación para el canal de entrada siguiente del sistema que se ha de ensayar, operación 424. Como la asignación de la señal de BMF madre al primer canal de entrada, esta asignación de canal inicial puede ser cambiada también para mejorar la amigabilidad de la planta del ensayo, como se describe más adelante con referencia a las Figuras 7 y 9. Las operaciones 420 y 422 se repiten tantas veces como sea necesario hasta que las señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente hayan sido generadas para todos los canales de entrada. Cada nueva señal de perturbación a modo de ejemplo puede estar retardada de la señal generada previamente mediante T_{eff} en este ejemplo.

Un método a modo de ejemplo de generación de estas señales de BMF retardadas, descrito con respecto a la Figura 3, usa un multiplexor con separadores de retardo. La señal de BMF madre puede ser repetida un cierto número de veces. La totalidad menos una de las señales originadas se carga entonces en los separadores de retardo. Cada separador de retardo deberá retardar la señal un tiempo predeterminado, preferiblemente $1 T_{\text{eff}}$ en el primer separador, $2 T_{\text{eff}}$ en el segundo separador, etc. Alternativamente, otros métodos, tales como un programa de software ejecutado en un ordenador de propósito general o un procedimiento de retardo iterativo en el que la señal de perturbación generada más recientemente es copiada y retardada una cantidad establecida para generar la señal de perturbación siguiente, pueden ser usados para generar señales de BMF retardadas.

Como se ilustra en las Figuras 2B-D, una porción de la CCF entre una señal de BMF y una copia retardada de la misma desde cero hasta el tiempo de retardo están desactivadas y son casi cero. Por lo tanto, dos señales a modo de ejemplo, por ejemplo la señal de BMF de madre y su copia retardada, están casi no correlacionadas estocásticamente para respuestas que se producen dentro del tiempo de retardo entre estas señales. Preferiblemente, el retardo es más largo que el tiempo de establecimiento eficaz del sistema, T_{eff} . También es conveniente que el periodo de las señales de BMF sea al menos T_{eff} veces más largo que el mayor retardo entre cualquier par de señales.

Retardos más cortos que T_{eff} son posibles, pero estos retardos más cortos entre señales pueden ser convenientes solamente en situaciones en las que el tiempo de establecimiento efectivo esté basado en la constante de tiempo de una minoría de salidas que pueden ser menos importantes para el control basado en el modelo de la planta. Por el contrario, puede ser preferible reducir T_{eff} en ese caso. Retardos más largos que T_{eff} pueden ser usados para reducir más cualquier correlación estocástica de las señales de perturbación, pero esto puede incrementar el tiempo de ensayo total. El tiempo de ensayo mínimo mostrado en la Ecuación 1 supone que cada señal de perturbación de BMF está retardada T_{eff} de la señal de perturbación precedente. Si el retardo, T_{delay} , entre señales es mayor que T_{eff} , entonces el tiempo de ensayo mínimo resulta ser el mayor de $(2n+1)T_{\text{delay}}$ y $(m+1)T_{\text{delay}}$. También puede ser conveniente variar los retardos de tiempo para producir retardos más largos o más cortos entre pares concretos de señales de perturbación si se anticipa una mayor o menor interacción entre los canales de entrada a los que estas señales han de ser asignadas.

Una vez que el conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente ha sido generado y asignado a canales de entrada del sistema, se efectúa un ensayo de planta rápido a modo de ejemplo del sistema que se estudia, operación 426.

Descripción Detallada del Gráfico de Flujo de la Figura 5

La Figura 5 ilustra un método a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMF amigables para la planta para ser usadas en un ensayo de planta rápido para crear un modelo de la planta para el control basado en el modelo de la planta. Se proporcionan varios parámetros usados para generar las señales, operación 500. Como en el método a modo de ejemplo de la Figura 4, estos parámetros se determinan basándose en un conocimiento a

priori del sistema que se ensaya. Proporcionar los parámetros en la operación 500 incluye preferiblemente determinar un tiempo de establecimiento del sistema, operación 502, seleccionar una ventana de frecuencias adecuada de control para las señales de perturbación, operación 504, y seleccionar un espectro de frecuencias deseado para las señales de perturbación sobre los armónicos de la ventana de frecuencias escogida, operación 506. Estos tres parámetros se determinan usando procedimientos y consideraciones similares a las descritas para la operación 400 del método a modo de ejemplo de la Figura 4, anteriormente.

Adicionalmente, se seleccionan los criterios usados para determinar la amigabilidad de la planta de un ensayo de planta a modo de ejemplo, operación 508. Los criterios de amigabilidad de la planta se seleccionan convenientemente para proporcionar un margen de seguridad para el funcionamiento de la planta durante el ensayo de planta a modo de ejemplo. Asimismo, el criterio de amigabilidad de la planta puede ser seleccionado para mantener niveles de producción razonablemente normales durante el ensayo de la planta a modo de ejemplo. Estos criterios pueden incluir límites superior e inferior para los niveles de señal de los canales de salida individuales, que pueden constituir temperaturas, presiones, caudales, corriente, tensiones, etc., del sistema, así como límites superior e inferior para funciones particulares de los niveles de señal de los canales de salida, tales como el valor medio de las temperaturas de etapas de una columna de destilación, diferencias de presión en el diagrama de circulación, etc.

Una vez que los parámetros han sido proporcionados en la operación 500, un conjunto de señales de BMF de ensayo es generado, operación 510, y los espectros de frecuencia de estas señales de BMF de ensayo son calculados, operación 512. Este conjunto de señales de BMF de ensayo y los correspondientes espectros de frecuencia pueden ser generados mediante cualquiera de los métodos descritos anteriormente con respecto al método a modo de ejemplo de la Figura 4. El conjunto de señales de BMF de ensayo y los correspondientes espectros de frecuencia son entonces comparados con el deseado espectro de frecuencias de las señales de perturbación seleccionado en la operación 506 sobre los armónicos de la ventana de frecuencias escogida en la operación 504 para seleccionar una señal de BMF madre, operación 514, y asignar esta señal como la señal de perturbación para el primer canal de entrada, operación 516. La selección de la señal de BMF madre del conjunto de señales de BMF de ensayo puede ser realizada mediante los métodos descritos anteriormente con respecto al método a modo de ejemplo de la Figura 4 asimismo.

La señal de BMF madre seleccionada en la operación 514 puede ser usada también para generar una segunda señal de ensayo de perturbación para un segundo canal de entrada del sistema, operación 518, retardando la señal de BMF madre como se ha descrito anteriormente con respecto a la Figura 4. Alternativamente, otra señal del conjunto de señales de BMF de ensayo remanentes puede ser seleccionada mediante los métodos usados en la operación 514 para seleccionar la señal de BMF madre. La CCF entre esta señal nuevamente seleccionada y la señal de BMF madre puede ser generada para determinar el grado en el que estas dos señales están correlacionadas estocásticamente. Nuevas señales pueden ser seleccionadas del conjunto de señales de BMF hasta que se halle un par de señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente para un momento de establecimiento efectivo del sistema.

Otra solución para crear un par de señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente fue descrita por L.W. Bezanson y S.L. Harris en Identificación y Control de un Extensor que Usa Algoritmos Multivariable, IEEE Proceedings, 133(4)(1986), basado en la ortogonalidad de armónicos pares e impares, que se incorpora en esta memoria por su referencia. Un método a modo de ejemplo basado en esta solución implica convenientemente la creación de dos señales de BMF, una que tienen contribuciones sobre armónicos pares solamente y la otra que tiene contribuciones sobre armónicos impares solamente. Por lo tanto, para un periodo P de señales dado y un tiempo T_{sw} de conmutación, todo lo más que se puede generar son dos señales de BMF no correlacionadas estadísticamente.

Se ha de tener en cuenta que, aunque el método a modo de ejemplo ilustrado en la Figura 5 incluye el uso de dos canales de entrada, el número de canales de entrada se determina preferiblemente basándose en el alcance del controlador basado en el modelo que ha de ser diseñado por el sistema que se ensaya y la elección a modo de ejemplo de dos canales de entrada es meramente para propósitos ilustrativos. Un experto en la técnica puede entender que este método a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMF amigables para la planta para ser usado en un ensayo de planta rápido para crear un modelo de la planta para el control basado en el modelo de la planta puede ser puesto en práctica con un mayor número de canales de entrada.

La primera y la segunda señales de ensayo de perturbación son asignadas a canales de entrada concretos, operación 519. Las amplitudes iniciales para las señales de ensayo de perturbación primera y segunda son estimadas y asignadas, operación 520. Estas amplitudes estimadas pueden estar basadas en un conocimiento empírico *a priori* del sistema que se ensaya. Las amplitudes estimadas son seleccionadas convenientemente para proporcionar señales de perturbación, que exciten continuamente las salidas del sistema, al mismo tiempo que mantienen también el funcionamiento amigable de la planta.

Las primera y segunda señales de ensayo de perturbación, y las correspondientes amplitudes iniciales estimadas, se usan convenientemente en un modelo simplificado del sistema para simular las respuestas de diversos procedimientos dentro del sistema a estas señales de perturbación, operación 522. El modelo simplificado puede estar programado en un ordenador de propósito general. Un método a modo de ejemplo para diseñar un modelo simplificado del sistema que se ensaya se describe más adelante con respecto a las Figuras 6 y 7. Se considera que los modelos de procedimientos usados para diseñar plantas químicas u otros sistemas complejos para los cuales el control basado en el modelo puede ser conveniente pueden ser usados para crear un modelo simplificado para ser usado en la operación 522 también.

Las señales de salida simuladas del modelo de sistema simplificado de la operación 522 son almacenadas y juzgadas, operación 524, contra los criterios de amigabilidad de la planta seleccionados en la operación 508. Las señales de salida pueden ser juzgadas también para garantizar que los procedimientos del sistema son excitados significativamente durante el ensayo simulado a modo de ejemplo para proporcionar una relación S/N convenientemente alta dentro de los criterios de amigabilidad de la planta. Una vez que las señales de salida son analizadas, una operación 526 de decisión puede ser ejecutada sobre la ejecución del ensayo de la planta a modo de ejemplo, operación 528, o el retorno al método a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMT amigables para la planta destinadas a ser usada en un ensayo de planta rápido en una de las operaciones 519 ó 520. La asignación de las señales de perturbación puede ser cambiada en la operación 519 y/o nuevas primera y segunda estimaciones de amplitud de la señal de perturbación de entrada pueden ser calculadas en la operación 520 basadas en las respuestas del procedimiento simulado, así como en el conocimiento del sistema usado anteriormente, para satisfacer mejor los criterios de amigabilidad de la planta. La simulación de ensayo puede ser ejecutada de nuevo. Nuevas amplitudes de la señal de perturbación pueden ser calculadas y ensayadas también en el modelo de sistema simplificado para crear mayor excitación de las salidas del sistema, manteniendo al mismo tiempo la amigabilidad de la planta.

Este uso de un modelo simplificado de la planta puede garantizar convenientemente que las señales de perturbación de entrada son amigables para la planta, incrementando de este modo la seguridad de un ensayo de la planta a modo de ejemplo según una realización de la presente invención. Usando este método a modo de ejemplo, puede ser también posible crear un ensayo de planta que proporcione mayor excitación de procedimiento sin riesgo indebido, determinando más amplitudes óptimas para las señales de perturbación de entrada. Se considera que aumentando lentamente las amplitudes de las señales de ensayo de la perturbación a modo de ejemplo y vigilando cuidadosamente las señales de salida de los canales de salida de la planta durante el ensayo previo a modo de ejemplo se pueden obtener resultados similares. La simulación de este ensayo previo a modo de ejemplo con un modelo de sistema simplificado permite mayor latitud, pues resultados no amigables de la planta que pueden originar daños en el sistema en el ensayo real no dañan un modelo simplificado a modo de ejemplo.

Descripción Detallada del Gráfico de Flujo de la Figura 6

La Figura 6 ilustra otro método a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMF amigables para la planta que usa un modelo de sistema simplificado para crear un modelo del sistema para la síntesis de un control basado en el modelo para ese sistema. Se proporcionan parámetros usados para generar las señales, operación 600. Como en los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4 y 5, estos parámetros se determinan basándose en un conocimiento anterior del sistema que se ensaya. Proporcionando los parámetros en la operación 600 preferiblemente se incluye la determinación de un tiempo de establecimiento eficaz del sistema, operación 602. También pueden ser proporcionados otros parámetros, tales como una ventana de frecuencias apropiada de control, un espectro de frecuencias deseado para las señales de perturbación y criterios de amigabilidad de la planta. Estos parámetros pueden ser determinados usando procedimientos y consideraciones similares a los descritos anteriormente como parte de los métodos a modo de ejemplos de las Figuras 4 y 5.

Adicionalmente, puede ser seleccionado un conjunto de amplitudes iniciales para las señales de perturbación de entrada, operación 604. El conjunto incluye una amplitud estimada correspondiente a cada canal de entrada del sistema que ha de ser ensayado. Estas amplitudes estimadas pueden ser determinadas convenientemente a partir de un conocimiento *a priori* del sistema que se ensaya y asignadas a los canales de entrada basándose en este conocimiento *a priori*.

Una vez proporcionados los parámetros en la operación 600, es generado un conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente, operación 606. Este conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente, también igual en número al número de canales de entrada, puede ser generado mediante cualquiera de los métodos descritos anteriormente con respecto a los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4 y 5. Cada señal de perturbación es asignada a un canal de entrada, operación 608, y asignada una amplitud estimada inicial correspondiente desde un conjunto de amplitudes iniciales, operación 610.

Después de haber sido asignadas las señales de perturbación, con sus amplitudes estimadas correspondientes, a canales de entrada, se crea un modelo simplificado de las respuestas de procedimiento para el sistema que se ensaya para verificar la conveniencia de este conjunto de señales y amplitudes de la perturbación de entrada, operación 612. Este modelo simplificado de la planta se basa convenientemente en los parámetros de ensayo proporcionados en la operación 600 y en un conocimiento empírico *a priori* de los procedimientos que completan el sistema.

La modelación de menos salidas puede simplificar convenientemente el modelo, pero la modelación de demasiado pocas salidas puede crear un modelo de sistema simplificado que no proporcione una simulación adecuada para garantizar la amigabilidad de la planta. Un modelo de sistema simplificado a modo de ejemplo atiende preferiblemente solamente aquellas salidas que son importantes para garantizar la amigabilidad de la planta (por ejemplo, la pureza del punto medio, pureza de GOX, oxígeno y nitrógeno en el brazo lateral, etc., para una instalación de separación de aire). Aquellos canales de salida son seleccionados de entre el conjunto de todas las salidas de procedimientos del sistema, operación 614. Los canales de salida seleccionados pueden incluir la mayoría, o la totalidad del conjunto de todos los canales de salida. Las relaciones de entrada/salida (I/O) entre los canales de entrada y los canales de salida seleccionados, que representan procedimientos relacionados con aquellos canales de entrada y salida, completan convenientemente el modelo de sistema simplificado. Se estiman valores de régimen permanente para las señales de

salida de los canales de salida seleccionados, basados en el conocimiento empírico *a priori* del funcionamiento del sistema. Estos valores son asignados como valores iniciales a los canales de salida seleccionados del modelo simplificado, operación 616. También pueden ser determinados niveles de la señal de entrada de régimen constante para los canales de entrada. Aumentos en el régimen permanente para las relaciones I/O seleccionadas en la operación 618 pueden ser estimados, por ejemplo, por medio de una simulación de estado permanente del modo de regímenes, una simulación dinámica, o a partir de datos empíricos. En la mayoría de los casos, justamente el signo de las variaciones del régimen permanente y el orden de magnitud relativo pueden ser suficientes para ser usados en el modelo de sistema simplificado para los análisis de amigabilidad de la planta. El modelo de sistema simplificado del presente método se contempla para determinar si las señales de perturbación de entrada propuestas pueden proporcionar suficiente excitación de las salidas de sistema al mismo tiempo que mantienen el funcionamiento de la planta amigable. Se ha de tener en cuenta que el comportamiento de las salidas de sistemas complejos del tipo que puede ser el sujeto del presente método a modo de ejemplo puede ser acentuadamente no lineal. Por lo tanto, se contempla que las ganancias en el estado de régimen uniforme estimado determinado en la operación 618 pueden proporcionar solamente una idea vaga del signo y el orden de magnitud de las ganancias del estado del régimen real de las salidas del sistema, pero esta información puede proporcionar todavía suficiente información significativa para determinar las amplitudes de señal de las perturbaciones amigables para la planta.

Estas ganancias en el estado de régimen constante estimado pueden ser configuradas en la forma de una simple, pero significativa matriz de aumento del régimen uniforme del sistema que se ensaya. Es conveniente para el modelo de sistema simplificado estimar las respuestas dinámicas de los procedimientos en el sistema. Muchos procedimientos químicos, y otros, complejos, se comportan localmente (es decir, cerca de un estado de régimen uniforme) como un procedimiento lineal de segundo orden, u orden superior. Suponiendo una dinámica lineal de un orden deseado, la matriz de aumento del régimen uniforme puede ser usada para crear un modelo simplificado de la dinámica del sistema cerca de los valores de régimen permanente, operación 620. La ecuación 3 ilustra un método de primer orden a modo de ejemplo para estimar el comportamiento dinámico, $G(t)$, del sistema basado en la matriz K de aumento del régimen uniforme:

$$G(t) = K \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{dom}}\right)} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

La matriz $G(t)$ puede ser usada como un modelo de sistema simplificado para determinar las amplitudes amigables para la planta para las señales de perturbación de entrada en un ensayo de planta a modo de ejemplo. Modelos de orden superior con retardos de tiempo, respuesta inversa o sobredimensionados pueden proporcionar estimaciones más reales de la dinámica del sistema.

Después de haber sido creado el modelo simplificado, $G(t)$, de la planta, puede ser usado un método a modo de ejemplo para resolver una optimización de este modelo, operación (622), para determinar las amplitudes de la señal de perturbación máxima que pueden satisfacer los criterios de amigabilidad de la planta. Las señales de perturbación de entrada pueden cambiar en cada instante, T_{sw} , de conmutación, y un periodo de la señal de conmutación de BMF contiene N instantes de conmutación. Por lo tanto, la optimización del modelo $G(t)N$ veces con $t = T_{sw}$ puede ser resuelta convenientemente.

Las amplitudes, $\lambda_i > 0$, $i=1, 2, 3, \dots, m$, para los m canales de entrada constituyen convenientemente el conjunto de variables de decisión de la optimización. El problema de la optimización, que se resuelve para $k=1, 2, 3, \dots, N$, puede ser dado por la Ecuación 4:

$$\begin{aligned} \text{Función Objetivo:} \quad & \max \lambda_i^k ; i = 1, 2, 3, \dots, m \left(\prod_{i=1}^m \lambda_i^k \right) \\ \text{Restricciones de Entrada:} \quad & \Delta u_{\min} \leq \Lambda^k u^k \leq \Delta u_{\max} \\ \text{Restricciones de Salida:} \quad & \Delta y_{\min}^k \leq G(T_{sw}) \Lambda^k u^k \equiv \Delta y^k \leq \Delta y_{\max}^k \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde Λ^k es una matriz diagonal cuyos elementos son amplitudes λ_i^k de señal y u^k es la combinación $m \times 1$ de los m movimientos de entrada en el retardo k^{th} (el vector u^k está normalizado de modo que solamente contiene elementos iguales a ± 1); $u_{\min}$ y $u_{\max}$ son los valores de entrada mínimo y máximo permitidos, respectivamente; $\Delta u_{\min}$ (definido por $u_{ss} - u_{\min}$) y $\Delta u_{\max}$ (definido por $u_{\max} - u_{ss}$) son las restricciones de desviación de la entrada mínima y máxima con respecto al valor, u_{ss} , de entrada de régimen constante deseado, respectivamente; $y_{\min}$ y $y_{\max}$ son las restricciones de salida mínima y máxima, respectivamente, que son convenientemente satisfechas en todos los instantes (es decir, el criterio de amigabilidad para los canales de salida individuales); $\Delta y_{\min}^k$ (definido por $y_{ss}^k - y_{\min}^k$) e $\Delta y_{\max}^k$ (definido por $y_{\max}^k - y_{ss}^k$) son las restricciones de desviación de la salida mínima y máxima con respecto al valor, y_{ss}^k , de salida actual, respectivamente.

En la práctica, u_{ss} y y_{ss}^1 son vectores de los valores de canal de entrada y canal de salida correspondientes al inicio de la simulación. Puesto que las desviaciones de entrada de las señales de perturbación se efectúan preferiblemente

alrededor de los valores, u_{ss} , de régimen uniforme de canal de entrada, iniciales, puede no ser conveniente actualizar este valor. Los valores de los canales de salida, no obstante, varían a través de la simulación a modo de ejemplo, así como durante el propio ensayo de la planta, en respuesta a las perturbaciones de entrada. Por lo tanto las restricciones de salida, $\Delta y_{\min}$ e $\Delta y_{\max}$, se miden preferiblemente contra valores, y_{ss}^k , actualizados.

Una realización alternativa del método de optimización está basada en la Ecuación 5. Puesto que la función objetivo incluida en la Ecuación 4 crea un problema de optimización que no es lineal, no es convexo, y está diseñado como una maximización, este método de optimización puede no ser resuelto fácilmente usando software de optimización comercial disponible. Por lo tanto, puede ser conveniente reconocer el problema de la optimización dentro de la minimización convexa de la Ecuación 5:

$$\begin{aligned} \text{Función Objetivo:} \quad & \min \lambda_i^k; i=1,2,3,\dots,m \left[-\sum_{i=1}^m \ln(\lambda_i^k) = \sum_{i=1}^m \ln\left(\frac{1}{\lambda_i^k}\right) \right] \\ \text{Restricciones Entrada:} \quad & \Delta u_{\min} \leq \Lambda^k u^k \leq \Delta u_{\max} \\ \text{Restricciones Salida:} \quad & \Delta y_{\min}^k \leq G(T_{sw}) \Lambda^k u^k \equiv \Delta y^k \leq \Delta_{\max}^k \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5}$$

Esta forma convexa de la función objetivo fue descrita por S. Boyd, L.E. Ghaoui, E. Feron y V. Balakrishnan en Desigualdades de la Matriz Lineal en Estudios, Teoría de Control y Sistemas en Matemáticas Aplicadas, v. 15 (1994). La resolución de un problema como una desigualdad de la matriz lineal (LMI=Linear Matrix Inequality) garantiza una solución única. El problema de optimización a modo de ejemplo en la Ecuación 5 puede no estar situado en el formato LMI a menos que las restricciones de entrada y salida lineales sean simétricas. Por lo tanto, incluso aunque un problema de optimización a modo de ejemplo que usa la Ecuación 5 es convenientemente convexo, puede no estar escrito como una LMI, pero una solución puede ser determinada usando un solucionador convexo, o un solucionador no lineal general disponible en paquetes matemáticos de software, tales como MATLAB®. Alternativamente, un solucionador de software de propósito especial o un circuito de propósito especial puede ser diseñado para efectuar la optimización de la Ecuación 4 o la Ecuación 5.

Una vez que la optimización de las amplitudes de las señales de perturbación de entrada ha terminado, se pueden usar los datos que describen el conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente y las amplitudes optimizadas correspondientemente para generar señales de perturbación de entrada y dirigir un ensayo del sistema real, operación 624.

Descripción Detallada del Diagrama de Flujo de la Figura 7

La Figura 7 ilustra un método más a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada amigables para la planta que usa un modelo de sistema simplificado para crear un modelo para el control basado en el modelo del sistema. Este método a modo de ejemplo empieza de modo similar al método a modo de ejemplo de la Figura 6. Se ha de tener en cuenta que el método a modo de ejemplo de la Figura 7 se describe en términos de un sistema que tiene dos canales de entrada. La elección de dos canales de entrada es meramente ilustrativa y un experto en la técnica puede comprender que las señales de ensayo de perturbación para sistemas que tengan otro número de canales de entrada pueden ser generadas también usando el método a modo de ejemplo de la Figura 7.

Los parámetros usados para generar las señales se proporcionan en las operaciones 700, 702 y 704. Como en los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4, 5 y 6, estos parámetros se determinan basándose en un conocimiento *a priori* del sistema que se ensaya. Este conocimiento puede implicar datos empíricos deducidos del funcionamiento de la planta o del funcionamiento de plantas similares. Estos parámetros pueden ser determinados usando procedimientos y consideraciones similares a las descritas como parte de los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4, 5 y 6, anteriormente.

Una vez que los parámetros han sido proporcionados en la operación 700, un conjunto de dos señales de perturbación casi no correlacionadas estocásticamente se genera en la operación 706. Estas señales de perturbación casi no correlacionadas estocásticamente, iguales en número al número de canales de entrada, pueden incluir señales de BNF, señales binarias seudo aleatorias, señales seudo aleatorias multinivel, o sinusoides en fase de Schroeder. Métodos a modo de ejemplo para generar señales casi no correlacionadas estocásticamente se describen anteriormente con respecto a las Figuras 3 y 4. Cada señal de perturbación es asignada a un canal de entrada y se asigna una amplitud estimada inicial correspondiente, operación 708 desde el conjunto de amplitudes iniciales estimadas en la operación 702.

Después de haber sido asignadas las señales de perturbación con sus amplitudes estimadas correspondientes a los canales de entrada, se crea un modelo simplificado de las respuestas del procedimiento para el sistema que se ensaya para verificar la amigabilidad de este conjunto de señales de perturbación de entrada y sus amplitudes, operación 710. Este modelo simplificado de la planta está basado convenientemente en los parámetros de ensayo proporcionados en la operación 700 y en un conocimiento basado en principios básicos o empíricos *a priori* de los procedimientos que constituyen el sistema.

El modelo de sistema simplificado a modo de ejemplo puede ser creado usando los métodos a modo de ejemplo descritos anteriormente con respecto a la Figura 6. Los canales de salida cuyo comportamiento puede ser importante para garantizar la amigabilidad de la planta son seleccionados convenientemente de entre el conjunto de todas las salidas de procedimiento del sistema, operación 712. Valores de régimen permanente para las señales de salida de los canales de salida seleccionados pueden ser entonces determinados a partir del funcionamiento o de estudios de simulación de la planta, por ejemplo. Estos valores pueden ser asignados como valores iniciales a los canales de salida seleccionados del modelo simplificado, operación 714. También pueden ser determinados los niveles de la señal de entrada de régimen uniforme para los canales de entrada. Las ganancias de régimen uniforme para las relaciones de I/O correspondientes a cada par de canales de entrada/salida pueden ser determinadas, operación 716, como se explica en la descripción de la Figura 6. Suponiendo dinámicas lineales de al menos un orden deseado, las ganancias de régimen uniforme estimadas para las relaciones de I/O seleccionadas pueden ser usadas para crear un modelo simplificado de la dinámica local del sistema, operación 718.

Una simulación de un ensayo de planta usando las amplitudes estimadas y las asignaciones iniciales de las señales de perturbación de entrada puede ser ejecutada, operación 720, sobre el modelo de sistema simplificado creado en la operación 710. Las señales de ensayo de perturbación se añaden a los niveles de señal de entrada de régimen uniforme estimados de los canales de entrada determinados en la operación 714 y son aplicadas a los canales de entrada del modelo de sistema simplificado creado en la operación 710. Las señales de salida resultantes sobre los canales de salida del modelo de sistema simplificado pueden ser calculadas y almacenadas.

Las señales de salida resultantes son juzgadas en contra del criterio amigabilidad de la planta en la operación 704 para determinar si las señales de perturbación de entrada proporcionan suficiente excitación de las salidas del sistema, al mismo tiempo que mantienen la amigabilidad de la planta, operación 722. La Figura 8 ilustra dos señales de salida a modo de ejemplo para un canal de salida seleccionado, la señal 800 de salida amigable para la planta y la señal 802 de salida no amigable para la planta. Estas dos señales de salida a modo de ejemplo son comparadas en cuanto al criterio 804 de amigabilidad de la planta de límite superior y en cuanto al criterio 806 de amigabilidad de la planta limitado inferiormente para el canal de salida seleccionado. La señal 800 de salida amigable para la planta varía convenientemente entre el criterio 804 y el 806 de una manera relativamente uniforme. Por otra parte, la señal 802 de salida no amigable para la planta permanece cerca del criterio 806 de amigabilidad de la planta de límite inferior durante una porción de tiempo significativa. Aunque en ambos casos la respuesta de salida se prevé que esté sustancialmente dentro de los límites (99,5-99,9%) deseados, la señal 800 de salida amigable para la planta es considerada la respuesta más amigable para la planta porque la salida se mantiene fuera del criterio 806 de amigabilidad de la planta inferior, que en el caso de este ejemplo es una especificación de pureza de producto. Es conveniente que las especificaciones de pureza del producto no sean violadas durante un ensayo de planta a modo de ejemplo.

Si se considera que las señales de salida exceden los criterios de amigabilidad de la planta entonces el método a modo de ejemplo retrocede para cambiar las asignaciones de las señales de perturbación, operación 726, y/o cambiar las amplitudes de las señales de perturbación, operación 728, en la operación 724 de decisión. Por otra parte, las amplitudes y asignaciones de las señales de perturbación son aceptadas y el ensayo a modo de ejemplo se ejecuta sobre el sistema, operación 730.

En el método a modo de ejemplo ilustrado en la Figura 7, con solamente dos canales de entrada, solamente es posible un cambio en la asignación de señales de perturbación a los canales de entrada, pero en ensayos a modo de ejemplo que impliquen más de dos canales de entrada existe una mayor diversidad de posibilidades de asignación. Conociendo las ganancias de régimen uniforme aproximadas para las salidas seleccionadas con respecto a las entradas, es posible eliminar *a priori* ciertas posibilidades de asignación que probablemente serán las que más favorezcan la no amigabilidad de la planta. De ese modo se deja una con un menor número de posibilidades de asignación para que sea evaluada en cuanto a amigabilidad de la planta.

Una vez determinadas nuevas asignaciones y/o amplitudes de señales de perturbación el procedimiento vuelve a ejecutar la simulación del modelo de sistema simplificado, operación 720. Las señales de salida resultantes se juzgan de nuevo, operaciones 722 y 724. Si el ensayo de comprobación excede todavía los criterios de amigabilidad de la planta, puede ser determinado otro conjunto de asignaciones y amplitudes de señales de perturbación puede ser determinado en las operaciones 726 y/o 728, respectivamente, hasta que se halle un conjunto de señales de ensayo amigable para la planta, o se alcance un número establecido de iteraciones. Puede ser conveniente usar datos de todas las simulaciones del procedimiento del modelo de sistema simplificado para determinar las asignaciones y amplitudes de las señales de perturbación.

Descripción Detallada del Diagrama de Flujo de la Figura 9

La Figura 9 ilustra un método más a modo de ejemplo para generar señales de perturbación de entrada de BMF amigables para la planta que usa un modelo de sistema simplificado para crear un modelo para el control basado en el modelo del sistema. Este método a modo de ejemplo empieza de modo similar a los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 6 y 7.

Los parámetros usados para generar las señales se proporcionan en las operaciones 900, 902 y 904. Como en los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4, 5, 6 y 7, estos parámetros son determinados basándose en un conocimiento *a priori* del sistema que se ensaya. Este conocimiento puede implicar datos empíricos deducidos del

funcionamiento de la planta, o del funcionamiento de plantas similares. Estos parámetros pueden ser determinados usando procedimientos y consideraciones similares a los descritos como parte de los métodos a modo de ejemplo de las Figuras 4, 5, 6 y 7, anteriormente.

Una vez que los parámetros han sido proporcionados las señales de ensayo de perturbación de entrada de BMF son generadas, operación 906. Los métodos de generación de este conjunto de señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente, operación 908, ejecutando una asignación inicial de las señales de perturbación de BMF a los canales de entrada, operación 910, y seleccionando amplitudes de las señales de entrada, operación 912, que puede ser similar a la de los métodos usados para las operaciones 606, 608, y 610 en la Figura 6.

Canales de salida cuyo comportamiento puede ser importante para garantizar la amigabilidad de la planta se seleccionan convenientemente de entre el conjunto de todas las salidas del sistema, operación 914. Esta selección puede estar basada en los criterios descritos anteriormente con respecto al método a modo de ejemplo de la Figura 6. Valores de régimen uniforme previstos para las señales de salida de los canales de salida seleccionados pueden ser determinados entonces basándose en el conocimiento de los primeros principio o *a priori* empírico del sistema que se ensaya. Estos valores pueden ser asignados como valores iniciales a los canales de salida seleccionados del modelo simplificado, operación 916. Las señales de BMF seleccionadas se usan como un primer conjunto de señales de ensayo de perturbación, operación 918, para un modelo simplificado del sistema que se ensaya.

El modelo de sistema simplificado a modo de ejemplo puede ser creado, operación 920, usando los métodos a modo de ejemplo descritos anteriormente con respecto a las Figuras 6 y 7. Los niveles de señal de entrada de régimen uniforme para los canales de entrada pueden ser determinados. Las ganancias de régimen uniforme para las relaciones de I/O correspondientes a cada par de canales de entrada/salida pueden ser estimadas por medio de las opciones presentadas en la descripción de la Figura 6, operación 922. Suponiendo una dinámica lineal de al menos un orden deseado, las ganancias de régimen uniforme estimadas para las relaciones de I/O seleccionadas pueden ser usadas para crear un modelo simplificado de la dinámica del sistema, operación 924.

Los efectos de las señales de ensayo de perturbación de entrada que tienen las amplitudes estimadas y las asignaciones iniciales son simulados, operación 926, sobre el modelo de sistema simplificado de las salidas del procedimiento creado en la operación 920. Las señales de ensayo de perturbación son añadidas a los niveles de señal de entrada de régimen uniforme estimados de los canales de entrada, operación 928, y aplicadas a los canales de entrada del modelo de sistema simplificado, operación 930. Las señales de salida resultantes sobre los canales de salida del modelo de sistema simplificado pueden ser calculadas entonces y almacenadas.

Las señales de salida resultantes se juzgan en relación con los criterios de amigabilidad de la planta proporcionados en la operación 904 para determinar si las señales de perturbación de entrada proporcionan suficiente excitación de las salidas de sistema, al mismo tiempo que mantienen la amigabilidad de la planta, operación 932.

Si se juzga que las señales de salida exceden los criterios de amigabilidad de la planta, entonces el método a modo de ejemplo retrocede para cambiar las amplitudes de las señales de perturbación, operación 936, y/o cambia las asignaciones de las señales de perturbación, operación 938, en la operación 934 de decisión. De lo contrario las asignaciones y amplitudes de las señales de perturbación son aceptadas y el ensayo a modo de ejemplo se ejecuta en el sistema, operación 940.

Una vez que han sido determinadas nuevas amplitudes y/o asignaciones de señales de perturbación el procedimiento vuelve a ejecutar la simulación del modelo de sistema simplificado, operación 930. Las señales de salida resultantes son juzgadas de nuevo, operaciones 932 y 934. Si el ensayo de prueba excede todavía los criterios de amigabilidad de la planta, puede ser determinado otro conjunto de amplitudes y asignaciones de señales de perturbación revisado en las operaciones 936 y/o 938, respectivamente, hasta que se halle un conjunto de señales de ensayo amigable para la planta, o se alcance un número establecido de iteraciones. Puede ser conveniente usar datos procedentes de todas las simulaciones precedentes del modelo de sistema simplificado para determinar las asignaciones y amplitudes de las señales de perturbación revisadas.

Descripción Detallada del diagrama de flujo de la Figura 10

La Figura 10 es un diagrama de flujo que ilustra un método a modo de ejemplo para diseñar un ensayo de planta rápido para crear un modelo de planta para el control basado en el modelo de la planta. El tiempo, T_{eff} , de establecimiento eficaz se determina en la operación 1000, basándose en las constantes de tiempo de las diversas salidas dentro del sistema y la agresividad del controlador basado en el modelo que se diseña para el sistema. T_{eff} es la longitud del periodo de tiempo durante el cual un sistema puede todavía reaccionar con un grado significativo a una perturbación en una escala de tiempo apropiada de control. La clave para determinar T_{eff} está, por lo tanto, en las salidas del sistema que presentan la constante de tiempo más larga. El método a modo de ejemplo de la Figura 10 está diseñado para crear un ensayo de planta rápido a modo de ejemplo que utiliza un conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente. Puesto que el propósito de este ensayo de planta a modo de ejemplo es crear un modelo apropiado de control de la planta para el control basado en el modelo, el parámetro de tiempo de establecimiento determinado en la operación 100 puede ser acortado sustancialmente a partir del tiempo de establecimiento del bucle abierto, dependiendo de la agresividad de la realimentación de control basada en el modelo. En muchos casos, T_{eff} puede ser el 60% del tiempo de establecimiento del bucle abierto. T_{eff} puede ser determinado basándose

en el conocimiento *a priori* del sistema que se ensaya. La determinación de T_{eff} puede estar basada en observaciones empíricas del sistema, o, alternativamente, puede ser obtenido a partir de una simulación dinámica de la planta (si existe una) o de la experiencia basada en otras plantas de una naturaleza similar. Los datos empíricos deducidos del funcionamiento de la planta son preferibles a menudo, debido a la complejidad de los sistemas generalmente considerados. En el caso de diseñar un sistema de control basado en el modelo para una nueva planta, estos datos pueden implicar respuestas escalonadas obtenidas a partir de una simulación dinámica de la planta basada en parámetros de diseño o información de plantas existentes similares. En el caso de perfeccionamiento del sistema de control de una planta que ya está en funcionamiento, las experiencias de los operadores y técnicos de la planta y los datos a largo plazo de previos sistemas de control pueden proporcionar cantidades significativas de datos empíricos a partir de los cuales pueden ser determinados los parámetros de las señales de perturbación.

Un cierto número de señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente son generadas, operación 1002, usando el tiempo de establecimiento eficaz proporcionado en la operación 1000. Es conveniente que haya una señal de BMF para cada canal de entrada. Estas señales de BMF casi no correlacionadas estocásticamente pueden ser generadas mediante cualquiera de los métodos descritos anteriormente con referencia a la Figura 4.

Una vez que el conjunto de señales de perturbación de BMF casi no correlacionadas estocásticamente ha sido generado, tiene lugar una asignación de las señales de perturbación a los canales de entrada del sistema, operación 1004. Amplitudes físicamente significativas se asignan a cada señal de perturbación de entrada, para generar un ensayo amigable para la planta, operación 1006. Estas amplitudes y asignaciones se determinan convenientemente basándose en principios básicos o empíricos *a priori* basados en el conocimiento del sistema que se ensaya. Cualquiera de los métodos descritos anteriormente con respecto a las Figuras 5, 6 y 7 puede ser usado también para determinar las asignaciones y amplitudes de las señales de perturbación de entrada.

Seguidamente, se efectúa un ensayo de planta rápido a modo de ejemplo del sistema que se estudia, usando las señales de perturbación determinadas en las operaciones 1002, 1004 y 1006. Este ensayo de planta rápido a modo de ejemplo puede ser ejecutado según los métodos descritos con respecto a la Figura 3. Se considera que el ensayo puede ser continuado durante diversos periodos de las señales de perturbación de BMF para incrementar la relación de S/N de los datos de salida promediando los datos de diversos ciclos de las señales. El uso de más de un periodo de señales de perturbación alarga necesariamente el ensayo, pero este inconveniente puede ser compensado por el incremento en la precisión incrementada de los modelos que puede ser obtenida con más datos, particularmente si existe la posibilidad de cambios de modo de funcionamiento durante el transcurso del ensayo. Cuando es posible es conveniente minimizar tales efectos, o registrar los cambios de funcionamiento importantes de modo que sus efectos puedan ser tenidos en cuenta en el procedimiento de modelización.

Los datos de I/O del ensayo de planta rápido a modo de ejemplo son recogidos y almacenados para análisis, operación 1010. La primera porción de las señales de salida de cada uno de los canales de salida, de $t=0$ a $t=T_{\text{eff}}$ se elimina convenientemente de los datos y no se considera en el análisis. Lo mismo se hace para los canales de entrada. Durante este periodo es probable que la planta esté reaccionando todavía a las condiciones previas al ensayo y por lo tanto los datos pueden no ser un reflejo exacto de las respuestas del sistema a las señales de perturbación.

A continuación del ensayo se analizan los datos de ensayo para generar modelos empíricos para las relaciones de I/O de interés en el sistema que se ensaya, operación 1012. Una operación de pretratamiento, no mostrada, puede ser realizada para reducir convenientemente defectos causados, por ejemplo, por datos de calibración, valores atípicos (por ejemplo, una perturbación no medida inusualmente grande, un sensor provisional, o fallo del canal de datos, etc.), ruido excesivo y perturbaciones de alta frecuencia y baja frecuencia fuera de la ventana de frecuencias pertinente de control de interés. El pretratamiento puede implicar una inspección visual de los datos para garantizar que los datos que aparecen son razonables. Se pueden usar herramientas de software, tales como MATLAB®, para ver los datos como en forma de señales de dominio del tiempo o en diversos gráficos de tiempo de dominio de la frecuencia, tales como un gráfico de los cuadrados absolutos de la transformación de Fourier de la señal. Esta inspección visual puede ser particularmente útil para eliminar rápidamente datos muy corrompidos. Alternativamente, los datos pueden ser interpolados, en vez de eliminados, para errores breves que impliquen un número de muestras relativamente pequeño.

Una vez que las deficiencias evidentes de los datos han sido eliminadas o corregidas, puede ser conveniente corregir los efectos no lineales conocidos. Por ejemplo el uso de las relaciones de circulación, las transformaciones de válvula, y otras transformaciones estándar o personalizadas es bien conocido en la técnica. Adicionalmente, puede ser conveniente corregir el desplazamiento en las señales de entrada y salida. Los datos para los cuales el desplazamiento ha sido corregido también pueden ser cambiados de escala en un margen predeterminado, preferiblemente de 0 a +1 o de -1 a +1. Las transformaciones de escala pueden ser lineales o no lineales, dependiendo del significado físico de la variable representada por los datos.

El muestreo repetido y la interpolación son otras posibilidades del tratamiento previo para los datos que puedan haber sido muestreados demasiado aprisa (remuestreo) o demasiado lentamente (interpolación). Generalmente el régimen de muestreo puede ser seleccionado para que case con el régimen que el controlador basado en el modelo está diseñado para funcionar, de modo que estas operaciones de pretratamiento pueden no ser necesarias en la mayoría de los casos.

La filtración de los datos, particularmente las señales de salida, puede ser conveniente también. Dependiendo de la aplicación, el interés en el modelo puede ser enfocado sobre bandas concretas. La filtración de datos antes de la estimación de parámetros, a través de filtros, puede mejorar considerablemente el control adecuado de las bandas de frecuencia y puede mejorar el ajuste del modelo en la ventana de frecuencias de interés. Pueden ser usadas técnicas de filtración de señales estándar, tales como de Butterworth, Chebyshev, elíptica, y filtros digitales unidimensionales. La filtración puede ser de paso de banda, paso bajo, o paso alto dependiendo del efecto deseado, se ha de tener en cuenta que es preferible que todas las señales de entrada y salida sean filtradas usando el mismo filtro, si se usa este método de pretratamiento. Si se filtran solamente las señales de salida, entonces el controlador debe usar la misma salida filtrada y variables de entrada no filtradas.

A continuación de cualquier pretratamiento de los datos, puede ser efectuada la generación de un modelo empírico para el control basado en el modelo basado en los datos previamente tratados. Un modelo lineal a modo de ejemplo para un canal de salida del sistema puede ser escrito como:

$$y(t) = Gu(t) + He(t) \quad \text{Ecuación 6}$$

donde $y(t)$ es la señal de salida medida, G es la función de transferencia que representa las propiedades dinámicas del sistema, $u(t)$ es el vector de las señales de entrada, H es el modelo de ruido que representa las características de ruido del sistema, $e(t)$ es una fuente de ruido estándar.

La Figura 11 ilustra una matriz de gráficos 1100, que puede ser usada como una representación a modo de ejemplo del modelo de sistema empírico deseado generado por el método a modo de ejemplo de la operación 1012 en la Figura 10, para ser usado en el control basado en el modelo del sistema. Cada gráfico 1100 representa la interacción entre la variable (señal de canal de entrada) 1102 de control (manipulada) y una variable (señal de canal de salida) 1104 de salida (controlada). En un sistema a modo de ejemplo, puede existir una complejidad adicional debida a la interacción entre los canales de salida. Esos canales de salida que interaccionan pueden ser analizados conjuntamente para mejorar la capacidad del modelo para predecir correctamente las respuestas de estos canales de salida que interaccionan.

Los canales de salida pueden ser separados en un conjunto de canales de salida muy interactivos y un conjunto de canales de salida menos interactivos, operación 1014, basándose en un conocimiento basado en principios empíricos o básicos del sistema. Convenientemente, esta separación puede ser efectuada usando análisis de la naturaleza física del sistema (por ejemplo, en una unidad de separación de aire que produce oxígeno, nitrógeno y argón, la composición de oxígeno en el vapor en la columna lateral impacta directamente en la composición de oxígeno en el producto argón). El conjunto de canales de salida muy interactivos contiene señales de salida del sistema que presentan un grado significativo de interdependencia entre ellas.

Datos procedentes de los canales de salida determinados por la alta interacción en la operación 1014 se analizan preferiblemente juntos usando un modelo dinámico de identificación paramétrica, tal como un método de identificación de subespacios de entrada múltiple/salida múltiple (MIMO) y modelos exógenos autorregresivos (ARX), operación 1016. Alternativamente, puede ser usado un modelo dinámico no paramétrico (por ejemplo, una respuesta de impulsos, una respuesta escalonada, o una respuesta de frecuencia). Datos de los canales que presentan menos interacción pueden ser analizados separadamente usando modelos paramétricos, (ARX), que usen entrada múltiple/salida única (MISO) más sencillos, autorregresivos que muevan exógenos medios, error de salida (OE), Jenkins de Caja (BJ), instrumental variable (IV4), métodos de predicción de errores (PEM), etc. Se ha de tener en cuenta que aunque los canales de salida puedan ser analizados separadamente, en la operación 1018, o en pequeños grupos en la operación 1016, todos los canales de entrada son considerados convenientemente de modo simultáneo sobre cada canal de salida o conjunto de canales de salida analizado.

La teoría de identificación de sistemas y estas técnicas numéricas subyacentes para la estimación de parámetros son examinadas en un cierto número de textos, que incluyen Identificación de Sistemas: Teoría para el Usuario, L. Ljung, Serie de Ciencias de Sistemas e Información de Prentice-Hall (1987); Identificación de Sistemas, T. Soderstrom y P. Stoica, Serie Internacional de Prentice-Hall en Sistemas e Ingeniería de Control (1989); y Métodos Numéricos para la Optimización No Restrictiva y Ecuaciones No Lineales, J.E.J. Dennis y R.B. Schnabel, Prentice-Hall (1983).

El modelo resultante puede ser ensayado usando las mismas señales de perturbación de entrada como fue usado durante el ensayo de sistema en la operación 1008 y comparando las señales de salida de simulación con las señales de salida del ensayo real. Una medida a modo de ejemplo para estimar la calidad del modelo es el valor aproximado del error de predicción. En esta aproximación a modo de ejemplo, el número usado para juzgar la calidad del modelo es el ajuste del error de predicción, PE_j :

$$PE_j = \frac{\|y_j - y_{j,\text{sim}}\|_2}{\sqrt{N_d}}, j = 1, 2, \dots, p \quad \text{Ecuación 7}$$

donde $\| - \|$ es la norma-2, N_d es el número de puntos de datos usados en el análisis, y_j es la señal j^{th} de salida de orden j , e $y_{j,\text{sim}}$ es la señal j^{th} de salida simulada de orden j del modelo.

Otra medida a modo de ejemplo de la calidad de modelo puede consistir en generar curvas de respuesta escalonadas desde el modelo y compararlas con unas conocidas *a priori* del sistema. La direccionalidad de la ganancia, por ejemplo, puede ser conocida para muchos sistemas y puede ser usada para ocultar varios modelos rápidamente.

5 Una medida a modo de ejemplo más de la calidad de modelo está basada en el análisis residual. Los residuos asociados con los datos y un modelo a modo de ejemplo son convenientemente blancos e independientes de las señales de entrada. La ACF del término $e(t)$ de ruido y la CCF de $e(t)$ y $u(t)$, las señales de entrada, pueden ser calculadas para determinar la blancura de los residuos y su carencia de correlación estocástica con las entradas.

10 Puede ser conveniente que los canales de entrada sean analizados usando más de uno de los modelos, por ejemplo un modelo de espacio de estado MISO y un modelo ARX para un canal de salida no interactivo sustancialmente a modo de ejemplo. Los resultados de los dos modelos pueden ser comparados entonces para determinar la precisión de los modelos. En algunos sistemas, un modelo puede mostrarse muy superior debido a características del sistema, o ensayo. Por ejemplo, modelos ARX pueden no comportarse bien sobre datos con ruido coloreado. El orden de
15 modelos puede ser modificado para mejorar la exactitud del modelo. Después de determinar que un modelo dado no proporciona una precisión convenientemente buena, el orden del modelo puede ser incrementado y la modelización ensayada de nuevo. Alternativamente, las dificultades pueden ser debidas a la ausencia de una variable independiente adicional en el análisis que represente efectos no medidos durante el ensayo. No linealidades pueden conducir también a inexactitudes de modelo. Si los métodos de identificación lineal no producen resultados aceptables y pueden ser
20 originadas no linealidades, el pretratamiento de los datos usando transformaciones que originen líneas puede ser intentado para mejorar la precisión del modelo.

Otra posibilidad es que los datos puedan no ser adecuados. Los datos pueden haber sido corrompidos, o perturbaciones no medidas pueden haber sido demasiado grandes. Asimismo las señales de entrada pueden no haber sido
25 descorrelacionadas estocásticamente de modo suficiente debido, por ejemplo, a cambios de modo de funcionamiento durante el ensayo.

Puede ser conveniente para al primer intento de modelización que los datos sean obtenidos rápidamente y entonces el modelo basto resultante mejorado por medio de operaciones iterativas hasta que sea generado un modelo
30 convenientemente preciso. Un método a modo de ejemplo para estimar los parámetros de modelo está basado en la solución de la predicción. En esta solución a modo de ejemplo, los parámetros del modelo son seleccionados de modo que la diferencia entre la señal(es) de salida y la señal(es) medida(s) del canal o canales de salida que se analizan es minimizada.

35 Una vez determinado un modelo convenientemente exacto por comparación con los datos de ensayo, puede ser conveniente realizar también un ensayo de validación transversal. Un ensayo de validación transversal implica comprobar la calidad del modelo por medio de una simulación que use un segundo conjunto de datos de entrada no usado para general el modelo.

40 Aunque las realizaciones de la invención descritas anteriormente han sido efectuadas en términos de ensayos de sistema para diseño de modelos de sistema para control basado en el modelo, se considera que conceptos similares pueden ser puestos en práctica con diseños de modelos de sistema para otros propósitos. Asimismo, un experto en la técnica deberá comprender que existe un cierto número de otras modificaciones que no se desvían del alcance de la presente invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un método para producir señales de perturbación adaptables para excitar un número predeterminado de variables de entrada de un sistema, para ensayar ese sistema con los propósitos de obtener modelos para la síntesis de un controlador basado en el modelo, comprendiendo el método las operaciones de:

- a) proporcionar parámetros de entrada del sistema;
- b) generar una pluralidad de señales de multifrecuencia binarias (BMF) basadas en los parámetros de entrada;
- c) calcular el espectro de frecuencias de las señales de BMF generadas en la operación (b);
- d) seleccionar una de las señales de BMF del conjunto de señales de BMF de la operación (b), cuyo espectro de frecuencias se ajusta estrechamente al espectro de frecuencias deseado especificado por los parámetros de entrada;
- (e) usar la señal de BMF seleccionada de la operación (d) como una primera señal de perturbación para el sistema que se ensaya; y
- (f) desplazar la señal de BMF seleccionada de la operación (d) durante una cantidad de tiempo de retardo de las muestras para crear una copia retardada de la señal de BMF seleccionada en la operación (e) para ser usada como una segunda señal de perturbación para ensayar el sistema.

2. Un método según la reivindicación 1, que comprende además las operaciones de:

- g) incrementar la cantidad de tiempo de retardo de las muestras;
- h) repetir las operaciones (f) y (g) para generar un conjunto de copias retardadas de la señal de BMF seleccionada que incluya una copia menos retardada de la señal de BMF seleccionada que el número predeterminado de variables de entrada del sistema.

3. Un método según la reivindicación 1, en el que:

la operación (b) incluye las operaciones de:

- b1) seleccionar un espectro de frecuencias de la señal de perturbación; y
- b2) generar la pluralidad de señales de BMF por medio de la optimización basada en la información de las operaciones (a) y (b1);

la operación (d) incluye las operaciones de:

- d1) seleccionar, basándose en la comparación entre los espectros de frecuencia de señales calculados en la operación (c) y el espectro de frecuencias de la señal de perturbación de la operación (b1), un conjunto de las señales de BMF de la operación (b2), conteniendo cada señal de BMF del conjunto seleccionado de señales de BMF de la operación (b2) sustancialmente el 100% de potencia útil; y

- d2) seleccionar una de las señales de BMF del conjunto de señales de BMF de la operación (d1), cuyo espectro de frecuencias coincide mejor con el espectro de frecuencia deseado seleccionado en la operación (b1); y,

la operación (f) incluye las operaciones de:

- f1) desplazar la señal de BMF seleccionada en la operación (d2) una cantidad de tiempo de retardo de las muestras de modo que la señal original esté casi no correlacionada estocásticamente durante un tiempo de establecimiento del sistema; y,

- f2) usar la señal generada en la operación (f1) como la segunda señal de perturbación.

4. Un método según la reivindicación 3, que comprende además las operaciones de:

- g) incrementar la cantidad de tiempo de retardo de las muestras;
- h) repetir las operaciones (f) y (g) para generar un conjunto de copias retardadas de la señal de BMF seleccionada que incluya una copia menos retardada de la señal de BMF seleccionada que el número predeterminado de variables de entrada del sistema.

5. Un método según las reivindicaciones 3 ó 4, en el que:

la operación (b1) incluye las operaciones de:

(b1a) seleccionar una ventana de frecuencia apropiada de control; y

5 (b1b) seleccionar una señal de perturbación de distribución de potencia sobre la ventana de frecuencia apropiada de control.

10 6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en el que cada una de los conjuntos de señales de BMF seleccionado en la operación (d1) tiene un factor de amplitud menor que un factor de amplitud predeterminado.

7. Aparato para producir señales de perturbación adaptable para excitar un número predeterminado de variables de entrada de un sistema, para ensayar el sistema con el propósito de obtener modelos para la síntesis de un controlador basado en los modelos, comprendiendo el aparato:

15 medios para proporcionar parámetros de entrada del sistema;

medios de generación de una pluralidad de señales de multifrecuencia binarias (BMF) basadas en los parámetros de entrada;

20 medios para calcular el espectro de frecuencias de las señales de BMF generadas;

medios para comparar el espectro de frecuencias de las señales de BMF generadas con un espectro de frecuencias deseado especificado por los parámetros de entrada;

25 medios para seleccionar una de las señales de BMF del conjunto de señales de BMF cuyo espectro de frecuencias es el que coincide mejor con el espectro de frecuencias deseado;

medios de utilización de una señal de BMF seleccionada como una primera señal de perturbación por el sistema de ensayo; y

30 medios para desplazar una señal de BMF seleccionada una cantidad de tiempo de retardo de las muestras para crear una copia retardada de la señal de BMF seleccionada ha de ser usada como una segunda señal de perturbación para ensayar el sistema.

35 8. Aparato según la reivindicación 7, que comprende además:

medios para incrementar la cantidad de tiempo de retardo de las muestras;

40 siendo los medios para incrementar el tiempo de retardo y los medios para desplazar la señal de BMF seleccionada, accionables repetidamente para generar un conjunto de copias retardadas de la señal de BMF seleccionada que incluyen una copia menos retardada de la señal de BMF seleccionada que el número predeterminado de variables de entrada del sistema.

45

50

55

60

65

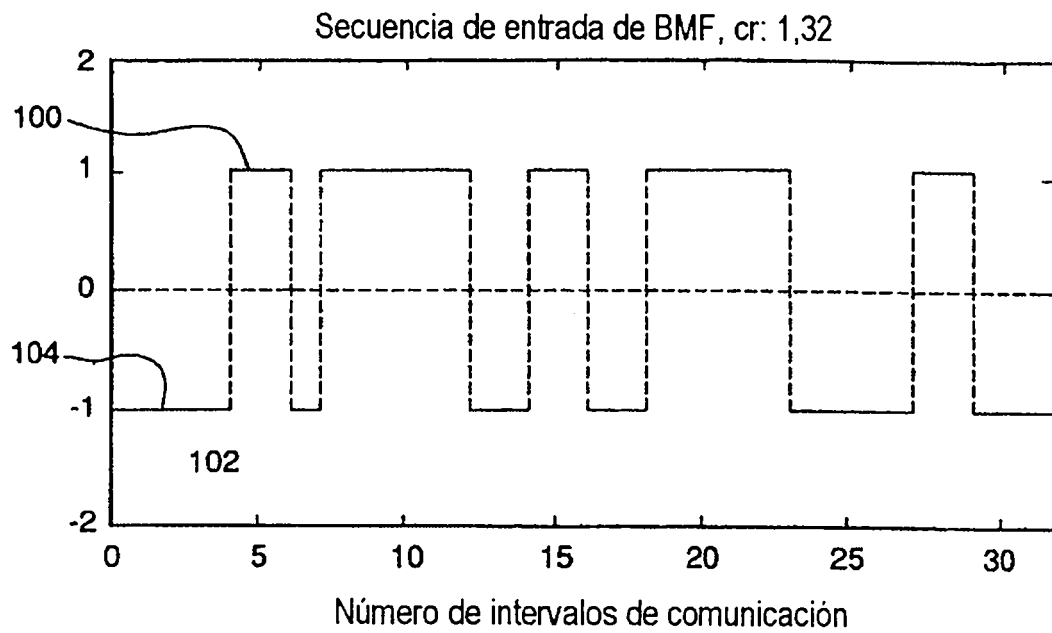


FIG. 1A

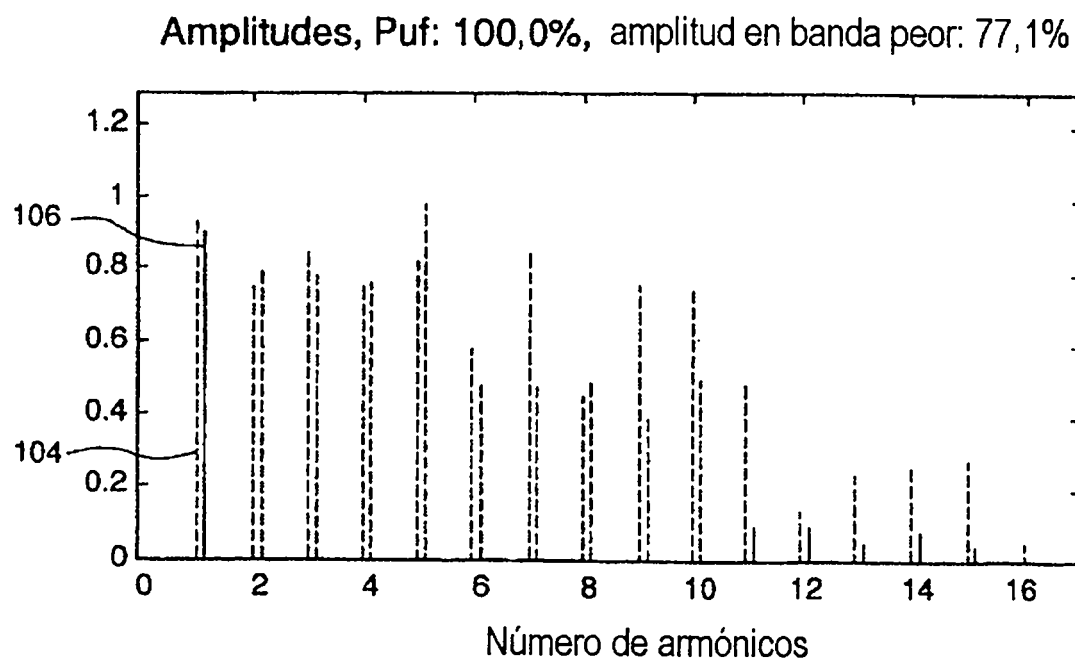


FIG. 1B

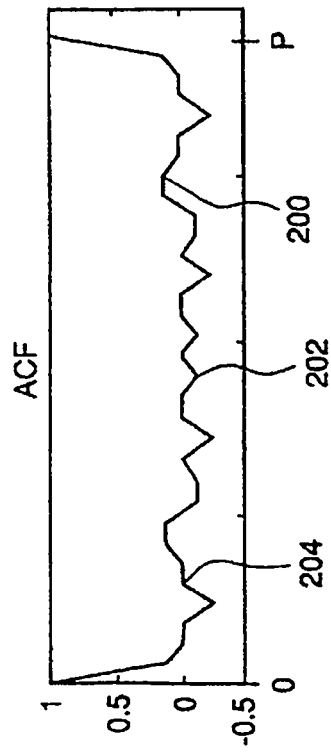


FIG. 2A

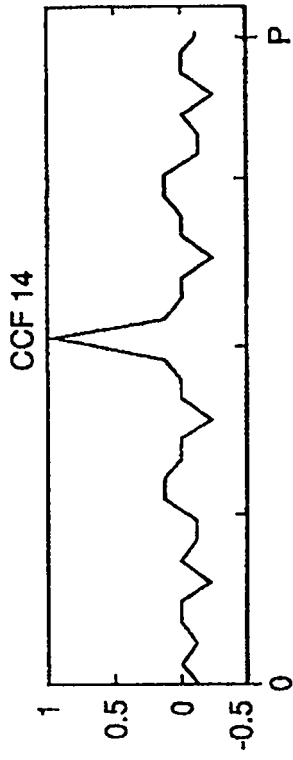


FIG. 2C

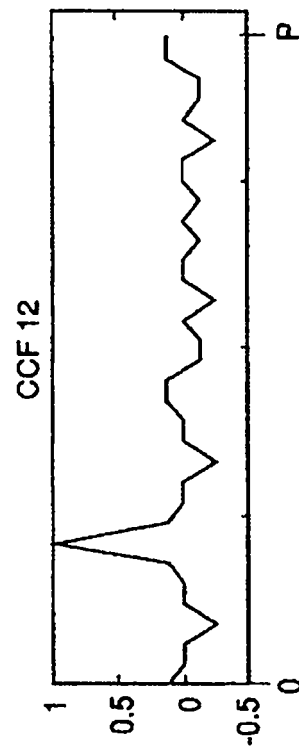


FIG. 2B

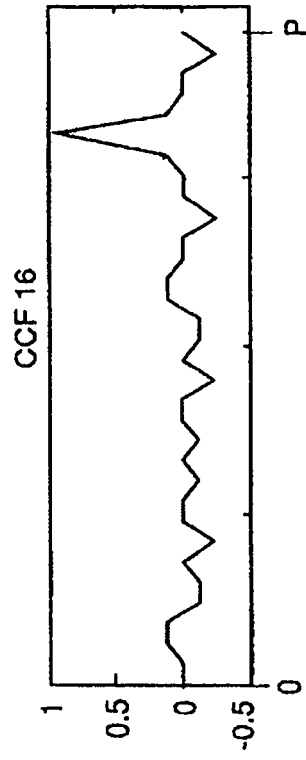


FIG. 2D

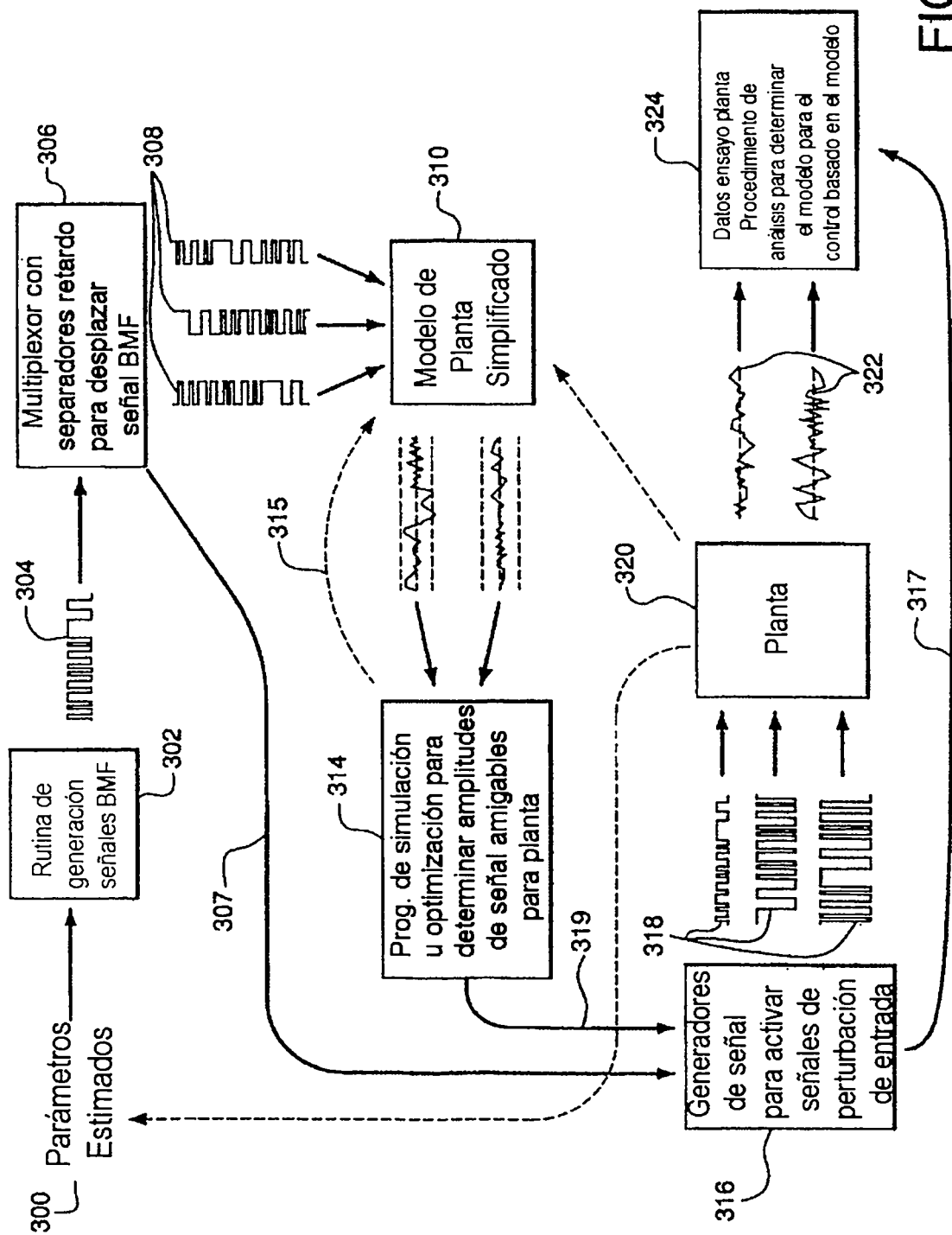


FIG. 3

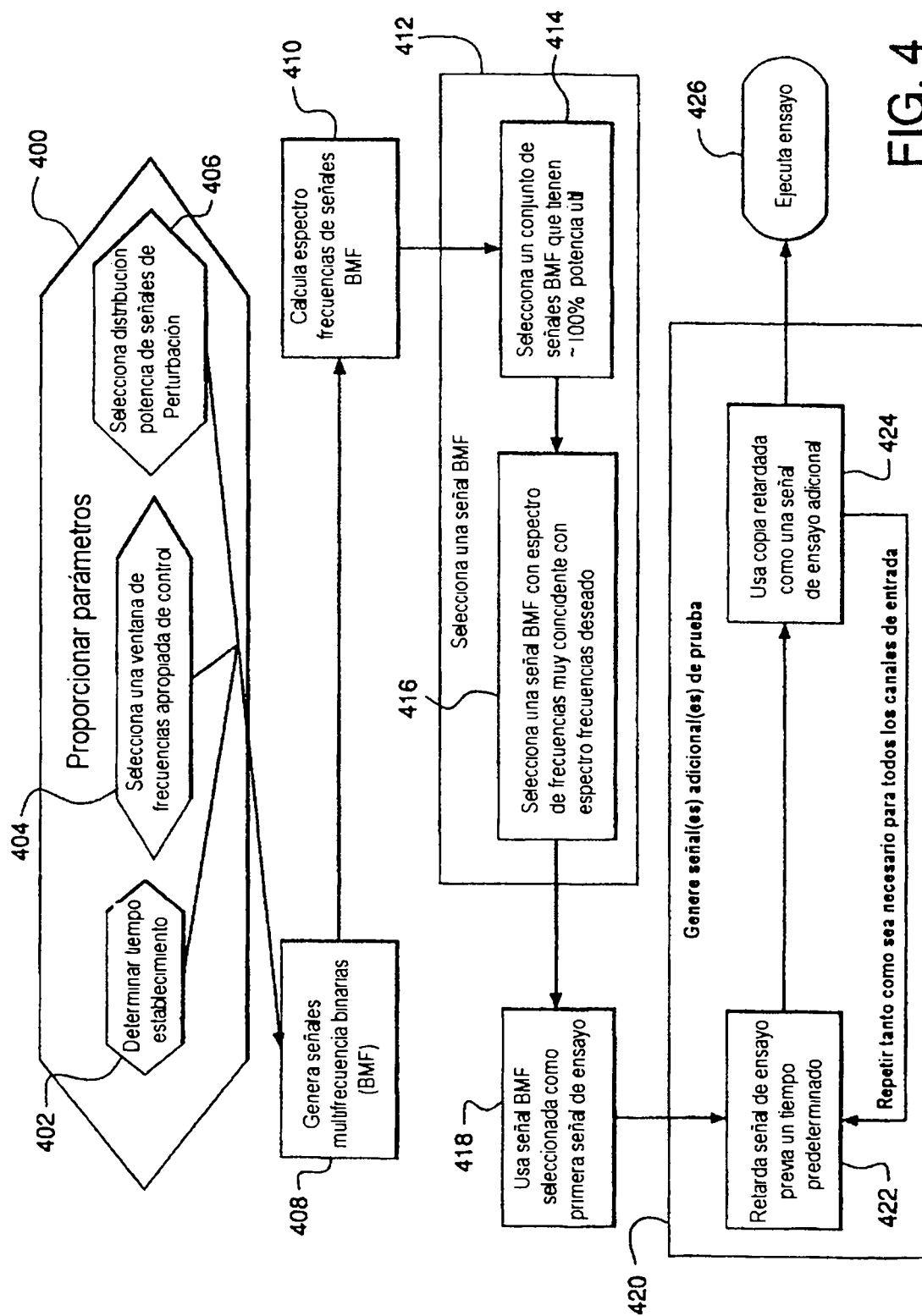


FIG. 4

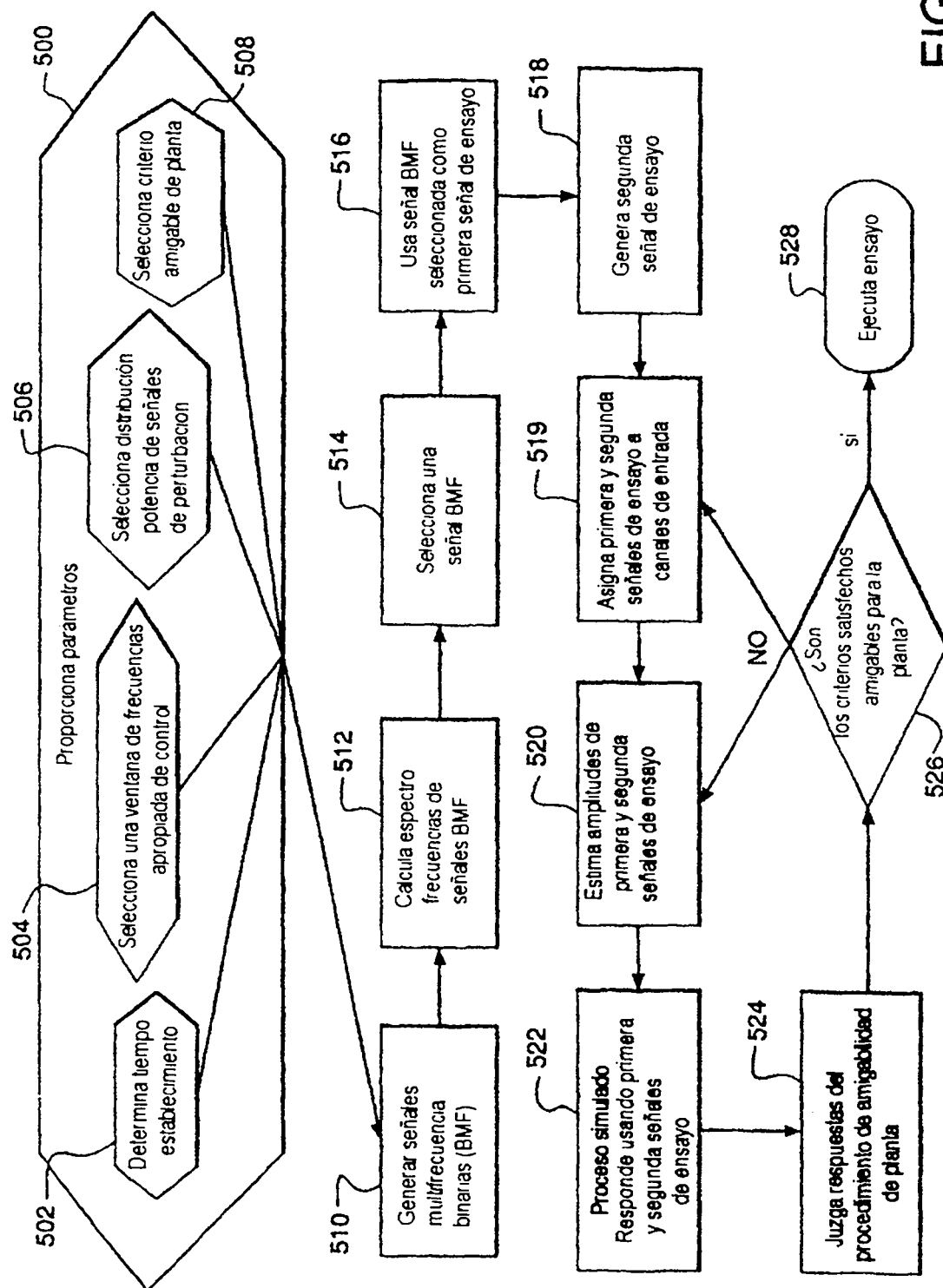


FIG. 5

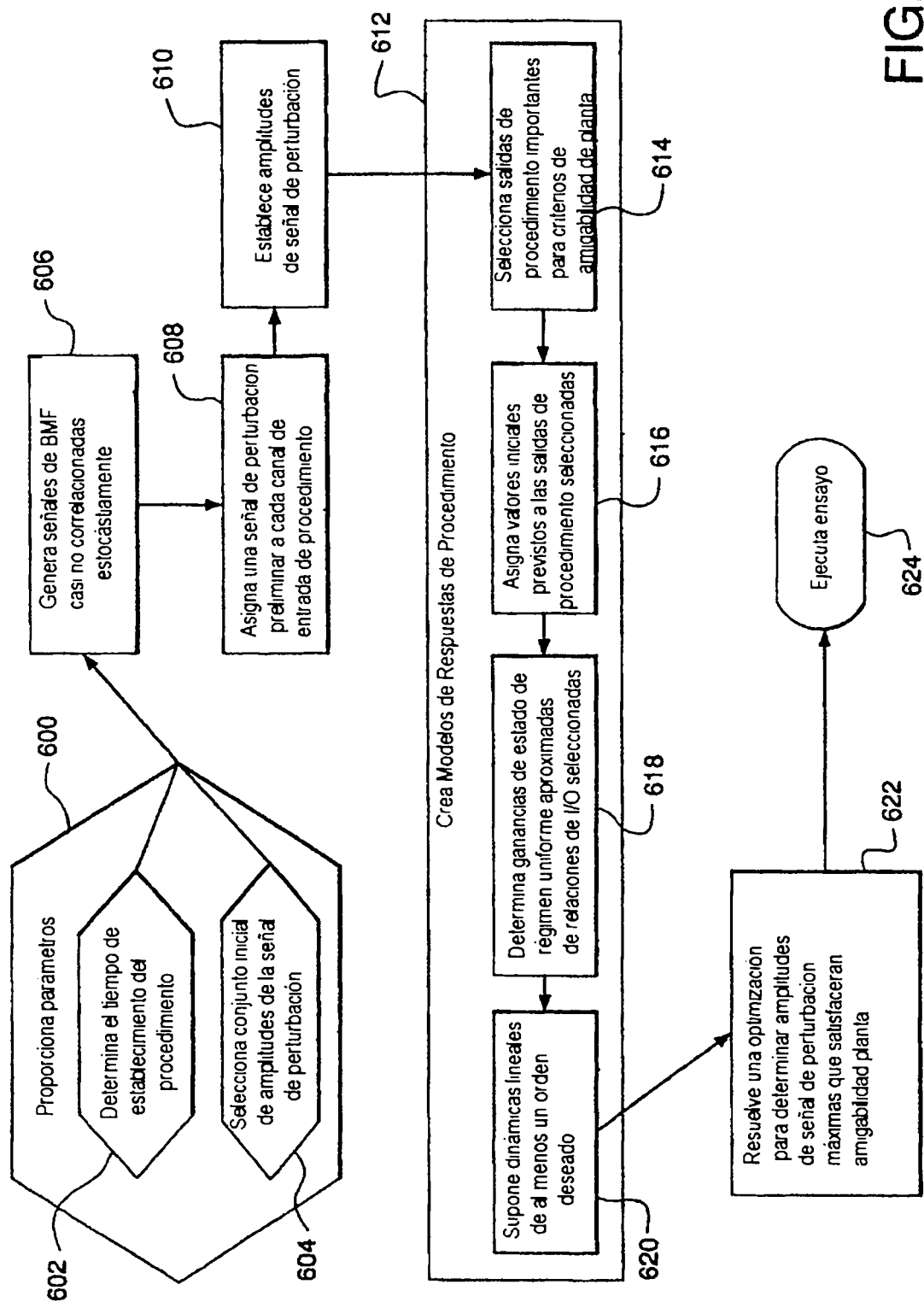


FIG. 6

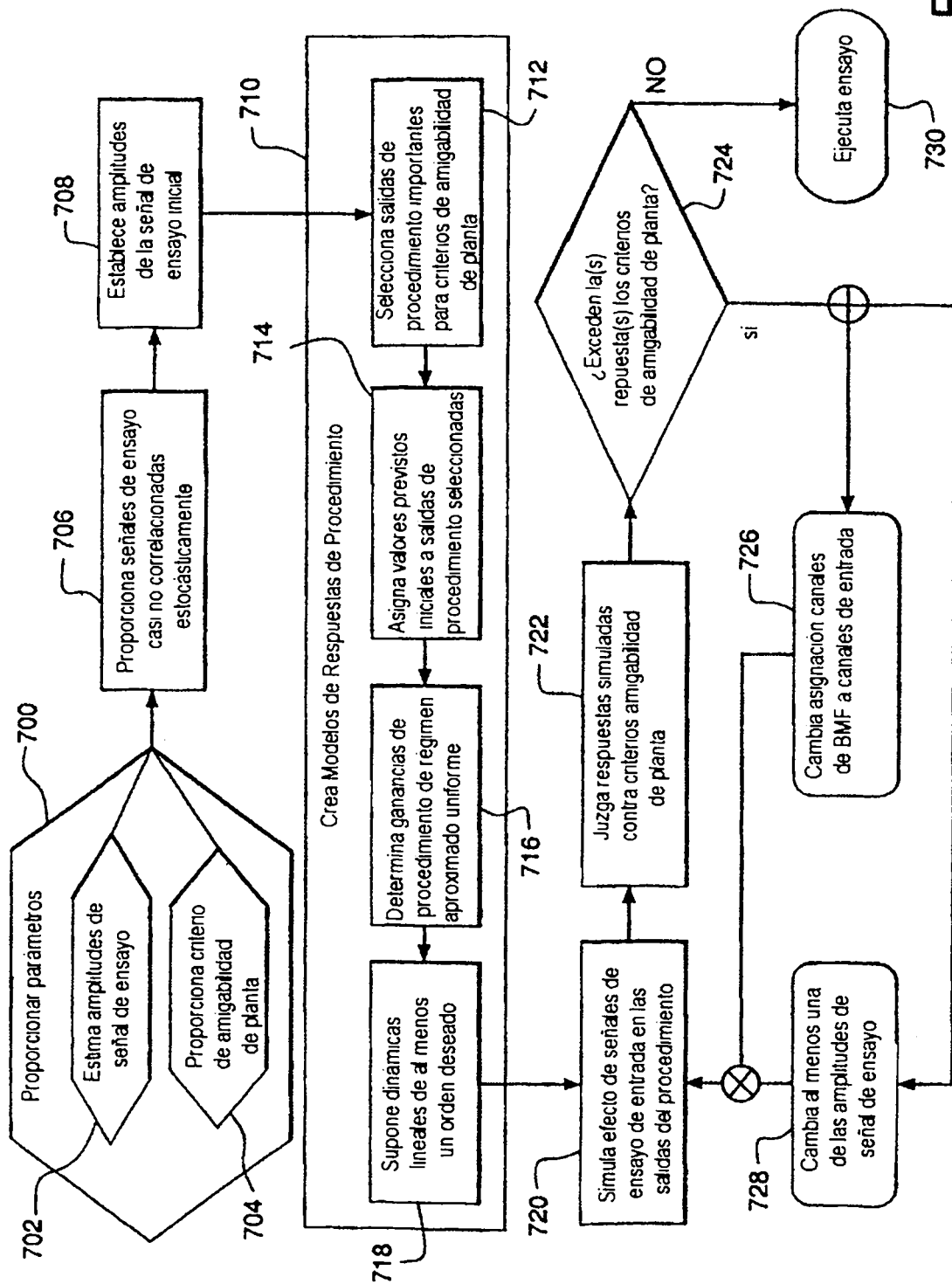


FIG. 7

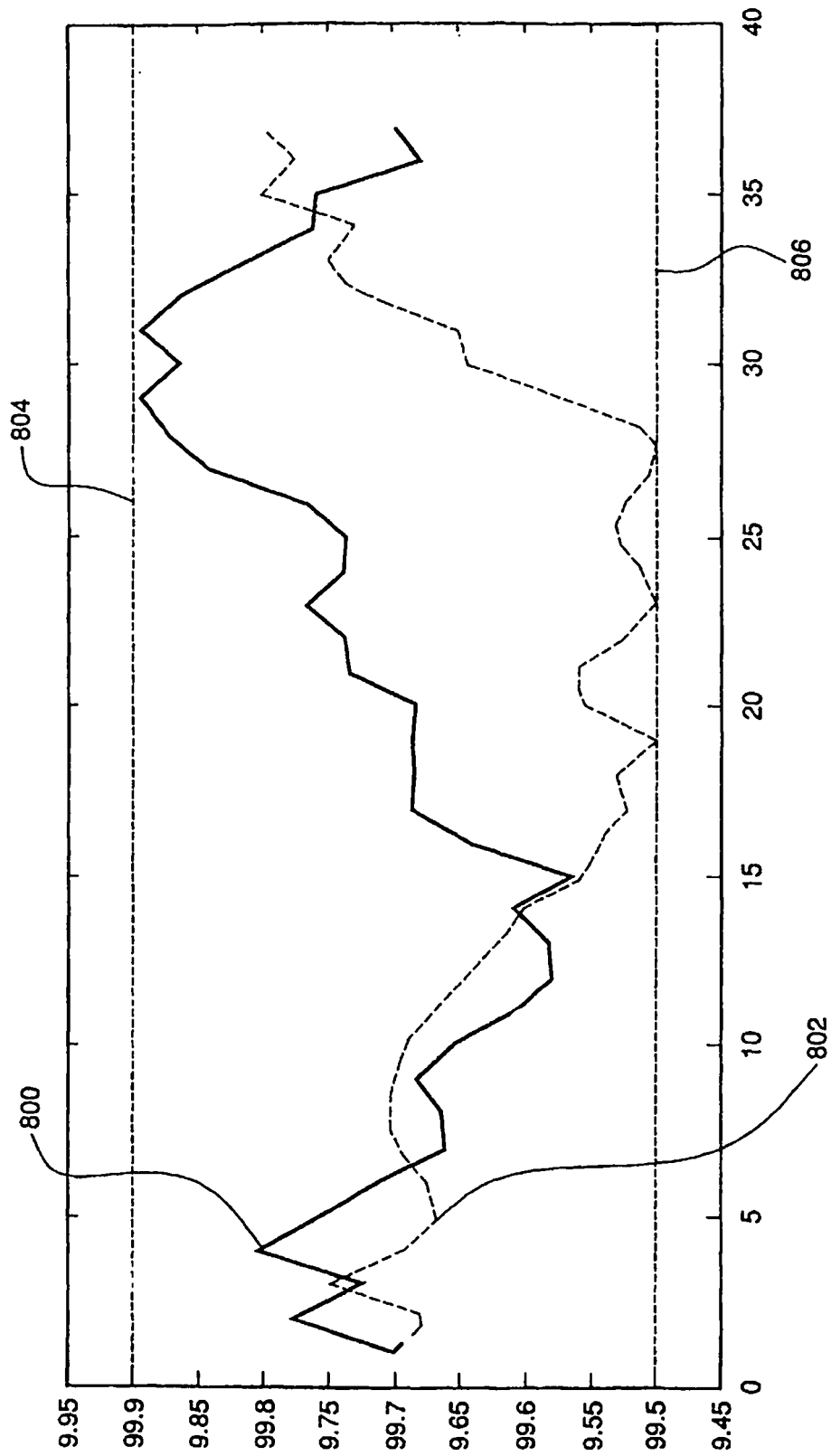


FIG. 8

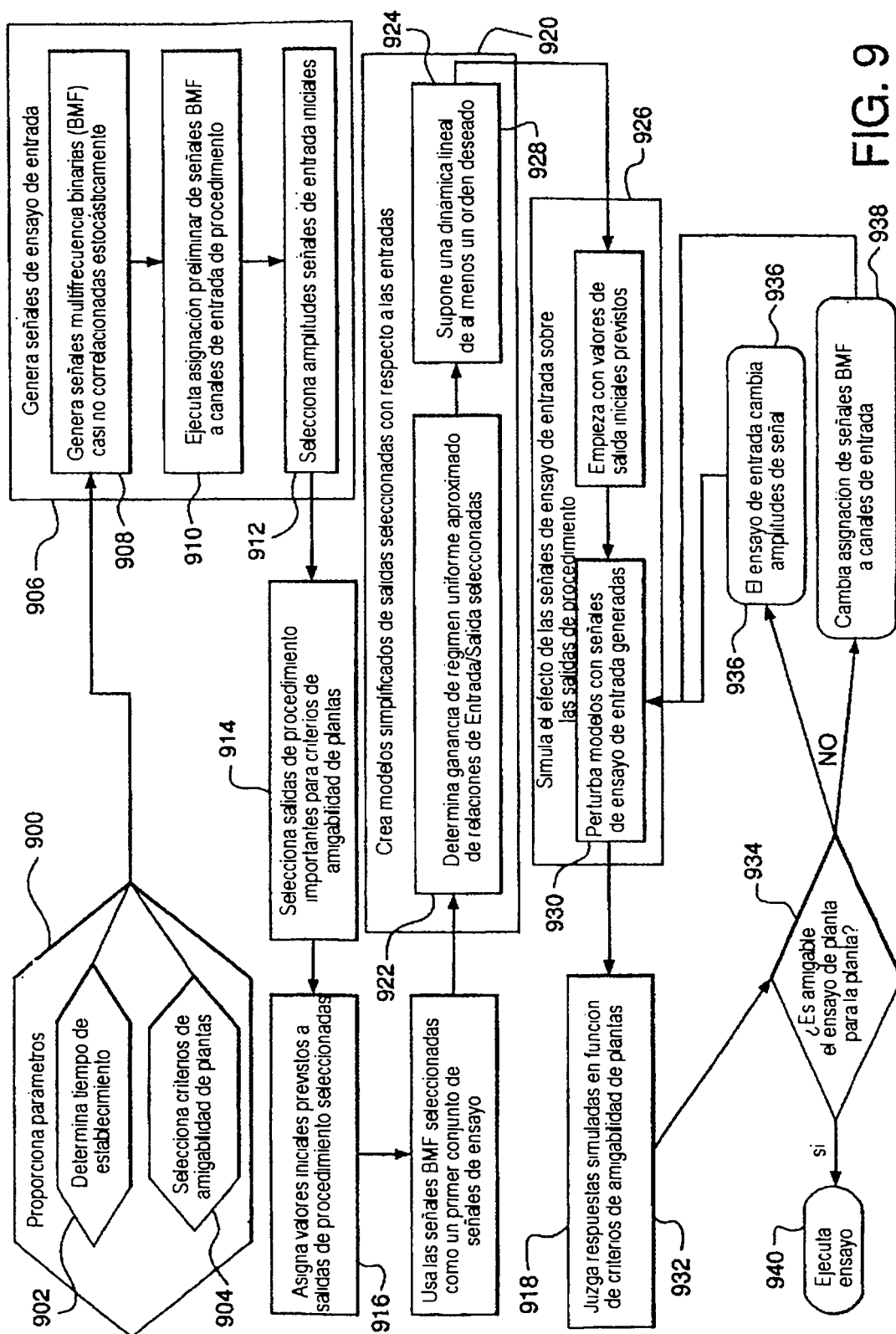


FIG. 9

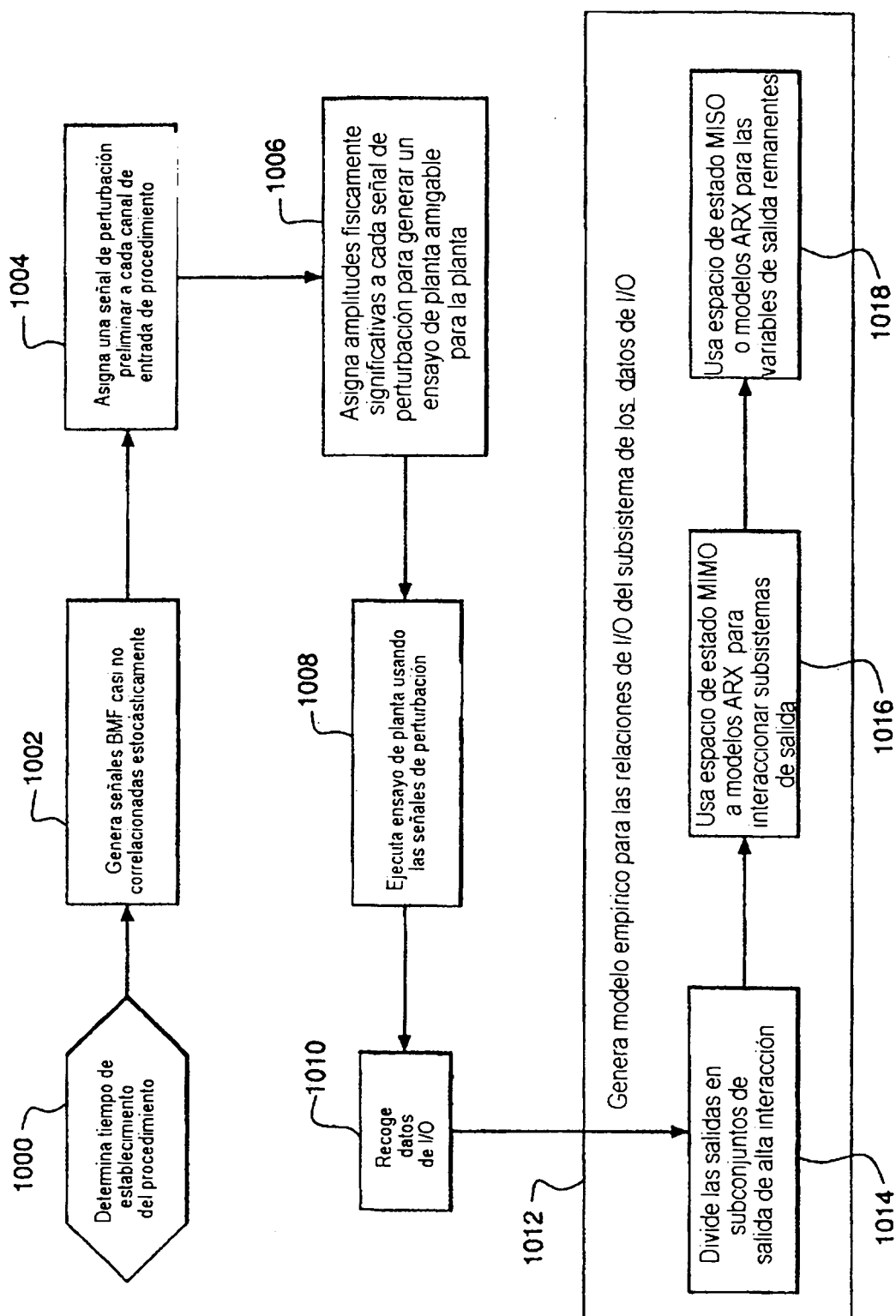


FIG. 10

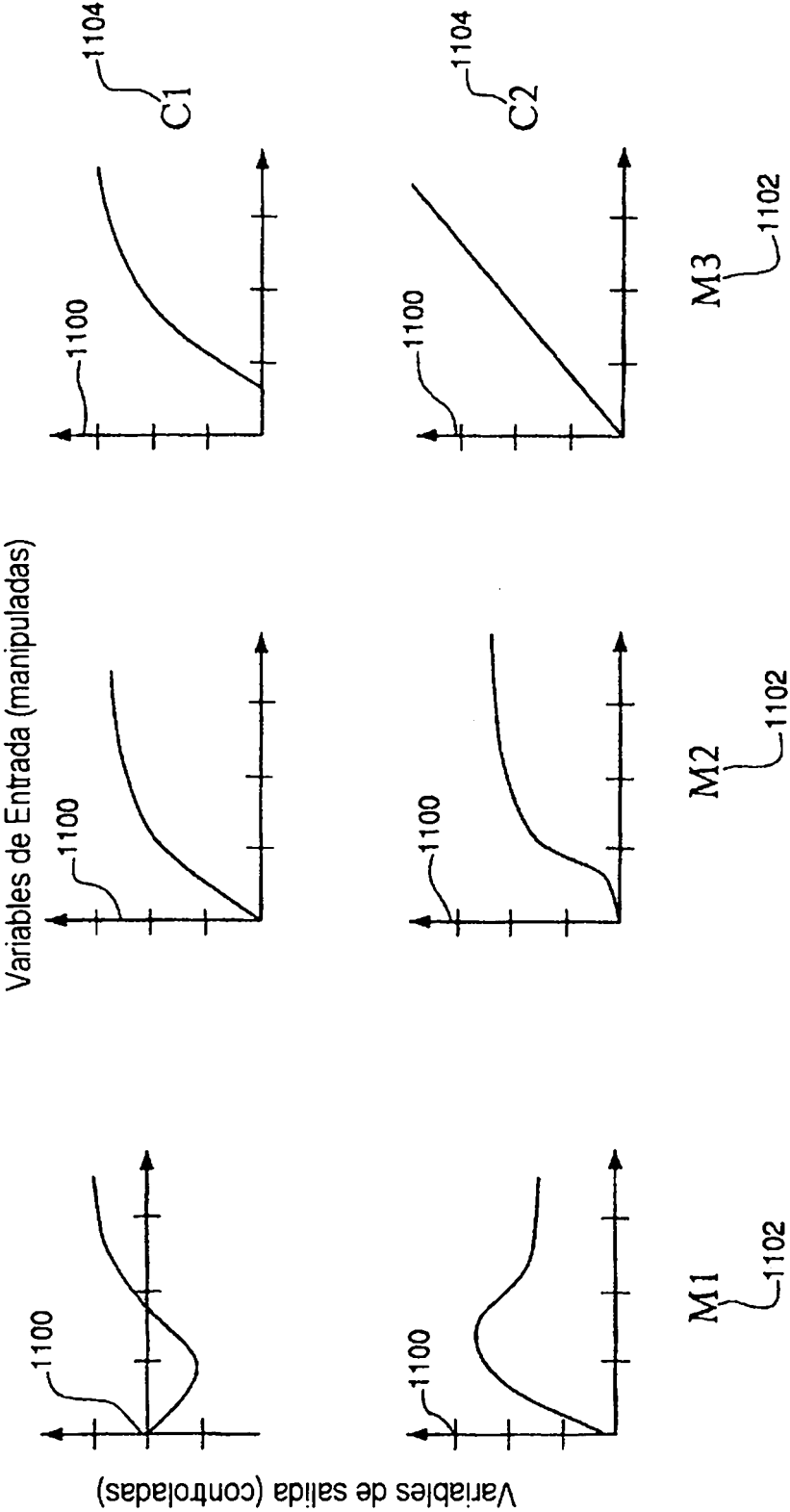


FIG. 11