

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 662 668**

51 Int. Cl.:

**G05B 13/04** (2006.01)

**G05B 11/42** (2006.01)

**H02P 9/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.02.2009 PCT/US2009/032834**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.08.2009 WO09097605**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.02.2009 E 09706546 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.12.2017 EP 2245732**

54 Título: **Sistema de control de excitación digital para un generador eléctrico y un procedimiento de uso asociado**

30 Prioridad:

**31.01.2008 US 23145**  
**31.07.2008 US 183781**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**09.04.2018**

73 Titular/es:

**BASLER ELECTRIC COMPANY (100.0%)**  
**Route 143 P.O. Box 269**  
**Highland, IL 62249, US**

72 Inventor/es:

**KIM, KIYONG;**  
**RAO, PRANESH y**  
**BURNWORTH, JEFF**

74 Agente/Representante:

**SALVA FERRER, Joan**

ES 2 662 668 T3

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

Sistema de control de excitación digital para un generador eléctrico y un procedimiento de uso asociado

## 5 REFERENCIA A OTRAS SOLICITUDES RELACIONADAS

**[0001]** Esta Solicitud de Patente Internacional reivindica prioridad a la Solicitud de Patente de los Estados Unidos Número de Serie 12/183.781, presentada el 31 de julio de 2008, y reivindica prioridad a la Solicitud de Patente de los Estados Unidos Número de Serie 12/023.145, presentada el 31 de enero de 2008.

10

## ANTECEDENTES DE LA INVENCION

**[0002]** Un generador eléctrico normalmente funciona haciendo girar una bobina de cable en relación con un campo magnético (o viceversa). En los generadores eléctricos modernos, este campo magnético se genera típicamente utilizando electroimanes conocidos como bobinas de campo. Una corriente eléctrica en estas bobinas de campo proporciona el campo magnético necesario para inducir una corriente eléctrica en la bobina del generador principal. La intensidad y voltaje de salida del generador principal depende de la corriente en las bobinas de campo. Por lo tanto, a medida que cambia la carga del generador, se debe ajustar la intensidad del campo magnético en un intento de mantener una salida del generador constante. Esto se logra mediante la regulación de la corriente en las bobinas de campo. Por lo tanto, es deseable regular continuamente la corriente en las bobinas de campo.

**[0003]** En muchos generadores eléctricos modernos, la corriente eléctrica en las bobinas de campo es proporcionada por un generador de excitación. Por lo tanto, el problema de regular la intensidad del campo del generador principal se logra normalmente regulando la salida del excitador del generador. El excitador puede incluir sus propias bobinas de campo del excitador, en cuyo caso la salida del excitador se puede controlar regulando la corriente suministrada a las bobinas de campo del excitador.

**[0004]** La salida de un regulador de voltaje puede proporcionar energía a las bobinas de campo de un excitador o generador. Por lo tanto, el regulador de voltaje puede usarse para controlar la salida de un excitador y, por lo tanto, controlar la salida de un generador principal. Un propósito importante de un regulador de voltaje es mantener la salida de un generador principal a un voltaje constante, conocido como el "punto de ajuste", en diversas condiciones. La diferencia entre el punto de ajuste y la salida del generador principal real es "error".

**[0005]** Se han propuesto muchos tipos diferentes de reguladores de voltaje para sistemas de excitación. Uno de los sistemas de regulación de voltaje modernos más populares utiliza un controlador Proporcional, Integral y Derivativo ("PID"). Un controlador PID monitorea la salida del generador y ajusta su propia salida dependiendo de la salida detectada del generador. Como su nombre lo indica, el controlador PID proporciona tres tipos de control: proporcional, integral y derivativo. El control proporcional responde en proporción al error. El control integral responde a la suma de errores previos. El control derivativo responde a la proporción de cambio del error.

**[0006]** Con referencia ahora a la figura 1, el diagrama de bloques básico de un bloque PID utilizado en el circuito de control del regulador de voltaje automático generalmente se indica con el número 10. Además del bloque PID 10, la ganancia del sistema de bucle  $K_G$  proporciona un término ajustable para compensar las variaciones en el voltaje de entrada del sistema a un puente de conversión de potencia. La función de transferencia  $G_c(s)$  del

controlador PID puede expresarse como 
$$G_c(s) = K_G \left( K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_D s} \right)$$
, donde  $K_G$  es ganancia de bucle,  $K_P$  es ganancia proporcional,  $K_I$  es ganancia integral,  $K_D$  es ganancia derivada,  $V_P$  es voltaje de entrada de potencia,  $T_D$  es una constante de tiempo de filtro derivada y "s" es el operador de Laplace.

**[0007]** El voltaje de referencia del generador  $V_{REF}$  12 se suma 16 con el voltaje detectado  $V_C$  14 para formar una señal de error de voltaje. Se multiplica por la ganancia de bucle  $K_G$  18. Esta señal escalada de error de voltaje se utiliza para generar tres términos con ganancias correspondientes, la ganancia proporcional  $K_P$  20, la ganancia integral  $K_I$  22 y la ganancia derivada  $K_D$  24. El término integral está limitado por un valor de suma superior de campo máximo forzando  $V_{RLMT}$  26 dividido por voltaje de entrada de potencia  $V_P$  28. El término integral y el término derivado se suman juntos 30 y luego esta suma se suma 32 con el término proporcional. Este valor sumado 32 se multiplica por la tensión de entrada de potencia  $V_P$  34 para proporcionar la salida del regulador de voltaje  $V_R$  36.

- [0008]** Los pesos relativos de estos tres tipos de control en un controlador PID se deben establecer para un control preciso de la salida del generador. Elegir estos pesos relativos se conoce como "ajuste" del controlador PID. El objetivo es lograr un sistema de excitación "rápido" que responda a una perturbación llevando rápidamente la salida del generador al punto establecido. Un sistema de excitación ideal logra el punto de referencia con el menor sobreimpulso y subimpulso posible. El sobreimpulso ocurre cuando el controlador proporciona demasiada corriente, causando un "pico" en la salida del generador principal. El subimpulso ocurre cuando el controlador proporciona muy poca corriente, causando un "valle" en la salida del generador principal. Un controlador PID mal ajustado dará como resultado un bajo rendimiento, por ejemplo, sobreimpulso, subimpulso o tiempo de respuesta lento. Un sistema de excitación bien ajustado ofrece beneficios en el rendimiento operativo general respondiendo rápidamente a condiciones transitorias como fallos del sistema, perturbaciones y arranque del motor. Después de un fallo, un sistema de excitación rápida mejorará la estabilidad transitoria al mantener el voltaje del sistema y proporcionar una amortiguación positiva a las oscilaciones del sistema. Un sistema de excitación bien ajustado minimizará el sobreimpulso de tensión después de una perturbación y evitará la molesta disyunción de los circuitos de protección del generador. Cuando un motor es alimentado por un generador, el motor presenta una carga grande mientras el motor está arrancando, lo que puede ocasionar que el voltaje de salida del generador disminuya. Una caída en el voltaje de salida del generador puede causar daños al motor ya que el motor aumentará su consumo de corriente y se calentará debido al calentamiento resistivo dentro del motor. Durante el arranque del motor, un sistema de excitación rápida minimizará la caída de voltaje del generador y reducirá las pérdidas por calentamiento del motor.
- [0009]** Las ganancias del controlador se determinan usando varios parámetros del sistema de excitación, tales como ganancia de bucle de voltaje, constantes de tiempo de circuito abierto, y demás. Estos parámetros varían no solo con las condiciones de carga del sistema, como se ilustra generalmente con el número 38 en la figura 2, sino también con las ganancias dependientes de la configuración del sistema, tales como el voltaje de entrada.
- [0010]** En general, dado que el cálculo de la ganancia de bucle requiere varios parámetros del sistema de excitación que generalmente no están disponibles durante la puesta en marcha, por ejemplo, específicamente la constante de tiempo de la máquina, esta falta de información aumenta el tiempo de puesta en marcha. Muchas veces no hay acceso al equipo real, sino solo a la hoja de datos del fabricante o a un conjunto de datos típico. Para este caso, la única medida disponible para verificar el rendimiento del sistema de excitación es la respuesta combinada de excitador y generador como se ilustra generalmente con el número 40 en la figura 3. Bajo estas condiciones, la puesta en servicio de un nuevo regulador de voltaje se convierte en una tarea difícil.
- [0011]** Un procedimiento para ajustar el controlador PID es por ensayo- error. El ensayo-error es tedioso y aumenta significativamente el tiempo de puesta en marcha. En consecuencia, se han propuesto varios algoritmos automáticos de "autoajuste".
- [0012]** Una dificultad en la regulación de la salida de voltaje de un generador surge debido a las propiedades inductivas de una bobina de alambre, como un inductor de bobina. Dado que el sistema de excitación y el generador contienen bobinas inductivas, existe un retraso de tiempo entre un cambio en la tensión de salida del regulador de voltaje y el cambio correspondiente en la tensión de salida del generador. La duración de este retraso está determinada por la "constante de tiempo". Las constantes de tiempo principales que nos ocupan son la constante de tiempo del excitador y la constante de tiempo del generador. En la presente invención, estas constantes de tiempo se estiman y se tienen en cuenta cuando se sintoniza el controlador PID, logrando así un rendimiento mejorado.
- [0013]** Además, los reguladores de voltaje digitales actuales están diseñados para lograr una precisión de regulación de aproximadamente 0.25 % a la tensión nominal. La precisión de un regulador de voltaje digital está determinada principalmente por el error de truncamiento en un convertidor analógico/digital ("AD") y el ruido térmico en los circuitos de interfaz. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. ("IEEE") El estándar 421.5 recomienda dos por ciento (2 %) de respuestas escaladas para probar o analizar el rendimiento de un circuito de control de excitación. Por lo tanto, los voltajes del generador debido a una pequeña perturbación en la excitación se miden con una relación señal/ruido muy baja. Por ejemplo, la precisión relativa de una prueba de respuesta escalada del dos por ciento (2 %) se convierte en un error de medición del diez por ciento (10 %). Por lo tanto, en este caso, es difícil identificar las constantes de tiempo del excitador y el generador. Los experimentos muestran una velocidad de convergencia muy lenta en la identificación, que es mucho más lenta que los requisitos actuales del sistema de excitación rápida.
- [0014]** La presente invención está dirigida a superar uno o más de los problemas expuestos anteriormente.

## RESUMEN DE LA INVENCION

**[0015]** Se describe un algoritmo automático para ajustar un controlador PID utilizando un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos con un factor de olvido. En el presente documento se describe un nuevo algoritmo para estimar las constantes de tiempo de excitador y generador.

5

**[0016]** En una realización, las ganancias de PID calculadas se fijan durante la puesta en servicio. No se realiza ningún ajuste adicional durante el funcionamiento normal. El beneficio de este enfoque es que no se necesita supervisión para evitar respuestas indeseables causadas por un comportamiento transitorio de la estimación de ganancia PID.

10

**[0017]** En una realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador que está excitado eléctricamente por el excitador y un procesador que proporciona un controlador PID que calcula la ganancia del sistema, una constante de tiempo del excitador estimada y una constante de tiempo estimada del generador usando un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados con factor de olvido, en el que la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador se utilizan para calcular las ganancias PID por parte del procesador.

15

**[0018]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador que está excitado eléctricamente por el excitador y un procesador que proporciona un controlador PID que calcula la ganancia del sistema, una constante de tiempo del excitador estimada y una constante de tiempo estimada del generador con un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados con factor de olvido, donde la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador se utilizan para calcular las ganancias PID del procesador, donde el procesador incluye un generador de entrada aleatorio que se suma a la salida del controlador PID como entrada para determinar las ganancias de PID utilizando la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador, y el procesador compara un valor digital de la tensión del generador rms con un voltaje de referencia como entrada en el controlador PID.

20

25

30

**[0019]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador que recibe energía eléctrica del excitador, un primer procesador que proporciona un controlador PID que calcula la ganancia del sistema, una constante de tiempo del excitador estimada y una constante de tiempo estimada del generador con un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados con factor de olvido, donde la constante de tiempo del excitador estimada y la constante de tiempo estimada del generador se utilizan para calcular las ganancias PID del primer procesador, donde el procesador incluye un generador de entrada aleatorio que se suma a la salida del controlador PID como entrada para determinar las ganancias PID utilizando la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador y el primer procesador compara un valor digital de voltaje de generador rms con un voltaje de referencia como entrada en el controlador PID, un segundo procesador controla un modo de autoajuste y obtiene el estado operativo al obtener la constante de tiempo estimada de excitación, la constante de tiempo estimada del generador y las ganancias PID del primer procesador a través de un enlace de comunicaciones, y una pantalla electrónica que está conectada eléctricamente al segundo procesador para mostrar al menos uno de los estados operativos, funciones de diagnóstico, ganancia del sistema, la constante estimada de tiempo del excitador, la constante de tiempo estimada del generador y una respuesta escalada con monitoreo en tiempo real.

35

40

45

**[0020]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El procedimiento incluye calcular la ganancia del sistema con un procesador que también funciona como un controlador PID, calcular una constante de tiempo estimada del excitador y una constante de tiempo estimada del generador con un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados con factor de olvido con el procesador, utilizando la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador para calcular las ganancias de PID con el procesador, autoajustando las ganancias de PID, con el procesador, para controlar el voltaje de campo del excitador a un excitador, donde el excitador está conectado eléctricamente a la fuente de alimentación y un generador se energiza eléctricamente por el excitador.

50

55

**[0021]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El procedimiento incluye calcular la ganancia del sistema con un primer procesador que también opera como un controlador PID, calcular una constante de tiempo estimada del excitador y una constante

de tiempo estimada del generador con un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados con factor de olvido con el primer procesador, utilizando la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador para calcular las ganancias PID con el primer procesador, autoajustando las ganancias PID, con el primer procesador, para controlar el voltaje del campo del excitador a un excitador, donde el excitador está conectado eléctricamente a la fuente de alimentación y un generador es energizado eléctricamente por el excitador, controlando un modo autoajutable y obteniendo el estado operativo mientras se obtiene la constante de tiempo estimada del excitador, la constante de tiempo estimada del generador y las ganancias PID del primer procesador a través de un enlace de comunicaciones con un segundo procesador y mostrando al menos uno del estado de funcionamiento, las funciones de diagnóstico, la ganancia del sistema, la constante de tiempo estimada del excitador, la constante de tiempo estimada del generador y una respuesta escalada con monitoreo en tiempo real en una pantalla electrónica que está conectada eléctricamente al segundo procesador.

**[0022]** Una realización de la presente invención se refiere a un algoritmo automático para sintonizar un controlador PID usando una técnica de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).

**[0023]** En otra realización, la técnica de PSO se usa para estimar constantes de tiempo para un excitador y generador en un sistema de excitación.

**[0024]** En otra realización más, el excitador estimado y las constantes de tiempo del generador se usan para calcular las ganancias de PID (ganancia proporcional  $K_P$ , ganancia integral  $K_I$  y ganancia derivada  $K_D$ ).

**[0025]** En otra realización más, las ganancias PID calculadas se fijan durante la puesta en servicio. No se realiza ningún ajuste adicional durante el funcionamiento normal. El beneficio de este enfoque es que no se necesita supervisión para evitar respuestas indeseables causadas por un comportamiento transitorio de la estimación de ganancia PID.

**[0026]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador que recibe energía eléctrica del excitador y un procesador que proporciona un controlador PID que calcula una constante de tiempo estimada del excitador y una constante de tiempo estimada del generador utilizando la optimización por enjambre de partículas para controlar el voltaje de campo del excitador.

**[0027]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador de PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador energizado eléctricamente por el excitador, y un procesador que suministra un controlador PID que lleva a cabo un sistema de respuesta escalada incrementando la referencia de voltaje en un porcentaje predeterminado durante un periodo de tiempo predeterminado, inicializa cada posición de partícula de constante de tiempo del excitador y constante de tiempo del generador, calcula el voltaje del generador, evalúa la capacidad y después obtiene y actualiza los mejores valores y entonces repite el cálculo del voltaje del generador, la evaluación de capacidad y los mejores valores en un número determinado de iteraciones.

**[0028]** En otra realización, se describe un sistema de autoajuste de un controlador de PID utilizado con un excitador y un generador. El sistema incluye una fuente de alimentación, un excitador conectado eléctricamente a la fuente de alimentación, un generador que recibe energía eléctrica del excitador, un primer procesador que proporciona un controlador PID con una combinación de un voltaje de referencia, una respuesta de paso del sistema aumentando el voltaje de referencia en un porcentaje predeterminado durante un período de tiempo predeterminado y un voltaje calculado del generador; y un segundo procesador que recibe la respuesta escalada del sistema y la tensión calculada del generador a través de un enlace de comunicaciones y luego compara una simulación de una respuesta escalada usando la respuesta escalada del sistema y la respuesta escalada medida por un regulador de voltaje y luego realiza un ajuste utilizando optimización de enjambre de partículas que luego se proporciona a la simulación de una respuesta escalada y también se utiliza para calcular una constante de tiempo de excitador estimada, una constante de tiempo estimada del generador y ganancias PID, que luego se proporcionan a través del enlace de comunicaciones al primer procesador, en donde el segundo procesador controla un modo de autoajuste y obtiene el estado operativo, que incluye al menos una de la constante de tiempo del excitador estimada, la constante de tiempo estimada del generador y las ganancias PID, y una pantalla electrónica que está conectada eléctricamente al segundo procesador para mostrar al menos uno de los estados operativos, una función de diagnóstico, la constante de tiempo estimada del excitador, la constante de tiempo estimada del generador y las ganancias PID con monitoreo en tiempo real.

**[0029]** En otra realización, se describe un sistema para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador y un generador. El procedimiento incluye calcular una constante de tiempo estimada del excitador y una constante de tiempo estimada del generador con optimización de enjambre de partículas con un procesador que proporciona un controlador PID y utilizar la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador para calcular las ganancias PID con el procesador para controlar el voltaje de campo del excitador a un excitador, en el que el excitador está conectado eléctricamente a la fuente de alimentación y un generador recibe energía eléctrica del excitador.

**[0030]** Estos son simplemente algunos de los innumerables aspectos de la presente invención y no deberían considerarse una lista exhaustiva de los innumerables aspectos asociados con la presente invención.

**[0031]** Por lo tanto, la técnica anterior proporciona antecedentes técnicos para esta descripción. "Un enfoque de optimización de enjambre de partículas para un diseño óptimo del controlador PID en el sistema AVR", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 19 No. 2, junio de 2004, por Zwe-Lee Gaing describe un Enfoque de Optimización de Enjambre de Partículas para optimizar tres parámetros del controlador de un controlador PID en un regulador de voltaje, basado en modelos linealizados de un controlador PID, un amplificador, un excitador, un generador, y un sensor, basado en varios criterios de rendimiento de dominio de tiempo. "Identificación y control no lineales de un turbogenerador: un enfoque programado en línea de múltiples modelos/controladores", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 20 No. 1, marzo de 2005, por Ren Lixin, George Irwin y Damian Flynn, describe un enfoque para el diseño de un AVR, que incluye múltiples controladores PID, para el control no lineal de la salida del terminal de un turbogenerador, mediante la regulación del campo de excitación del turbogenerador. Cada una de estas dos referencias de Gaing y Flynn y otros, muestran la necesidad de un sistema/procedimiento, tal como el descrito aquí.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

**[0032]** Para una mejor comprensión de la presente invención, se puede hacer referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 representa una representación en diagrama de bloques de un controlador PID utilizado en un regulador de voltaje automático;

La figura 2 es una representación gráfica de una curva de saturación del generador que ilustra la ganancia del generador;

La figura 3 es una representación gráfica de un desplazamiento de fase en grados para un campo de excitación, un campo de generador y la suma del desplazamiento de fase para el campo del excitador y el campo del generador en relación con la frecuencia de oscilación máquina/regulador;

La figura 4 representa una representación de diagrama de bloques para un algoritmo de estimación que se basa tanto en la dinámica del excitador como en la del generador;

La figura 5 representa una representación en diagrama de bloques de un sistema de control de excitación simplificado con reguladores de voltaje automáticos;

La figura 6 es un diagrama de flujo para el proceso global de una realización ejemplar para calcular ganancias PID;

La figura 7 es un diagrama de flujo para un algoritmo de estimación basado en la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO);

La figura 8 es un análisis detallado para el paso de calcular la respuesta escalada de un modelo con la posición de partícula seleccionada (cálculo de la tensión del generador), es decir, la etapa de proceso <418>, de la figura 7;

La figura 9 representa una representación de diagrama de bloques para la identificación que utiliza la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO);

La figura 10 muestra un diagrama de bloques de una realización ejemplar de la presente invención que utiliza al menos un procesador, entrada/salida, un excitador, un generador y una fuente de alimentación asociada;

La figura 11 muestra un diagrama de bloques de una realización ejemplar de la presente invención que utiliza al menos un procesador, entrada/salida, un excitador, un generador y una fuente de alimentación asociada;

La figura 12 es una interfaz gráfica de usuario que muestra la estimación de la ganancia de bucle;

La figura 13 es una interfaz gráfica de usuario que muestra la estimación de las constantes de tiempo;

La figura 14 es una interfaz gráfica de usuario que muestra una respuesta automática del regulador de voltaje con valores por defecto;

La figura 15 es una interfaz gráfica de usuario que muestra ganancias PID autoajustadas;

La figura 16 representa una representación de diagrama de bloques para la linealización por retroalimentación de un sistema de control de autoexcitación;

La figura 17 es una interfaz gráfica de usuario que muestra la estimación de las constantes de tiempo;

La figura 18 es una interfaz gráfica de usuario que muestra una respuesta escalonada con ganancias PID

calculadas;

- La figura 19 es una comparación de constantes de tiempo, es decir,  $T_{do}$  y  $T_e$ , para el Mínimo Cuadrado Recursivo ("RLS") con linealización mediante retroalimentación en comparación con la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") con una entrada de potencia externa, para una entrada de potencia autoexcitada; y un caso de derivación con ruido, es decir, un error relativo del 10 % en la tensión del generador;
- La figura 20 es una comparación gráfica de la respuesta medida frente a la estimada para la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") para la tensión del generador a lo largo del tiempo;
- La figura 21 es una interfaz gráfica de usuario que muestra una respuesta automática del regulador de voltaje con valores por defecto;
- 10 La figura 22 es una interfaz gráfica de usuario que muestra ganancias PID autoajustadas; y
- La figura 23 es una interfaz gráfica de usuario que muestra la respuesta escalonada de un grupo electrógeno de turbina de gas.

### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

- 15 **[0033]** En la siguiente descripción detallada, se exponen numerosos detalles específicos a modo de ejemplo para proporcionar una comprensión completa de la invención. Sin embargo, los expertos en la técnica entenderán que la presente invención se puede poner en práctica sin estos detalles específicos, o con diversas modificaciones de los detalles. En otros casos, los procedimientos, procedimientos y componentes bien conocidos no se han descrito en detalle para no oscurecer la presente invención.

**[0034]** Un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos autoajutable se representa de la siguiente manera:

$K_s$  representa la ganancia del sistema.

- 25  $T_E$  representa la constante de tiempo del excitador.  
 $T'_{do}$  representa la constante de tiempo del generador.

**[0035]** La función de transferencia de plantas  $G(s)$  se puede expresar como:

$$G(s) = K_s \left( \frac{1}{1 + sT_E} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right)$$

30

**[0036]** Cuando  $y(k)$  representa el voltaje de salida del generador en la muestra de tiempo  $k$  y  $u(k)$  representa el voltaje de salida del regulador en la muestra de tiempo  $k$ , entonces la salida del generador se puede expresar de forma:

35

$$y(k) = a_0 + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2)$$

- [0037]** En la estimación recursiva de mínimos cuadrados, los parámetros desconocidos de un modelo lineal se eligen de tal manera que la suma de los errores al cuadrado entre la tensión del generador realmente observada y la calculada ( $y(k)$ ) es un mínimo.

40

**[0038]** Cuando  $\alpha = [a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2 \ 1]$  y  $\phi^T(k) = [y(k-1) \ y(k-2) \ u(k-1) \ u(k-2) \ 1]$  entonces:

$$E(\alpha, n) = \sum_{k=1}^n \lambda \left( y(k) - \phi^T(k) \alpha \right)^2$$

45

Resolviendo para el parámetro del sistema  $\alpha$  obtenemos:

$$\hat{\alpha}(k) = \left( \sum_{k=1}^n \phi(k)\phi^T(k) \right)^{-1} \left( \sum_{k=1}^n \phi(k)y(k) \right)$$

La forma recursiva de la ecuación anterior está dada por:

$$L_k = P_{k-1} - P_{k-1}\phi_k \left[ \phi_k^T k P_{k-1} \phi_k + \lambda \right]^{-1}$$

$$P_k = \frac{1}{\lambda} \left( I - L_k \phi_k^T k \right) P_{k-1}$$

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1} + L_k \left[ y_k - \phi_k^T k \hat{\alpha}_{k-1} \right]$$

5

donde  $\lambda$  es un factor de olvido.

**[0039]** Con referencia ahora a la figura 4, un diagrama de bloques del esquema de mínimos cuadrados  
 10 recursivos generalmente se indica mediante el número 42. Se utiliza el sistema de control de circuito cerrado con un  
 controlador de ganancia proporcional ("P") 48. Esto proporciona un funcionamiento estable en la región lineal en  
 lugar de la región de saturación. Se proporciona una entrada aleatoria 52 que opera como una perturbación que se  
 suma 54 con la salida de voltaje del controlador Vc 50 del controlador de ganancia proporcional ("P") 48. Esta suma  
 15 54 se proporciona como entrada para calcular los valores de la constante de tiempo del excitador, es decir,  $T_{do}$ , y la  
 constante de tiempo del generador, es decir,  $T'_{do}$  60. Además, la suma 54 se proporciona al excitador lineal y al  
 generador 58. La tensión del terminal del generador desde el excitador y el generador 58 también se proporciona  
 como entrada para calcular los valores de la constante de tiempo del excitador, es decir,  $T_e$ , y la constante de tiempo  
 del generador, es decir,  $T'_{do}$  60. La tensión del terminal del generador desde el excitador y el generador 58 también  
 se suma 46 con la referencia de voltaje del generador ("VREF") 44 que proporciona entrada a la ganancia  
 20 proporcional ("P") del controlador de ganancia 48. La ganancia proporcional se selecciona a un valor  
 predeterminado, por ejemplo, ocho (8) p.u. para regular al ochenta y cinco por ciento (85 %) de la tensión nominal.

**[0040]** El siguiente paso es calcular la ganancia del sistema. Si  $V_R$  representa el voltaje de salida de PID y  $V_T$   
 25 representa la salida de voltaje del generador, entonces los pasos para calcular la ganancia de bucle del sistema son:

25

1. verificar la tensión residual con salida cero del regulador;
2. encontrar salida de bucle abierto correspondiente a la tensión residual;
3. encontrar salida del regulador correspondiente a la tensión nominal del generador; y
4. calcular la ganancia del bucle de acuerdo con la siguiente ecuación:  $KG = V_R/V_T$

30

**[0041]** Las constantes de tiempo del excitador y del generador se calculan a continuación. La constante de  
 tiempo del generador ( $T'_{do}$ ) se calcula en base a parámetros estimados,  $\alpha_{k1}$  y  $\alpha_{k2}$ , obtenidos por mínimos cuadrados  
 recursivos según la siguiente ecuación:

$$\hat{T}'_{do} = -T_S / \log \left( \frac{\alpha_{k1} + \sqrt{\alpha_{k1}^2 + 4\alpha_{k2}}}{2} \right)$$

35

**[0042]** La constante de tiempo del excitador  $T'_{do}$  se calcula en base a los parámetros estimados,  $\alpha_{k1}$  y  $\alpha_{k2}$ ,  
 obtenidos por mínimos cuadrados recursivos según la siguiente ecuación:

$$\hat{T}'_{exc} = -T_s / \log \left( \frac{\alpha_{k1} - \sqrt{\alpha_{k1}^2 + 4\alpha_{k2}}}{2} \right)$$

**[0043]** Otro procedimiento para estimar las constantes de tiempo incluye la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO). La Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) es una técnica que se puede usar para estimar los valores de ganancia de PID (la ganancia proporcional  $K_P$ , la ganancia integral  $K_I$  y la ganancia derivativa  $K_D$ ). PSO es una técnica de computación evolutiva y está inspirada en el comportamiento social de las aves que acuden en bandadas o en los bancos de peces. El sistema se inicializa con una población de soluciones aleatorias y busca valores óptimos al actualizar las generaciones. La técnica de PSO imita los comportamientos que se encuentran en la naturaleza. La idea es buscar un espacio de solución usando un "enjambre" de individuos simulados o "partículas". Cada partícula tiene una posición en el espacio de búsqueda, donde cada posición corresponde a una posible solución al problema. Cada partícula tiene un vector de velocidad asociado. Cada partícula vuela en el espacio de búsqueda según las reglas especificadas. Estas reglas, por ejemplo, pueden incluir: (1) cada partícula recuerda su mejor solución personal encontrada hasta el momento ( $pbest$ ); (2) cada partícula es consciente de la mejor solución global encontrada hasta ahora de todas las partículas en el enjambre ( $gbest$ ); (3) cada partícula está programada para moverse hacia su(s) mejor(es) ubicación(es) personal(es) ( $pbest$ ); y (4) cada partícula está programada para moverse hacia la(s) mejor(es) ubicación (es) global(es) ( $gbest$ ).

**[0044]** Normalmente, cada partícula se mueve una vez por iteración, y el programa se ejecuta sobre un número predeterminado de iteraciones. La posición de cada partícula se evalúa de acuerdo con una "función de acondicionamiento físico", que determina la conveniencia de esa solución. Una vez que el programa de software ha alcanzado el límite de iteración, los mejores valores encontrados hasta el momento se utilizan como los valores óptimos estimados.

**[0045]** Basado en un valor estimado de ganancia del sistema, es decir,  $K_s$ , el parámetro del sistema está normalizado en por unidad. Se construye un ciclo simple de linealización por retroalimentación para eliminar las características bilineales del sistema que pueden estar presentes en el sistema que se muestra en la figura 16. En general, para la simulación del sistema, el procedimiento de integración de Euler se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias de modelos dinámicos con un tamaño de paso de integración de un valor predeterminado, por ejemplo, diez (10) milisegundos. Por lo tanto, la entrada de potencia se estima para cada período de tiempo predeterminado, por ejemplo, diez milisegundos, y la salida del controlador se escala mediante el voltaje de entrada de potencia para eliminar un efecto bilineal.

**[0046]** En la descripción de los diagramas de flujo, la explicación funcional marcada con numerales en paréntesis angulares <nnn>, se referirá a los bloques del diagrama de flujo que llevan ese número. La figura 6 representa un diagrama de flujo ejemplar para el proceso global en una realización ejemplar y generalmente se indica con el número 400. El primer paso <401> implica la acumulación de la tensión del generador a un valor predeterminado, por ejemplo, 0,9 p.u. El segundo paso <403> es para que el sistema mida la respuesta del sistema del generador. Preferiblemente, la respuesta escalonada del sistema se mide aumentando la referencia de voltaje en un porcentaje predeterminado, por ejemplo, cinco por ciento (5 %) y midiendo los voltajes del generador durante un primer período de tiempo predeterminado, por ejemplo, cada cincuenta (50) milisegundos. Este proceso se repite en el tercer paso <405> durante un segundo período de tiempo predeterminado, por ejemplo, cinco (5) segundos.

**[0047]** El conjunto de datos medido se denomina respuesta escalada del sistema real y se almacena para su uso posterior en el algoritmo PSO. En el cuarto paso <407>, el sistema calcula las constantes de tiempo del excitador  $T_e$ , y constantes de tiempo del generador  $T_{do}$ . Preferentemente se usa un sistema de optimización de enjambre de partículas para estimar las constantes de tiempo del excitador  $T_e$ , y del generador  $T_{do}$ , como se describe en detalle a continuación con referencia a la figura 7. Finalmente, en el quinto paso <409>, las constantes de tiempo estimadas del excitador  $T_e$  y del generador  $T_{do}$  del paso <405> se usan para calcular las ganancias PID. Las ganancias PID se pueden calcular utilizando la cancelación de polo a cero o la colocación de polos, como se describe en detalle a continuación.

**[0048]** La figura 7 representa un algoritmo ejemplar no limitante para realizar la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) para estimar las constantes de tiempo del excitador y el generador. Preferiblemente, cada partícula

simulada tiene una posición asociada  $\langle x_k \rangle$  y velocidad  $v_k$ . Cada partícula está preferiblemente representada por un par de constantes de tiempo del excitador  $T_e$  y de constantes de tiempo del generador  $T_{do}$  (soluciones). La posición de la partícula "kth" se puede representar de la siguiente manera:  $x_k = (T_{do}, T_e)$  donde  $T_{do}$  representa la constante de tiempo del generador y  $T_e$  representa la constante de tiempo del excitador.

5

**[0049]** En el diagrama de flujo ejemplar mostrado en la figura 137 e indicado en general por el número 410, el primer paso del algoritmo PSO incluye utilizar el controlador PID 340, como se muestra en la figura 10.5. <412>, para acumular la tensión del generador a un valor predeterminado, por ejemplo, 0,9 p.u. Para este fin, se utiliza el controlador PID con ganancia derivada cero KD, es decir, un controlador PI. Esto es seguido por un segundo paso de realizar una respuesta escalada de voltaje aumentando la referencia de voltaje en un porcentaje predeterminado, por ejemplo, cinco por ciento (5 %), muestreando los voltajes del generador durante un primer período de tiempo predeterminado, por ejemplo, cada 50 milisegundos, y luego registrar el historial de los voltajes del generador muestreado durante un segundo período de tiempo predeterminado, por ejemplo, un intervalo de cinco segundos <414>. Este es un conjunto de datos grabados  $Z_T(k)$  cuando  $k$  va de uno a un valor predeterminado, por ejemplo,  $k = 1, \dots, 100$ .

10

15

**[0050]** Este conjunto de datos para la respuesta real escalada del sistema también se puede denominar una respuesta de referencia. El tercer paso <416> incluye inicializar una pluralidad de partículas con una posición aleatoria o preseleccionada. Por ejemplo, una posible inicialización preseleccionada de partículas  $(T_e, T_{do})$  podría ser:  $x_1 = (1.0, 0.1)$ ,  $x_2 = (2.0, 0.2)$ ,  $x_3 = (3.0, 0.3)$ ,  $x_4 = (4.0, 0.4)$  y  $x_5 = (5.0, 0.5)$ . La velocidad asociada para cada partícula (de uno a cinco) se inicializa preferiblemente a cero:  $v_k = 0$  para  $k = 1 \dots 5$ . Esto se basa en el hecho de que, en general, la constante de tiempo del excitador está diseñada alrededor de una décima parte de la constante de tiempo del generador para la mayoría de los grupos electrógenos. Por la misma razón práctica para simplificar los cálculos, el límite de la superficie de búsqueda está restringido por las siguientes reglas:  $0.5 \delta T_{do} \delta 10$  y  $0.1 \delta T_e \delta 0.5 T_{do}$ .

20

25

**[0051]** El cuarto paso <418> es calcular la respuesta escalonada del modelo con la posición de partícula seleccionada (cálculo de la tensión del generador). Como se muestra en detalle en la figura 8, el primer paso <502> es seleccionar una partícula concreta (constante de tiempo). Por ejemplo,  $T = 2.0$ . El segundo paso <504> es configurar las condiciones iniciales de cada estado. Por ejemplo, el voltaje del generador detectado, por ejemplo,  $V_T(1)$ , se puede configurar igual a 0.9 para 0.9 p.u. y la referencia de voltaje del generador  $V_{REF}$  puede establecer a 0,95 un factor de escala. Un factor de escala se usa en ciencias de la computación cuando un conjunto de números del mundo real necesita ser representado en una escala diferente para ajustarse a un formato numérico específico.

30

35

**[0052]** El tercer paso <506> es establecer el k-stage igual a uno para utilizar el procedimiento de Euler para resolver la ecuación dinámica de primer orden. El cuarto paso <508> es calcular el error de voltaje en un circuito cerrado, que es la referencia de voltaje del generador menos la tensión del generador detectado, es decir,  $ERROR = V_{REF} - V_T$ . El quinto paso <510> es calcular la salida del regulador de voltaje que es la referencia de voltaje del generador multiplicada por la ganancia proporcional, es decir,  $V_R = ERROR * K_P$ . El sexto paso <512> es calcular un nuevo voltaje del generador, es decir,  $V_T(k) = V_T(k) + T_S * (V_T(k) + V_R) / T$ , donde  $T_S$  es el tiempo de muestreo,  $T$  es la constante de tiempo, p.ej., 2.0, y  $V_R$  es la salida del regulador de voltaje para el valor actual de  $k$ .

40

**[0053]** El séptimo paso <514> es incrementar el valor de  $k$  para implementar el procedimiento de Euler para resolver una ecuación dinámica de primer orden. A continuación, se determina si  $k$  es igual a un valor predeterminado <516>, por ejemplo, 100. Si la respuesta a esta consulta es positiva, el proceso para el paso <418> de la figura 7 finaliza <518>, y si la respuesta a esta consulta es negativa, el proceso vuelve al cuarto paso <508> para repetir los pasos <508 > hasta <516> hasta que se alcanza el valor predeterminado, por ejemplo, 100. Esto proporciona un conjunto de datos calculados  $V_T(k)$  cuando  $k$  va de uno a un valor predeterminado, por ejemplo,  $k = 1, \dots, 100$ .

45

50

**[0054]** Volviendo a la figura 7, el paso quinto <420>, implica comparar el set de datos registrados  $Z_T(k)$  cuando  $k$  va de uno a un valor predeterminado, p.ej.,  $k = 1, \dots, 100$  desde el paso <418> con el conjunto de datos calculados  $V_T(k)$  cuando  $k$  va de uno a un valor predeterminado p.ej.  $k = 1, \dots, 100$  del paso <418> con la siguiente

$$J = \sum_{k=1}^N (z_k - y_k)^2$$

"función de aptitud" ejemplar  $J$  para evaluar la calidad de la posición de una partícula:  $J = \sum_{k=1}^N (z_k - y_k)^2$ , donde  $z_k$  es el voltaje del generador medido e  $y_k$  es el voltaje del generador simulado. Preferiblemente, la posición de cada partícula se evalúa durante cada iteración del algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO"). Para

55

cada partícula, se calcula una respuesta de paso simulada y sus resultados se comparan con la respuesta de paso del sistema real. Por lo tanto, la función de aptitud  $J$  evalúa la calidad de una solución (constantes de tiempo de excitador y generador) mediante la evaluación de la diferencia entre la respuesta escalada simulada del sistema y la respuesta escalada del sistema real.

5

**[0055]** El sexto paso <422>, como se muestra en la figura 7, obtiene los dos mejores valores de constantes de tiempo del excitador y el generador, donde  $T_e$  representa la constante de tiempo del excitador y  $T'_{do}$  representa la constante de tiempo del generador. Preferiblemente, cada partícula tiene también un valor "mejor personal" asociado  $pbest_k$ , que almacena la mejor solución que ha encontrado la partícula en concreto. Preferiblemente, el sistema almacena una solución "mejor global"  $gbest$ , que representa la mejor solución encontrada (hasta ahora) por cualquiera de las partículas. Después de obtener los dos mejores valores de constante de tiempo del excitador  $T_e$  y constante de tiempo del generador,  $T'_{do}$ , la partícula actualiza la velocidad y las posiciones de la partícula.

10

**[0056]** Una fórmula ejemplar para actualizar la velocidad de la partícula se da de la siguiente manera:  $v_{k+1} = \alpha v_k + \beta_1 \text{rand}(0,1)[pbest_k - x_k] + \beta_2 \text{rand}(0,1)[gbest - x_k]$ , donde  $x_k$  es la posición actual de la partícula,  $\alpha$  es un peso de inercia,  $\beta_1$  es igual a un primer factor de aprendizaje,  $\beta_2$  es igual a un segundo factor de aprendizaje. La expresión " $\text{rand}(0,1)$ " representa un número aleatorio entre cero y uno. Una fórmula ejemplar para actualizar la posición de las partículas se da de la siguiente manera:  $x_{k+1} = x_k + v_k$ , donde  $x_k$  es la posición actual de la partícula y  $v_k$  es la velocidad actual de la partícula.

15

20

**[0057]** El séptimo paso <424> es una consulta sobre si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones predeterminadas. Si la respuesta a esta consulta es positiva, el ciclo de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") finaliza <426>. Si la respuesta a esta consulta es negativa, el proceso regresa al cuarto paso <418>, que es calcular la respuesta escalada del modelo con la posición de partícula seleccionada (cálculo de la tensión del generador), como se muestra en detalle en la figura 8. El quinto paso <420> y el sexto paso <422> también se repiten hasta que se alcanza el número máximo de iteraciones predeterminadas en el séptimo paso <424> y el bucle de optimización de enjambre de partículas ("PSO") finaliza <426>.

25

**[0058]** En resumen, el sistema global se muestra en la figura 9 y generalmente se indica con el número 600. La referencia de voltaje del generador  $V_{REF602}$  se aplica para obtener la respuesta real del sistema del excitador y el generador con AVR para  $T_e$ , y  $T'_{do}$  donde  $z_k$  es el voltaje del generador medido 604. Además, el voltaje de referencia del generador  $V_{REF602}$  se aplica para obtener la respuesta escalada del sistema para  $T_e$ , y  $T'_{do}$  donde  $y_k$  es el voltaje simulado del generador 606. Estos valores se comparan con la función de aptitud, por ejemplo,  $J$ , 608. A continuación, se realiza un ajuste utilizando la optimización del enjambre de partículas ("PSO") 610 donde se obtienen los mejores valores y la posición y la velocidad de las partículas se actualizan como se describió anteriormente. Este ajuste de parámetro se aplica luego a la respuesta escalada simulada del sistema para  $T_e$ , y  $T'_{do}$  donde  $y_k$  es el voltaje del generador simulado 606 para el modelado del sistema de control de excitación 606.

30

35

**[0059]** Al calcular la ganancia del sistema y las constantes de tiempo del excitador y el generador, se pueden calcular las ganancias PID.  $T_D$  representa la constante de tiempo del filtro derivativa. Para simplificar el diseño del controlador PID, se hacen las siguientes suposiciones:

40

$$K_S = 1;$$

$$T_D = 0;$$

45 Por lo tanto, la función de transferencia de planta  $G(s)$  se da como:

$$G(s) = \left( \frac{1}{1 + sT_e} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right)$$

**[0060]** Hay dos procedimientos que pueden utilizarse para diseñar el controlador PID: (1) cancelación de polo cero; y (2) colocación de polos. En una realización de la presente invención, la cancelación de polo a cero fuerza a los dos ceros que resultan del controlador PID a cancelar los dos polos de la planta. La colocación de ceros se logra mediante la elección adecuada de las ganancias del controlador. La función de transferencia de bucle abierto del sistema se convierte en:

$$G_C(s) \cdot G(s) = \frac{K_D \left( s^2 + \frac{K_P}{K_D} s + \frac{K_I}{K_D} \right)}{T'_{do} T_E s \left( s + \frac{1}{T'_{do}} \right) \left( s + \frac{1}{T_E} \right)}$$

10 **[0061]** Para la cancelación de polo cero:

$$\text{Let } K_I = \frac{K_D}{T'_{do} T_E}$$

$$\text{Let } K_P = K_D \left( \frac{T'_{do} + T_E}{T'_{do} T_E} \right)$$

**[0062]** Por lo tanto, la función de transferencia del sistema se reduce a:

$$G_C(s) \cdot G(s) = \frac{K_D}{T'_{do} T_E s}$$

15 para que la función de transferencia de bucle cerrado se pueda expresar como:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)G_C(s)}{1 + G(s)G_C(s)} = \frac{K_D / T'_{do} T_E}{s + K_D / T'_{do} T_E}$$

20 **[0063]** La respuesta de tiempo del sistema de circuito cerrado a una entrada de paso unitario es la siguiente:

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{K_D}{T'_{do} T_E} t}$$

25 Si  $t_r$  es el aumento de tiempo especificado, el valor de  $K_D$  se obtiene por:

$$K_D = \frac{T'_{do} T_E \ln 9}{t_r \cdot K_G}$$

Después de calcular  $K_D$  de acuerdo con esta ecuación,

$$K_I = \frac{K_D}{T'_{do} T_E} \quad \text{y} \quad K_P = K_D \left( \frac{T'_{do} + T_E}{T'_{do} T_E} \right)$$

5

se puede usar para calcular  $K_P$  y  $K_I$ .

- [0064]** En otra realización de la presente invención, la colocación de polos se usa para diseñar el controlador PID. En este procedimiento, las ubicaciones deseadas del polo de bucle cerrado se deciden sobre la base de cumplir con una especificación de respuesta transitoria. En una realización, el diseño obliga al sistema general de circuito cerrado a ser un sistema predominantemente de segundo orden. Específicamente, forzamos los dos polos de bucle cerrado dominantes para que sean un par conjugado complejo, ( $s = -a \pm j\omega$ ) lo que resulta en una respuesta poco amortiguada. El tercer polo se elige para ser un polo real ( $s = -c$ ), y se coloca de modo que el modo natural de respuesta sea cinco veces más rápido que los polos dominantes. La función de transferencia de bucle abierto se da como:

$$G_c(s)G(s) = \left( K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \left( \frac{1}{1 + sT_E} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right)$$

- 20 **[0065]** Las ganancias del controlador PID  $K_P$ ,  $K_I$ , y  $K_D$  se determinan entonces analíticamente resolviendo la ecuación característica:

$$\left( K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \left( \frac{1}{1 + sT_E} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right) = -1$$

- 25 Se usan tres valores de  $s$ :

$$s = -a + j\omega$$

$$s = -a - j\omega$$

$$s = -c$$

- 30 **[0066]** Por lo tanto, hay tres ecuaciones y tres incógnitas. El valor de  $s$  para cada una de las ecuaciones

$$s = -a + jb, s = -a - jb \quad \text{y} \quad s = -c$$

puede ser sustituido en

$$\left( K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \left( \frac{1}{1 + sT_E} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right) = -1$$

5

que proporciona las tres ecuaciones. Las tres incógnitas son  $K_P$ ,  $K_I$ , y  $K_D$ . Por lo tanto, es posible resolver estas tres ecuaciones para  $K_P$ ,  $K_I$ , y  $K_D$ .

10 **[0067]** Preferiblemente, pero no necesariamente, las ecuaciones anteriores se implementan con un controlador PID usando un regulador de voltaje desarrollado para un grupo electrógeno de pequeño tamaño. Consiste en microprocesadores y circuitos de acondicionamiento de señal para voltaje de generador y salida de regulador controlada por PWM. Preferiblemente, pero no necesariamente, el voltaje del generador se puede muestrear con una resolución de dieciséis (16) bits después de filtros antisolape. El cálculo eficaz del voltaje del  
 15 generador se puede calcular en un período predeterminado, por ejemplo, cada cuarto de ciclo. Además, el algoritmo de autoajuste puede actualizarse en un período de tiempo predeterminado, por ejemplo, cada 200 milisegundos. Cuando el usuario activa el modo de autoajuste, el regulador de voltaje estima un conjunto de ganancias PID deseadas basadas en las constantes de tiempo estimadas. La amplitud de la salida del regulador se ajusta luego para mantener la regulación de voltaje en una región lineal, que es un porcentaje predeterminado de la tensión nominal del generador, por ejemplo, 80 %. Esta amplitud ajustada de la salida del regulador se obtiene durante el  
 20 cálculo de la ganancia del sistema  $K_G$ .

**[0068]** Para una interfaz de usuario simple a un regulador de voltaje digital con función de autoajuste, se puede implementar un programa informático en cualquiera de una amplia variedad de procesadores. Las siguientes  
 25 funciones ilustrativas, pero no limitativas, que pueden implementarse en el programa de software incluyen: funciones básicas de diagnóstico (calibración de cableado y medición); estimar la ganancia de bucle del circuito cerrado con el controlador PI; estimar las constantes de tiempo del generador y del excitador usando mínimos cuadrados recursivos ("RLS") u Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO"); calcular las ganancias del controlador PID utilizando constantes de tiempo estimadas ( $T_e$  y  $T'_{do}$ ); y respuesta escalonada con monitoreo en tiempo real.

30

**[0069]** Por lo tanto, un ingeniero de campo puede activar un modo de autoajuste utilizando este programa de software. Este programa de software puede determinar las ganancias PID basadas en el aumento del tiempo y los parámetros estimados (ganancia del sistema y constantes de tiempo del excitador/generador) utilizando un procedimiento de cancelación de polo a cero o un procedimiento de diseño de colocación de polos.

35

**[0070]** La figura 10 ilustra un diagrama de bloques de una realización ejemplar de la presente invención con mínimos cuadrados recursivos ("RLS") y generalmente se indica con el número 62. La circuitería de E/S (entrada/salida) 66 proporciona la interfaz entre un primer procesador 64 y el equipo pesado, es decir, una fuente de alimentación 70, un excitador 76 y un generador 78 (Excitador/generador/fuente de alimentación). La circuitería de  
 40 E/S 66 incluye un interruptor de alimentación 72 y un convertidor de analógico a digital ("AD") 82. La fuente de alimentación 70 proporciona potencia de voltaje de entrada  $V_P$  71 al interruptor de potencia 72. El interruptor de potencia 72 es controlado por el primer procesador 64. Se puede utilizar una amplia variedad de dispositivos informáticos para el primer procesador 64, por ejemplo, ordenadores, controladores, etc. Una realización preferida para el primer procesador 64 incluye un microprocesador integrado. El interruptor de potencia 72 también  
 45 proporciona un voltaje de campo del excitador 74 a las bobinas de campo del excitador 76. El excitador 76 proporciona potencia a las bobinas de campo del generador 78. La tensión de salida a.c. 80 del generador 78 está conectada al convertidor analógico a digital ("AD") 82. El convertidor analógico a digital ("AD") 82 convierte el nivel de voltaje de entrada en un valor digital que se transfiere al primer procesador 64. Este valor digital se calcula entonces 96, por el primer procesador 64, como voltaje eficaz del generador,  $V_T$  98. Opcionalmente, el convertidor  
 50 analógico a digital ("AD") 82 podría estar contenido dentro del primer procesador 64.

**[0071]** El primer procesador 64 se carga con un punto de ajuste de tensión de salida del generador

etiquetado  $V_{REF}$  102. El primer procesador 64 calcula el error 100 como la diferencia entre el punto de ajuste de tensión  $V_{REF}$  102 y el voltaje rms del generador detectado,  $V_T$  del convertidor analógico a digital ("AD") 82. El primer procesador 64 está programado para implementar un controlador PID 88. El primer procesador 64 está además programado para calcular la constante de tiempo estimada del excitador, es decir,  $T_e$ , y la constante de tiempo del generador,  $T'_{do}$ , 94 como se describe anteriormente con la entrada 96 incluyendo el voltaje detectado del generador  $V_T$  98. La salida del regulador de voltaje VR 90 del controlador PID 88 se suma 92 con una entrada aleatoria 86. Esta suma 92 se proporciona como entrada tanto al interruptor de potencia 72 como a los cálculos para la constante de tiempo estimada del excitador, es decir,  $T_e$ , y la constante de tiempo del generador, es decir,  $T'_{do}$ , 94. El primer procesador 64 está programado además para calcular los valores de ganancia de PID en función de las constantes de tiempo estimadas, utilizando ya sea el procedimiento de polos-cero o el procedimiento de colocación de polos como se describió anteriormente.

**[0072]** Hay un segundo procesador 68 que está conectado al primer procesador 64 a través del enlace de comunicación electrónico 84, por ejemplo, puerto de comunicación RS 232. Se podría utilizar una variedad de protocolos de comunicación electrónica, y RS 232 es simplemente un ejemplo. Se puede utilizar una amplia variedad de dispositivos informáticos para el primer procesador 68, por ejemplo, ordenadores, controladores, etc. Una realización preferida para el segundo procesador 68 incluye un microprocesador de propósito general. El segundo procesador 68 a través del enlace de comunicación electrónico 84 permite al usuario del segundo procesador 68 iniciar el modo de autoajuste y mostrar en una pantalla electrónica 104 las constantes de tiempo estimadas y/o los valores de ganancia PID. Cualquiera de una amplia variedad de pantallas electrónicas puede ser suficiente para la pantalla electrónica 104. Opcionalmente, el segundo procesador 68 puede calcular el excitador y las constantes de tiempo del generador y los valores de ganancia PID, y comunicar estos valores al primer procesador 64. Sin embargo, tanto el primer procesador 64 como el segundo procesador 68 se pueden combinar como un único mecanismo de procesamiento y pueden estar integrados o ubicados lejos del excitador y el generador.

**[0073]** La figura 11 ilustra un diagrama de bloques de una realización a modo de ejemplo de la presente invención con Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") y se indica generalmente mediante el número 762. La circuitería de E/S (entrada/salida) 766 proporciona la interfaz entre un primer procesador 764 y el equipo pesado, es decir, una fuente de alimentación 768, un excitador 776 y un generador 778 (Excitador/generador/fuente de alimentación). La circuitería de E/S 766 incluye un interruptor de alimentación 772 y un convertidor de analógico a digital ("AD") 782. La fuente de alimentación 768 proporciona voltaje de entrada de potencia  $V_P$  770 al interruptor de encendido 772. El interruptor de potencia 772 es controlado por el primer procesador 764. Se puede utilizar una amplia variedad de dispositivos informáticos para el primer procesador 764, por ejemplo, ordenadores, controladores, etc. Una realización preferida para el primer procesador 764 incluye un microprocesador integrado. El interruptor de potencia 772 también proporciona un voltaje de campo de excitación 774 a las bobinas de campo del excitador 776. El excitador 776 proporciona potencia a las bobinas de campo del generador 778. La tensión de salida a.c. 780 del generador 778 está conectada al convertidor analógico a digital ("AD") 782. El convertidor analógico a digital ("AD") 782 convierte el nivel de voltaje de entrada en un valor digital que se transfiere al primer procesador 764. Este valor digital se calcula entonces 784, por el primer procesador 764, como voltaje rms del generador  $V_T$  786. Opcionalmente, el convertidor analógico a digital ("AD") 782 podría estar contenido dentro del primer procesador 764.

**[0074]** El primer procesador 764 se carga con un punto de ajuste de tensión de salida del generador etiquetado  $V_{REF}$  788. Hay una respuesta escalada de tensión aumentando la referencia de voltaje en un porcentaje predeterminado, por ejemplo, cinco por ciento (5 %), muestreando los voltajes del generador durante un primer período de tiempo predeterminado, por ejemplo, cada 50 milisegundos, y luego registrando el historial de las tensiones muestreadas del generador durante un segundo período de tiempo predeterminado, por ejemplo, un intervalo de cinco segundos. Esta entrada de paso de voltaje  $\square V$  792 se suma 790 con el punto de ajuste de voltaje de salida del generador  $V_{REF}$  788 y el voltaje de generador rms  $V_T$  786. Esta suma 790 se proporciona como entrada a un controlador PID 789. El primer procesador 764 está programado para implementar un controlador PID 789. La salida del regulador de voltaje VR 794 desde el controlador PID 789 se proporciona como entrada al interruptor de potencia 772.

**[0075]** Hay un segundo procesador 824 que está conectado al primer procesador 764 a través del enlace de comunicación electrónico 798, por ejemplo, puerto de comunicación RS 232. Se podría utilizar una variedad de protocolos de comunicación electrónica, y RS 232 es simplemente un ejemplo. Se puede utilizar una amplia variedad de dispositivos informáticos para el primer procesador 824, por ejemplo, ordenadores, controladores, etc. Una realización preferida para el segundo procesador 824 incluye un microprocesador de propósito general. El conjunto

de datos 800 que implica el voltaje eficaz del generador,  $v_T$  y entrada de paso de voltaje  $\square V$  se transmite desde el primer procesador 764 a través del enlace de comunicación electrónico 798 al segundo procesador 824. Los valores de ganancia PID calculados 796 en base a las constantes de tiempo estimadas, utilizando ya sea el procedimiento de polo cero o el procedimiento de colocación de polos como se describió anteriormente, se transmiten desde el 5 segundo procesador 824 a través del enlace de comunicación electrónico 798 al primer procesador 764.

**[0076]** La entrada de paso de voltaje  $\square V$  802 se proporciona para crear una simulación de respuesta escalonada con modelos de sistema de control de excitación 806 que se compara con la fecha de respuesta de paso medida del regulador de voltaje 804. Este voltaje calculado del generador rms,  $V_{T810}$  se compara con un voltaje medido del generador rms  $V_{T808}$  con un comparador 812. El voltaje rms del generador medido  $V_{T808}$  es el voltaje del generador medido real del sistema del excitador y el generador con una carga estática para  $T_e$  y  $T'_{do}$  y el voltaje rms del generador calculado  $V_{T810}$  es la tensión del generador simulada del sistema para  $T_e$  y  $T'_{do}$ . Estos valores se comparan con la función de adecuación y luego se realiza un ajuste utilizando optimización de enjambre de partículas ("PSO") 814 donde se obtienen los mejores valores y la posición y la velocidad de las partículas se actualizan como se describió anteriormente. El ajuste de los parámetros del modelo 814  $x_k = (T'_{do}, T_e)$  donde  $T'_{do}$  representa la constante de tiempo del generador y  $T_e$  representa la constante de tiempo del excitador se retroalimenta a la simulación de respuesta escalonada con los modelos del sistema de control de excitación 806. 10 15

**[0077]** El ajuste de los parámetros del modelo 814  $x_k = (T'_{do}, T_e)$  también se usa para calcular los valores de ganancia PID en base a las constantes de tiempo 816 estimadas, utilizando ya sea el procedimiento de polos-cero o el procedimiento de colocación de polos como se describió anteriormente con cálculos del segundo procesador 824. Estas ganancias PID con los valores estimados de la constante de tiempo del generador  $T'_{do}$  y constante de tiempo del excitador  $T_e$  818 se proporcionan luego a un control 820 que opera el modo de autoajuste y proporciona el estado de la operación, incluidos los valores de la constante de tiempo del generador  $T'_{do}$ , constante de tiempo del excitador  $T_e$  y ganancias PID. Esta información puede proporcionarse a una pantalla electrónica 822 a través de un conducto eléctrico 826 desde el control. 820. Cualquiera de una amplia variedad de pantallas electrónicas puede ser suficiente para la pantalla electrónica 822, que incluye, pero no se limita a: tubo de rayos catódicos ("CRT"); tubo de almacenamiento; pantalla biestable; pantalla de tubo nixie; visualización de vectores; monitor de pantalla plana; pantalla fluorescente de vacío ("VF"); pantalla de diodos emisores de luz ("LED"); pantalla electroluminiscente ("ELD"); panel de visualización de plasma ("PDP"); pantalla de cristal líquido ("LCD"); pantallas orgánicas de diodos emisores de luz ("OLED"); visualización de emisor de electrones de conducción de superficie ("SED"); optoelectrónica láser; nanotubos de carbón; y pantallas de nanocristales. Sin embargo, tanto el primer procesador 764 como el segundo procesador 824 se pueden combinar como un único mecanismo de procesamiento y pueden estar integrados o ubicados lejos del excitador y el generador. Cualquiera de una amplia variedad de mecanismos 30 35 informáticos puede ser suficiente para el primer procesador 764 o el segundo procesador 724

**[0078]** Como un ejemplo ilustrativo, pero no limitativo, el rendimiento del algoritmo de autoajuste se prueba utilizando el conjunto generador de diésel, que consiste en un generador de 75 kW, 208 VCA, 1800 RPM y 3) sincrónico. La excitación para este generador es proporcionada por un generador de im(n permanente ("PMG") excitado de 0.3 Amperios, 7 VCC, ac excitador sin carga. La evaluación del rendimiento del sistema comienza realizando respuestas escaladas de voltaje para examinar el comportamiento del sistema de excitación conectado al generador. 40

**[0079]** Como se muestra en la figura 12, una interfaz gráfica de usuario generalmente se indica mediante el número 200. Esta interfaz gráfica de usuario 200 aparece en la pantalla electrónica 104, como se muestra en la figura 10. Volviendo a la figura 12, hay cinco modos que incluyen: identificación de la ganancia de bucle  $K_G$  202; identificar las constantes de tiempo 204; detener la identificación 206; actualizar las ganancias de PID 208; y una función 210 de salida del programa de software. Para identificar la ganancia de bucle 202, hay una entrada para la identificación del tiempo de muestreo 212. Hay una entrada de clic 214 para la cancelación del polo cero como procedimiento de diseño para un controlador PID y una entrada de clic 216 para la colocación del polo como procedimiento de diseño para un controlador PID. 45 50

**[0080]** Para el PID calculado, hay cuatro salidas que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  218; ganancia proporcional  $K_P$  220; ganancia integral  $K_I$  222; y ganancia derivada  $K_D$  224. Las salidas adicionales incluyen constantes de tiempo estimadas para el excitador  $T_e$  226 y el generador  $T'_{do}$  228. Hay una serie de entradas para crear representaciones gráficas. Estos incluyen un valor máximo para la tensión del generador en el eje y 234; un valor mínimo para la tensión del generador en el eje y 236; un valor máximo para la tensión del regulador en el eje y 230; y un valor mínimo para la tensión del regulador en el eje y 232. Existe un icono de salida gráfica 238 para 55

extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 240 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 242. Hay una representación gráfica de la tensión del generador 244 y de la salida del regulador 246.

5 **[0081]** Este programa de software monitorea el sistema y los parámetros estimados continuamente. Como las constantes de tiempo del excitador y el generador no están disponibles, se seleccionaron las ganancias de PID de fábrica ( $K_P = 30$ ,  $K_I = 150$ ,  $K_D = 2$ , y  $T_D = 0.08$ ) Estas ganancias se comparan con las ganancias autoajustadas en la respuesta escalada de voltaje. La ganancia del circuito del sistema ( $K_G$ ) fue seleccionado como tres (3) para este caso. Se utilizó un procedimiento de ensayo error para obtener una ganancia deseable. Este tiempo de comisión se  
10 eliminó con un regulador de voltaje digital con función de autoajuste. El programa de software diseñado para las características de autoajuste en el modo autoajustable se activa y este modo autoajustable determina las ganancias PID basadas en el aumento del tiempo y los parámetros estimados (ganancia del sistema y las constantes de tiempo del excitador/generador) utilizando el procedimiento de cancelación de polo cero ( $K_P = 69$ ,  $K_I = 110$ , y  $K_D = 7$ ). La constante de tiempo para el bloque derivativo 24 en la figura 1 se seleccionó como  $T_D = 0.03$  para reducir el efecto  
15 de ruido. La figura 13, generalmente indicada por el número 250, es la misma interfaz gráfica de usuario que se muestra en la figura 12, con la excepción de una representación gráfica de una constante de tiempo para el excitador  $T_e$  252 y una representación gráfica de una constante de tiempo para el generador  $T_{do}$  254.

**[0082]** La actualización de la característica de ganancia de PID 208, como se muestra como el número 208 en la figura 12, se muestra en detalle en la figura 14 y generalmente se indica con el número 260. Hay cuatro iconos de funciones de botón que incluyen: actualizar las ganancias PID de la calculadora 262; iniciar el monitor 264; detener el monitor 266; y una función de salida 268. Hay cinco entradas para ganancias de PID que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  270; ganancia proporcional  $K_P$  272; ganancia integral  $K_I$  274; ganancia derivada  $K_D$  276 y la constante de tiempo del filtro derivado  $T_D$  278. También hay un icono de botón 288 para detener e iniciar el  
25 regulador automático de voltaje.

**[0083]** Hay un indicador 280 para indicar una condición de alarma así como un indicador 298 de si el regulador de voltaje automático está parado o encendido. Además, hay una entrada para la tensión nominal 282, el punto de ajuste 284 y el porcentaje (%) de cambio 286. Además, un icono de botón pulsador 292 se usa para  
30 aumentar el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado superior, por ejemplo, 218.4, un icono de botón pulsador 294 para operar el regulador de voltaje automático a un valor nominal y un icono de botón 296 para disminuir el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado inferior, por ejemplo, 197.6.

**[0084]** Una entrada desplegable 300 para un primer gráfico se usa para representar gráficamente parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 302 y un valor mínimo de 304. Hay una entrada desplegable 306 para un segundo gráfico para representar gráficamente parámetros en el eje Y 300, por ejemplo, voltaje del regulador. Hay una entrada para un valor máximo de 308 y un valor mínimo de 310. Existe un icono de salida gráfica 238 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 240 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 242. Hay una representación  
40 gráfica de la tensión del generador 244 y de la salida del regulador 246. Esta es la respuesta automática del regulador de voltaje que utiliza valores predeterminados, lo que indica un gran sobreimpulso causado por ganancias incorrectas.

**[0085]** La figura 15, generalmente indicada por el número 320, es la misma interfaz gráfica de usuario que se muestra en la figura 14, con la excepción de que la representación gráfica de la tensión del generador 322 y la salida del regulador 324 reflejan ganancias de PID autoajustadas que proporcionan una respuesta rápida sin excederse.

**[0086]** Haciendo referencia de nuevo a la figura 5, el diagrama de bloques básico de un sistema de control de excitación autoexcitante con un bloque de PID ejemplar utilizado en un circuito de control de regulador de voltaje automático se indica generalmente mediante el número 330. Además del bloque PID 340, la ganancia del sistema de bucle  $K_G$  338 proporciona un término ajustable para compensar las variaciones en el voltaje de entrada del sistema a un puente de conversión de potencia. La función de transferencia  $G_c(s)$  del controlador PID 340 puede

$$G_c = K_G V_P \left( K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_D s} \right)$$

expresarse como:  
55 constante de tiempo de filtro derivada y "s" es el operador de Laplace.

**[0087]** El voltaje de referencia del generador  $V_{REF}$  332 se suma 336 con la suma 356 del ruido en la tensión del terminal  $V_N$  352 con el voltaje detectado del generador  $V_T$  354 para formar una señal de error de voltaje. Esta señal de error de voltaje se multiplica por la ganancia de bucle  $K_G$  338. Esta señal de error de voltaje escalado se utiliza para generar tres términos con ganancias correspondientes con el control PID 340, es decir, la ganancia proporcional  $K_P$ , la ganancia integral  $K_I$  y la ganancia derivada  $K_D$ . La salida del control PID 340 se multiplica 342 por el voltaje de entrada de potencia  $V_P$  344 para crear la salida del regulador de voltaje  $V_R$  350. Para el caso de entrada de alimentación externa,  $V_P$  344 es una constante. Por lo tanto, se puede aplicar una teoría lineal para la estabilidad de señales pequeñas. Por otro lado, si la entrada de potencia puede derivarse de la tensión del generador para una aplicación de autoexcitación, es decir,  $V_P = K_T V_T$  donde  $K_T$  346 es una ganancia para representar un transformador de potencia. El voltaje del campo de excitación es la salida del control 340 de PID multiplicado por el voltaje de entrada de potencia  $V_P$  344. En este caso, el sistema de control de excitación 330 se convierte en un sistema bilineal para el excitador y el generador 348.

**[0088]** Con el fin de hacer que el sistema de control autoexcitado sea un sistema lineal, se implementa un bucle de linealización de retroalimentación simple como se muestra en la figura 16 y generalmente se indica mediante el número 360. El voltaje de referencia del generador  $V_{REF}$  332 se suma 362 con la salida del excitador y el generador 348. Hay un tiempo de muestreo del bucle externo  $T_s$  364 que se aplica a esta suma 362 y luego se proporciona como entrada al controlador PID 340. El voltaje detectado  $V_C$  368 se proporciona como salida por el controlador PID 340. La salida del excitador y generador 348 proporciona entrada para crear un estimador de voltaje de entrada de potencia  $V_P$  374. Hay un tiempo de muestreo de bucle interno  $T_{s_i}$  376 conectado al estimador de voltaje de entrada de potencia  $V_P$  374. Como el tiempo de muestreo  $T_{s_i}$  376 del bucle interno aumenta, aparece una característica bilineal en la respuesta del sistema. Un valor ilustrativo, pero no limitante, del tiempo de muestreo sería de cincuenta (50) milisegundos. La selección de 50 milisegundos se ha determinado sobre la base de los resultados de simulación con constantes de tiempo del sistema de control de excitación industrial en un entorno de ruido práctico. El voltaje detectado  $V_C$  368 tiene una escala de 370 por el inverso de la tensión de entrada de potencia  $V_P$  342 para proporcionar la salida del regulador de voltaje  $V_R$  350. La salida del excitador y generador 348 proporciona entrada a un transformador 372 que genera el voltaje de entrada de potencia  $V_P$  342, que luego se multiplica 378 por la salida del regulador de voltaje  $V_R$  350.

**[0089]** Con el control de bucle interno implementado, se puede utilizar un algoritmo de estimación lineal. Por

$$G(s) = K_s \left( \frac{1}{1 + sT_e} \right) \left( \frac{1}{1 + sT'_{do}} \right)$$

lo tanto, la función de transferencia de planta  $G(s)$  se aproxima a:  
 $T_e$ , y  $T'_{do}$  son la ganancia del sistema, el excitador y las constantes de tiempo del generador, respectivamente.

**[0090]** La ganancia  $K_G$  338 en la figura 5 se usa para compensar las variaciones en las ganancias dependientes de la configuración del sistema, como la tensión de entrada de potencia ( $V_P$ ) 344 y efectos de saturación, es decir, ganancia de bucle, es decir  $K_G$ , multiplicado por la ganancia del sistema, es decir  $K_s$ , es igual a uno (1).

**[0091]** Primero, la ganancia del bucle, es decir,  $K_G$ , 338 se estima en base a una condición de estado estable que está preferiblemente cerca del voltaje nominal del generador. Esto se logra preferiblemente con un controlador robusto que tiene una característica de inicio suave. La característica de inicio suave está diseñada preferiblemente para evitar un sobreimpulso de voltaje grande durante la acumulación de voltaje.

**[0092]** El controlador PID 340 se utiliza para medir la salida del regulador de voltaje  $V_R$  350 y el voltaje terminal  $V_T$  354, como se muestra en la figura 5. La salida del regulador de voltaje  $V_R$  350 y el voltaje terminal  $V_T$  354 se miden en una condición de estado estable del circuito cerrado con el controlador PID 340. La condición de estado estable se determina cuando la variación de voltaje del generador es menor que un valor predeterminado, por ejemplo, 0,005 p.u., durante más de un período de tiempo predeterminado, por ejemplo, diez (10) segundos. La salida del regulador y el voltaje del generador se utilizan para obtener la ganancia del circuito, es decir  $K_G$ , 338. Los pasos para calcular la ganancia del bucle, es decir,  $K_G$ , 338 serían los siguientes: (a) verificar la tensión residual con una salida de regulador de voltaje cero; (b) encontrar una salida de bucle abierto que corresponda a la tensión residual; (c) encontrar una salida de regulador correspondiente a la tensión nominal del generador usando el controlador PID 340; y (d) calcular ganancia de bucle, es decir,  $K_G$ , 338, que es igual al voltaje de salida del controlador PID 340  $V_R$  350 dividido por el voltaje del generador detectado  $V_T$  354, es decir,  $K_G = V_R/V_T$ .

**[0093]** Como se muestra en la figura 17, una interfaz gráfica de usuario generalmente se indica mediante el

número 1050. Esta interfaz gráfica de usuario 1050 aparece en la pantalla electrónica 822, como se muestra en la figura 11. Volviendo a la figura 17, hay cinco modos que incluyen: identificación de la ganancia de bucle  $K_G$  1002; identificar las constantes de tiempo 1004; detener la identificación 1006; actualizar las ganancias de PID 1008; y una función 1010 de salida del programa de software. Para identificar la ganancia de bucle 1002, hay una entrada para la identificación del factor de ganancia 1012. Hay una entrada de clic 1014 para la cancelación del polo cero como procedimiento de diseño para un controlador PID y una entrada de clic 1016 para la colocación del polo como procedimiento de diseño para un controlador PID.

**[0094]** Para el PID calculado, hay cuatro salidas que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  1018; ganancia proporcional  $K_P$  1020; ganancia integral  $K_I$  1022; y ganancia derivada  $K_D$  1024. Las salidas adicionales incluyen constantes de tiempo estimadas para el excitador  $T_e$  1026 y el generador  $T_{do}$  1028. Hay una serie de entradas para crear representaciones gráficas. Estos incluyen un valor máximo para la tensión del generador en el eje y 1034; un valor mínimo para la tensión del generador en el eje y 1036; un valor máximo para la tensión del regulador en el eje y 1030; y un valor mínimo para la tensión del regulador en el eje y 1032. Existe un icono de salida gráfica 1038 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 1040 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 1042. Hay una representación gráfica del voltaje del generador 1044, por ejemplo, el valor de 0.740 voltios, y de la salida del regulador 1046, por ejemplo, el valor de 0.106 voltios. También hay una representación gráfica de una constante de tiempo para el excitador  $T_e$  1052, por ejemplo, valor de 0.294, y una representación gráfica de una constante de tiempo para el generador  $T_{do}$  1054, por ejemplo, valor de 2.995. Este programa de software monitorea el sistema y los parámetros estimados continuamente.

**[0095]** La característica de monitoreo en tiempo real que también se implementó para evaluar fácilmente el rendimiento del sistema de las respuestas de paso de voltaje se muestra en la figura 18, que generalmente se indica con el número 1120. Hay cuatro iconos de funciones de botón que incluyen: actualizar las ganancias de PID de la calculadora 1062; iniciar el monitor 1064; detener el monitor 1066; y una función de salida 1068. Hay cinco entradas para ganancias de PID que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  1070; ganancia proporcional  $K_P$  1072; ganancia integral  $K_I$  1074; ganancia derivada  $K_D$  1076 y la constante de tiempo del filtro derivado  $T_D$  1078. También hay un icono de botón 1088 para detener e iniciar el regulador automático de voltaje.

**[0096]** Hay un indicador 1080 para indicar una condición de alarma así como un indicador 1098 de si el regulador de voltaje automático está parado o encendido. Además, hay una entrada para la tensión nominal 1082, el punto de ajuste 1084 y el porcentaje (%) de cambio 1086. Además, un icono de botón pulsador 1092 se usa para aumentar el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado superior, por ejemplo, 210, un icono de botón pulsador 1094 para operar el regulador de voltaje automático a un valor nominal y un icono de botón 1096 para disminuir el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado inferior, por ejemplo, 190.

**[0097]** Una entrada desplegable 1100 para un primer gráfico se usa para representar gráficamente parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 1102 y un valor mínimo de 1104. Hay una entrada desplegable 1106 para que un segundo gráfico muestre parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 1108 y un valor mínimo de 1110. Existe un icono de salida gráfica 1138 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 1140 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 1142. Hay una representación gráfica del voltaje de salida del regulador 1144, por ejemplo, el valor de 0.040, y del voltaje del generador 1146, por ejemplo, el valor de 0.999. Esta es la respuesta automática del regulador de voltaje que utiliza valores predeterminados, lo que indica un gran sobreimpulso causado por ganancias incorrectas.

**[0098]** El rendimiento del algoritmo de autoajuste propuesto se verificó utilizando modelos de simulación de generador y excitador de primer orden simplificados. Estos modelos también se implementan en un regulador comercial para el tamaño pequeño del grupo electrógeno. Los resultados de la estimación del procedimiento propuesto se muestran en la Tabla 1 que se muestra en la figura 19, que generalmente se indica con el número 1200.

**[0099]** El caso de entrada de alimentación externa (voltaje de entrada de potencia fijo, es decir, VP) se prueba para comparar con un caso de aplicación de derivación. Los resultados de dos enfoques se ilustran en la primera tabla indicada por el número 1202 para un Mínimo Cuadrado Recursivo ("RLS") con linealización por retroalimentación en comparación con la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") mencionada anteriormente. En este caso, el enfoque de RLS parece ser más preciso.

**[0100]** La segunda tabla se indica generalmente con el número 1204 para una aplicación de derivación para

un Mínimo Cuadrado Recursivo ("RLS") con linealización mediante realimentación en comparación con la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") anteriormente mencionada. No hay un error significativo causado por la aplicación de derivación.

5 **[0101]** El error de estimación en el enfoque de PSO se debe principalmente al tiempo de inicio incorrecto para aplicar la entrada de la unidad al campo de excitación, que se determina aleatoriamente con un retraso de tiempo. Un ejemplo no limitante de este retraso de tiempo es de aproximadamente dieciséis (16) milisegundos. En general, el comportamiento aleatorio es causado por sincronización inexacta entre la actualización de la señal de modulación por ancho de pulso ("PWM") para el amplificador de potencia, el cálculo eficaz de la señal de voltaje de  
10 60 Hz y un tiempo de interrupción en tiempo real para las funciones de control en el regulador digital de tensión.

**[0102]** La presencia del diez por ciento (10 %) de error relativo en el voltaje del generador, el enfoque de Optimización de enjambre de partículas ("PSO") llega a una solución más rápido que el Mínimo cuadrado recursivo ("RLS"). Para el enfoque de mínimo cuadrado recursivo ("RLS"), se requieren aproximadamente treinta (30)  
15 segundos para converger a las constantes de tiempo. Por otro lado, solo lleva varios segundos para el enfoque de optimización de enjambre de partículas ("PSO"). Esto se muestra en la tercera tabla indicado con el número 1206. Los resultados típicos de identificación para el enfoque de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") se muestran en la figura 20, que generalmente se indica con el número 1210. Los valores estimados se indican con el número 1212 y los valores medidos se indican con el número 1214. El nivel de ruido en la respuesta de paso del  
20 sistema real se indica mediante los valores medidos 1214.

**[0103]** Como un ejemplo ilustrativo, pero no limitativo, el rendimiento del algoritmo de autoajuste se prueba utilizando el conjunto generador de diesel, que consiste en un generador de 75 kW, 208 VCA, 1800 RPM y 3 $\phi$  sincrónico. La excitación para este generador es proporcionada por un generador de imán permanente ("PMG")  
25 excitado de 0.3 Amperios, 7 Vdc, excitador ac sin carga. La evaluación del rendimiento del sistema comienza realizando respuestas escalonadas de voltaje para examinar el comportamiento del sistema de excitación conectado al generador.

**[0104]** Un regulador de voltaje automático ("AVR") que usa los valores por defecto se muestra en la figura 21,  
30 que generalmente se indica con el número 1220. Hay cuatro iconos de funciones de botón que incluyen: actualizar las ganancias de PID de la calculadora 1222; iniciar el monitor 1224; detener el monitor 1226; y una función de salida 1228. Hay cinco entradas para ganancias de PID que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  1230;  $K_P$  1232; ganancia integral  $K_I$  1234; ganancia derivada  $K_D$  1236 y la constante de tiempo del filtro derivado  $T_D$  1238. También hay un icono de botón 1240 para detener e iniciar el regulador automático de voltaje.

35 **[0105]** Hay un indicador 1242 para indicar una condición de alarma así como un indicador 1244 de si el regulador de voltaje automático está parado o encendido. Además, hay una entrada para la tensión nominal 1246, el punto de ajuste 1248 y el porcentaje (%) de cambio 1250. Además, un icono de botón pulsador 1252 se usa para aumentar el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado superior, por ejemplo, 210, un icono de botón  
40 pulsador 1254 para operar el regulador de voltaje automático a un valor nominal y un icono de botón 1256 para disminuir el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado inferior, por ejemplo, 190.

**[0106]** Una entrada desplegable 1258 para un primer gráfico se usa para representar gráficamente parámetros en el eje Y, por ejemplo, la salida del regulador. Hay una entrada para un valor máximo de 1260 y un  
45 valor mínimo de 1262. Hay una entrada desplegable 1264 para que un segundo gráfico muestre parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 1266 y un valor mínimo de 1268. Existe un icono de salida gráfica 1270 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 1272 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 1274. Hay una representación gráfica del voltaje de salida del regulador 1276, por ejemplo, el valor de 0.031, y del voltaje del  
50 generador 1278, por ejemplo, el valor de 0.999. Esta es la respuesta automática del regulador de voltaje que utiliza valores predeterminados, lo que indica un gran sobreimpulso causado por ganancias incorrectas.

**[0107]** Como las constantes de tiempo del excitador y el generador no están disponibles, las ganancias de PID de fábrica ( $K_P=200$  mostrada por la entrada 1232,  $K_I=600$  mostrada por la entrada 1234,  $K_D=30$  mostrada por  
55 la entrada 1236, y  $T_D=0.0$  mostrada por la entrada 1238) fueron seleccionadas, que se obtuvieron para otro generador por el procedimiento de ensayo y error. Dado que la ganancia de fábrica para  $K_G=50$  provoca un gran rebasamiento, se redujo a  $K_G=1.0$ , mostrado por la entrada 1230, para obtener una respuesta razonable 1276 y 1278.

- [0108]** Las ganancias de autoajuste PID se muestran en la figura 22, que generalmente se indica con el número 1320. Hay cuatro iconos de funciones de botón que incluyen: actualizar las ganancias de PID de la calculadora 1322; iniciar el monitor 1324; detener el monitor 1326; y una función de salida 1328. Hay cuatro entradas de ganancia de PID que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  1330; ganancia proporcional  $K_P$  1332; ganancia integral  $K_I$  1334; ganancia derivada  $K_D$  1336 y la constante de tiempo del filtro derivado  $T_D$  1338. También hay un icono de botón 1340 para detener e iniciar el regulador automático de voltaje.
- [0109]** Hay un indicador 1342 para indicar una condición de alarma así como un indicador 1344 de si el regulador de voltaje automático está parado o encendido. Además, hay una entrada para la tensión nominal 1346, el punto de ajuste 1348 y el porcentaje (%) de cambio 1350. Además, un icono de botón pulsador 1352 se usa para aumentar el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado superior, por ejemplo, 210, un icono de botón pulsador 1354 para operar el regulador de voltaje automático a un valor nominal y un icono de botón 1356 para disminuir el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado inferior, por ejemplo, 190.
- [0110]** Una entrada desplegable 1358 para un primer gráfico se usa para representar gráficamente parámetros en el eje Y, por ejemplo, la salida del regulador. Hay una entrada para un valor máximo de 1360 y un valor mínimo de 1362. Hay una entrada desplegable 1364 para que un segundo gráfico muestre parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 1366 y un valor mínimo de 1368. Existe un icono de salida gráfica 1370 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 1372 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 1374. Hay una representación gráfica del voltaje de salida del regulador 1376, por ejemplo, el valor de 0.040, y del voltaje del generador 1378, por ejemplo, el valor de 0.999. Esta es la respuesta que utiliza ganancias de PID autoajustables.
- [0111]** Este programa de software está diseñado para autoajustarse, de modo que cuando se activa el modo de autoajuste, las ganancias PID se determinan en función del tiempo creciente y los parámetros estimados (ganancia del sistema y constantes de tiempo del excitador/generador) utilizando el procedimiento de cancelación de polo cero ( $K_P = 57.81$  mostrado por la entrada 1332,  $K_I = 110.15$  mostrado por la entrada 1334, y  $K_D = 6.53$  mostrado por la entrada 1336). La constante de tiempo para el término derivado se seleccionó como  $T_D = 0.03$ , mostrado por la entrada 1338, para reducir el efecto de ruido. Se requiere mucho menos tiempo de comisión con la función de autoajuste.
- [0112]** La respuesta de paso de voltaje del primer procedimiento que usa el regulador de voltaje automático ("AVR") con los valores predeterminados se muestra con los números 1276 y 1278 en la figura 21, se compara con las ganancias de autoajuste PID mostradas con los números 1376 y 1378 en la figura. 22. El regulador automático de voltaje ("AVR") con valores por defecto se muestra con los números 1276 y 1278 en la figura 21 indica un gran sobreimpulso con ganancias incorrectas. Las ganancias de autoajuste PID, mostradas por los números 1376 y 1378 en la figura 22, proporcionan una respuesta con mucho menos sobreimpulso. El gran sobreimpulso en la respuesta de intensificación es causado por un límite asimétrico de forzado alto. Esta es una respuesta típica para un sistema de control de excitación giratorio que no tiene forzamiento de campo negativo. Para este caso, la selección de las ganancias correctas del controlador es más importante.
- [0113]** Las ganancias de PID de autoajuste para un nivel medio de grupo electrógeno con una turbina de gas y un generador de 13.8 kV y 15 MVA, respectivamente, se muestran en la figura 23, que generalmente se indica con el número 1420. Hay cuatro iconos de funciones de botón que incluyen: actualizar las ganancias de PID de la calculadora 1422; iniciar el monitor 1424; detener el monitor 1426; y una función de salida 1428. Hay cinco entradas para ganancias de PID que incluyen: ganancia de bucle  $K_G$  1430; ganancia proporcional  $K_P$  1432; ganancia integral  $K_I$  1434; ganancia derivada  $K_D$  1436 y la constante de tiempo del filtro derivada  $T_D$  1438. También hay un icono de botón 1440 para detener e iniciar el regulador automático de voltaje.
- [0114]** Hay un indicador 1442 para indicar una condición de alarma así como un indicador 1444 de si el regulador de voltaje automático está parado o encendido. Además, hay una entrada para la tensión nominal 1446, el punto de ajuste 1448 y el porcentaje (%) de cambio 1450. Además, un icono de botón pulsador 1452 se usa para aumentar el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado superior, por ejemplo, 14,161.581, un icono de botón pulsador 1454 para operar el regulador de voltaje automático a un valor nominal y un icono de botón 1456 para disminuir el regulador de voltaje automático a un valor predeterminado inferior, por ejemplo, 12,812.859 Voltios.
- [0115]** Una entrada desplegable 1458 para un primer gráfico se usa para representar gráficamente parámetros en el eje Y, por ejemplo, voltaje del generador. Hay una entrada para un valor máximo de 1460 y un valor mínimo de 1462. Hay una entrada desplegable 1464 para que un segundo gráfico muestre parámetros en el

eje Y, por ejemplo, salida del regulador. Hay una entrada para un valor máximo de 1466 y un valor mínimo de 1468. Existe un icono de salida gráfica 1470 para extender un ancho del eje x y un icono de salida gráfica 1472 para reducir el ancho del eje x. También hay una entrada para un ancho del eje x en segundos 1474. Hay una representación gráfica del voltaje del generador 1476, por ejemplo, el valor de 977, y de la salida del regulador 1478, por ejemplo, valor de 0.051. Esta es la respuesta que utiliza ganancias de PID autoajustables.

- [0116]** Este programa de software está diseñado para autoajustarse, de modo que cuando se activa el modo de autoajuste, las ganancias de PID se determinan en función del tiempo de subida y los parámetros estimados (ganancia del sistema y constantes de tiempo del excitador/generador) utilizando el procedimiento de cancelación de polo cero ( $K_P = 222$  mostrado por la entrada 1432,  $K_I = 109.86$  mostrado por la entrada 1434, y  $K_D = 73.89$  mostrado por la entrada 1436). La constante de tiempo para el término derivado se seleccionó como  $T_D = 0.08$ , mostrado por la entrada 1438, para reducir el efecto de ruido. Como antes, se requiere mucho menos tiempo de comisión con la función de autoajuste.
- 15 **[0117]** Se encontró que la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") era más rápida que una técnica de Mínimo Cuadrado Recursivo ("RLS") para estimar las constantes de tiempo del excitador y el generador. La velocidad de cálculo es particularmente importante para los pequeños reguladores automáticos de voltaje (AVR), donde la potencia de procesamiento tiene un alto coste.
- 20 **[0118]** Aunque se puede obtener menos error de estimación con el enfoque de mínimos cuadrados recursivos ("RLS") que con la Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO"), el enfoque de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") llega a una solución más rápido que el de mínimos cuadrados recursivos ("RLS") ya que todos los cálculos pueden ser logrados por el programa de software. Para el enfoque de mínimos cuadrados recursivos ("RLS"), se requieren aproximadamente 30 segundos para converger a las constantes de tiempo con 10  
25 % de error de cálculo de la tensión eficaz. Por otro lado, lleva varios segundos para el enfoque de optimización de enjambre de partículas ("PSO") con una computadora personal estándar, por ejemplo, una CPU Intel Core 2 de 2 GHz.
- [0119]** Se encontró que la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") tenía muy buena  
30 precisión y los resultados obtenidos mediante la técnica de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") fueron similares a los encontrados usando la técnica de mínimos cuadrados recursivos ("RLS"). Otra ventaja del enfoque de optimización de enjambre de partículas ("PSO") es que no se requiere excitación continua. Solo se realiza una respuesta de paso y las ganancias de PID se calculan mediante un programa informático. Por lo tanto, el enfoque de Optimización de Enjambre de Partículas ("PSO") es muy deseable cuando se trabaja con un pequeño regulador de  
35 voltaje automático que no tiene capacidades computacionales. Las realizaciones a modo de ejemplo de la presente invención permiten por lo tanto la puesta en marcha rápida de grupos electrógenos con buenos resultados de rendimiento.
- [0120]** Por lo tanto, se han mostrado y descrito varias realizaciones de una nueva invención. Como es  
40 evidente a partir de la descripción anterior, ciertos aspectos de la presente invención no están limitados por los detalles particulares de los ejemplos ilustrados aquí, y por lo tanto se contempla que los expertos en la materia podrán realizar otras modificaciones y aplicaciones, o equivalentes de las mismas. Los términos "tener", "tiene", "incluye" e "incluir" y términos similares a los utilizados en la especificación anterior se usan en el sentido de "opcional" o "pueden incluir" y no como "requeridos". Muchos cambios, modificaciones, variaciones y otros usos y  
45 aplicaciones de la presente construcción serán, sin embargo, evidentes para los expertos en la técnica después de considerar la memoria descriptiva y los dibujos adjuntos. Se considera que todos los cambios, modificaciones, variaciones y otros usos y aplicaciones que no se aparten de la divulgación están cubiertos por la invención, que está limitada únicamente por las reivindicaciones que siguen.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de autoajuste de un controlador PID utilizado con un excitador con un voltaje de campo del excitador conectado eléctricamente a un regulador de voltaje con un voltaje de salida del campo del excitador y un generador que está energizado eléctricamente por el excitador y tiene una tensión de salida del generador, el sistema comprende: medios para proporcionar un regulador de voltaje incluyendo una fuente de energía que produce la salida del voltaje de campo del excitador y un procesador configurado para actuar como un controlador PID; el procesador además configurado para calcular una ganancia del sistema de la tensión de salida del generador, una tensión residual y la tensión de salida de campo del excitador; el procesador además configurado para calcular una constante de tiempo estimada del excitador y una constante estimada de tiempo del generador utilizando optimización de enjambre de partículas mediante la determinación de una respuesta escalonada de voltaje de salida de generador mediante el aumento de la tensión de salida de la fuente en un porcentaje predeterminado durante un periodo de tiempo predeterminado, inicializando cada posición de la partícula de la constante de tiempo del excitador y la constante de tiempo del generador, calculando el voltaje del generador, realizando una evaluación de aptitud y obteniendo y actualizando los mejores valores para la constante de tiempo estimada del excitador y la constante estimada de tiempo del generador; el procesador además configurado para utilizar la ganancia del sistema, la constante de tiempo del excitador estimada y la constante de tiempo del generador estimada para calcular ganancias PID optimizadas; y donde el controlador PID está configurado para utilizar las ganancias PID optimizadas para controlar el voltaje de salida de campo del excitador.
2. El sistema para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el regulador de voltaje está configurado para recibir como entrada una comparación de un valor digital de voltaje del generador rms frente a un voltaje de referencia.
3. El sistema para autoajustar un controlador PID para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el regulador de voltaje incluye además un convertidor analógico a digital, y está configurado para convertir un voltaje de salida del generador analógico al valor digital de la tensión de salida del generador rms.
4. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el regulador de voltaje incluye además un interruptor que está conectado eléctricamente a la fuente de alimentación y el procesador configurado para regular el voltaje de salida del campo del excitador usando el interruptor; y en el que la conexión eléctrica entre el excitador y el regulador de voltaje proporciona la tensión de salida del campo del excitador como la tensión de campo del excitador.
5. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador PID está configurado para usar la cancelación de polo cero.
6. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador PID está configurado para usar la colocación de polos.
7. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador PID está configurado para utilizar un número predeterminado de iteraciones para generar el voltaje de salida del generador calculado, la evaluación de aptitud y los mejores valores.
8. El sistema para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador PID está configurado para realizar la evaluación de aptitud utilizando una suma de una pluralidad de valores que representan la diferencia entre una pluralidad de voltajes de salida del generador medidos y la correspondiente pluralidad de voltajes de salida del generador calculados.
9. El sistema para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador PID está configurado para establecer las posiciones de partícula inicializadas de la constante de tiempo del excitador y la constante del

tiempo del generador dentro de límites y una velocidad a cero.

10. El sistema para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, donde el controlador PID está configurado para calcular la tensión de salida del generador utilizando una constante de tiempo predeterminada y condiciones iniciales, calculando el error de voltaje de circuito cerrado, calculando el voltaje de salida del excitador del regulador de voltaje y calculando una nueva tensión de salida del generador y luego repitiendo durante un número predeterminado de iteraciones calculando el error de voltaje del circuito cerrado, calculando el voltaje de salida de campo del excitador del regulador de voltaje y calculando la nueva tensión de salida del generador.
11. Un procedimiento para autoajustar un controlador PID utilizado con un excitador que tiene un voltaje de campo del excitador y conectado eléctricamente a un regulador de voltaje que tiene un voltaje de salida de campo del excitador, y un generador que está excitado eléctricamente por el excitador y que tiene un voltaje de salida del generador, el procedimiento que comprende los pasos de:
- proporcionar, mediante el regulador de voltaje, una fuente de energía que produce la tensión de salida de campo del excitador y un procesador configurado para actuar como el controlador PID que utiliza ganancias PID para controlar la tensión de salida de campo del excitador de la fuente de alimentación;
  - calcular, por el procesador, una ganancia del sistema a partir del voltaje de salida del generador, un voltaje residual y el voltaje de salida de campo del excitador, y una constante estimada de tiempo del excitador y una constante estimada de tiempo estimada usando la optimización de enjambre de partículas aumentando la salida de voltaje de la fuente de energía en un porcentaje predeterminado durante un período de tiempo predeterminado, inicializando cada posición de partícula de la constante de tiempo del excitador y la constante de tiempo del generador, calculando la tensión de salida del generador, realizando una evaluación de aptitud y obteniendo y actualizando los mejores valores de la constante de tiempo estimada del excitador y la constante de tiempo estimada del generador;
  - calcular, por el procesador, las ganancias PID optimizadas a partir de la ganancia del sistema, la constante de tiempo estimada del excitador y el tiempo estimado del generador; y
  - utilizar, mediante el controlador PID, las ganancias PID optimizadas para controlar la tensión de salida de campo del excitador.
12. El procedimiento para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de la reivindicación 11, en el que el procedimiento comprende además: convertir un voltaje de salida del generador ac analógico a un valor digital de voltaje de salida del generador rms con un convertidor digital; y comparar el valor digital de la tensión de salida del generador de rms con una tensión de referencia como entrada en el controlador PID asociado con el procesador.
13. El procedimiento para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida de campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 12, en donde el paso de realizar una evaluación de aptitud incluye además crear una suma de una pluralidad de valores que representan la diferencia entre una pluralidad de voltajes de salida del generador medidos y la pluralidad correspondiente de voltajes de salida del generador calculados con el controlador de PID.
14. El procedimiento para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo excitador de acuerdo con la reivindicación 12, en el que el paso de calcular el voltaje de salida del generador incluye además los pasos de:
- utilizar una constante de tiempo predeterminada y condiciones iniciales;
  - calcular el error de voltaje de bucle cerrado;
  - calcular la tensión de salida de campo del excitador del regulador de voltaje;
  - calcular una nueva tensión del generador; y luego repetir los pasos (b) a (d) sobre un número predeterminado de iteraciones.
15. El sistema para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 11, en donde el regulador de voltaje está configurado para recibir como entrada una comparación de un valor digital de voltaje del generador rms frente a un voltaje de referencia.
16. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el regulador de voltaje incluye además un interruptor que está conectado eléctricamente a la fuente de alimentación y el procesador

configurado para regular el voltaje de salida del campo del excitador usando el interruptor; y en el que la conexión eléctrica entre el excitador y el regulador de voltaje proporciona la tensión de salida del campo del excitador como la tensión de campo del excitador.

- 5 17. El procedimiento para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 11, que comprende además la etapa de implementar el controlador PID utilizando la cancelación del polo cero.
18. El procedimiento para el autoajuste de un controlador de PID de un voltaje de salida de un generador  
10 y un voltaje de salida de campo del excitador según la reivindicación 11, comprendiendo además el paso de la implementación del controlador PID mediante colocación de polo.
19. El procedimiento para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 11, que comprende además el paso del  
15 controlador PID utilizando un número predeterminado de iteraciones para generar el voltaje del generador calculado, la evaluación de aptitud y los mejores valores.
20. El procedimiento para autoajustar un controlador PID desde un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador según la reivindicación 11, que comprende además la etapa del controlador  
20 PID que establece las posiciones de partícula inicializadas de la constante de tiempo del excitador y la constante de tiempo del generador dentro de los límites y velocidad a cero
21. El procedimiento para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el procesador comprende:  
25 un primer procesador configurado para proporcionar el controlador PID; un segundo procesador configurado para determinar la ganancia del sistema, la constante de tiempo del excitador, la constante de tiempo del generador y las ganancias de PID optimizadas; comprendiendo además los pasos de: f. conectar eléctricamente el primer procesador al segundo procesador a través de un enlace de comunicaciones; g. transmitir, por el segundo procesador, las ganancias de PID optimizadas al primer procesador a través del enlace de comunicaciones;  
30 h. recibir, por el primer procesador, las ganancias optimizadas PID del segundo procesador a través del enlace de comunicaciones; e i. proporcionar, por el primer procesador, las ganancias optimizadas PID al controlador PID.
22. El sistema para autoajustar un controlador PID a partir de un voltaje de salida del generador y un voltaje de salida del campo del excitador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el procesador comprende: un  
35 primer procesador configurado para proporcionar al controlador PID; un segundo procesador configurado para determinar la ganancia del sistema, la constante de tiempo del excitador, la constante de tiempo del generador y las ganancias PID optimizadas; el primer procesador conectado eléctricamente al segundo procesador a través de un enlace de comunicaciones; el segundo procesador configurado además para transmitir las ganancias optimizadas PID al primer procesador a través del enlace de comunicaciones; y el primer procesador configurado además para  
40 recibir las ganancias optimizadas de PID del segundo procesador a través del enlace de comunicaciones y para proporcionar las ganancias PID optimizadas al controlador PID.

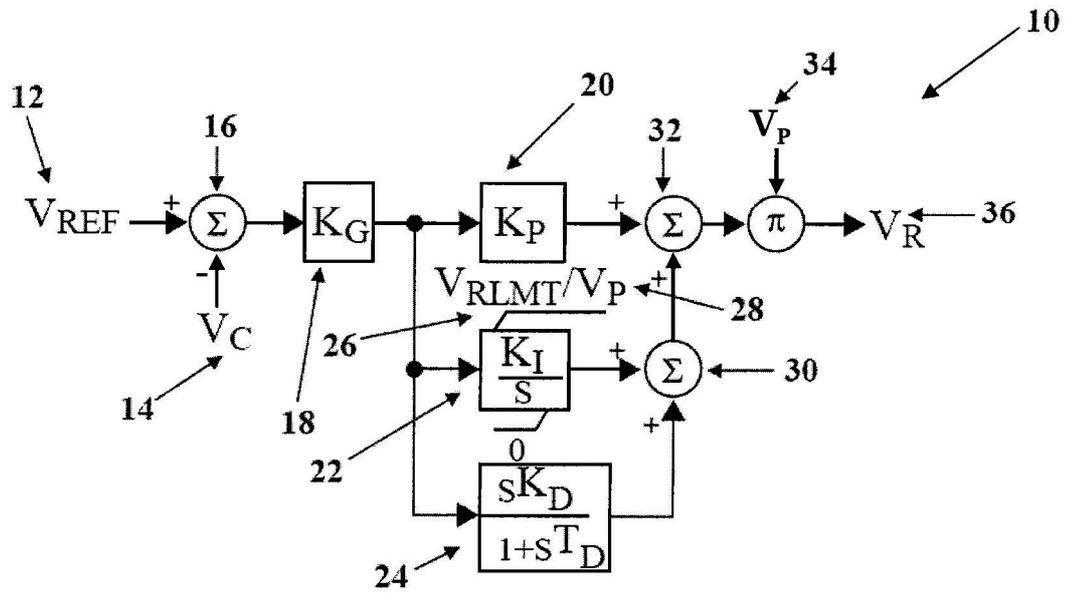
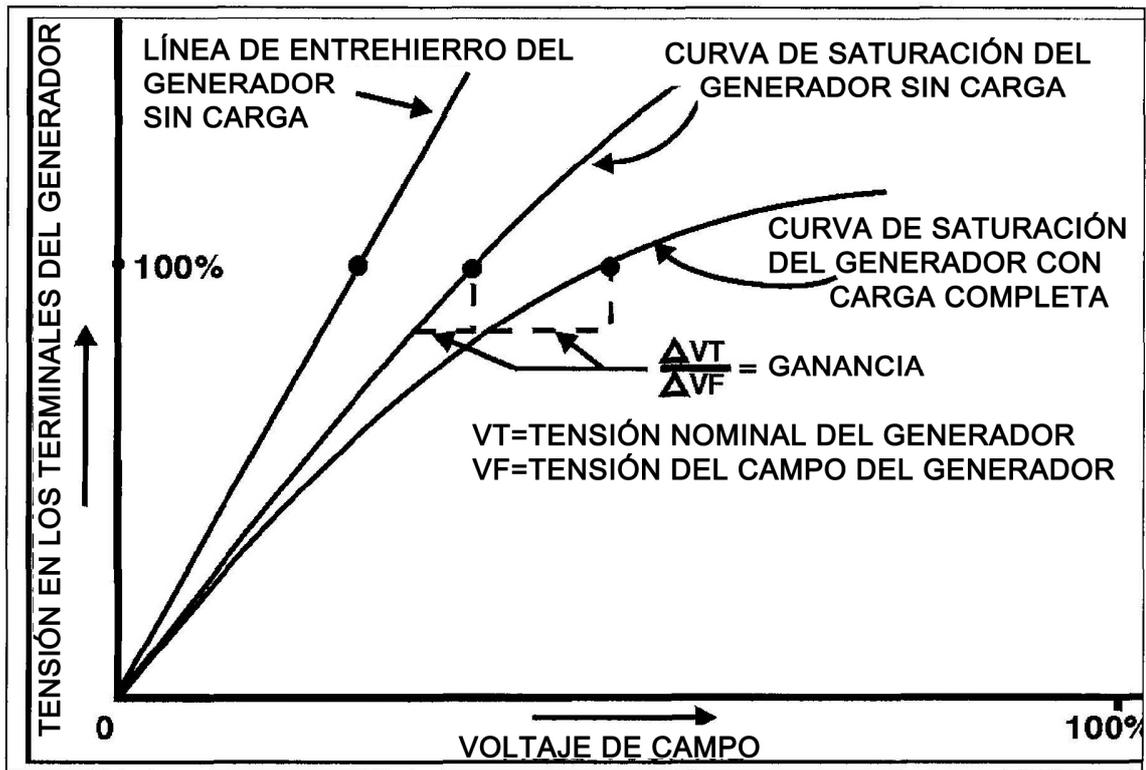


Fig. 1

Técnica anterior



**Fig. 2**

Técnica anterior

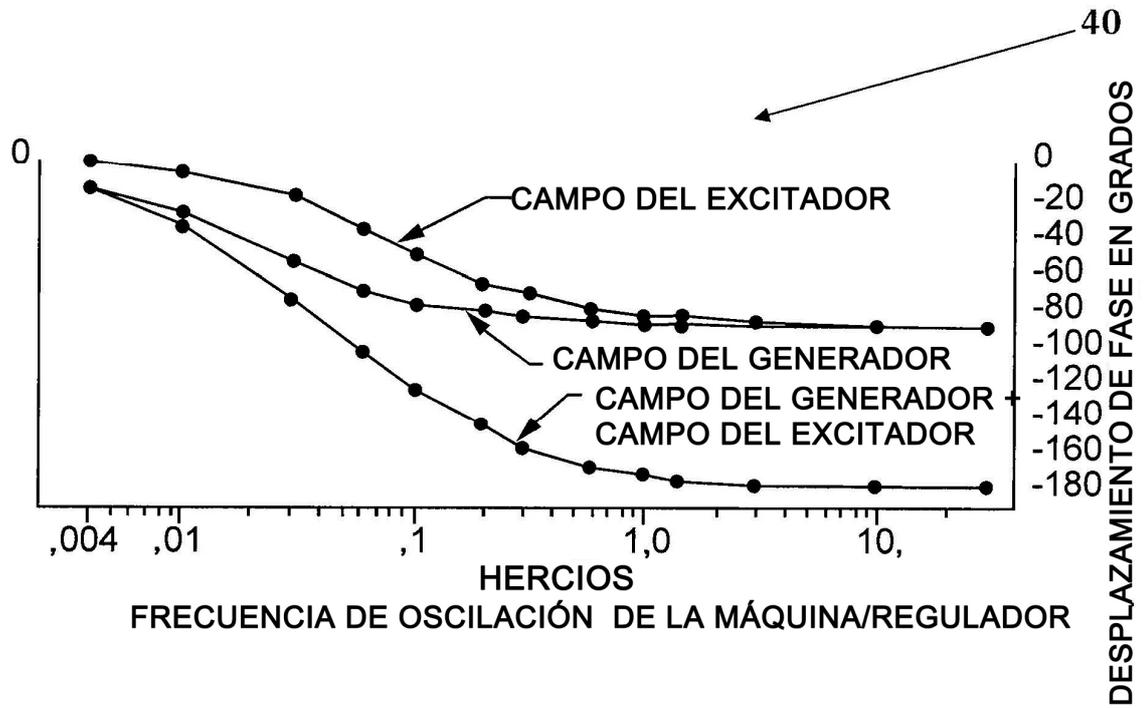


Fig. 3

Técnica anterior

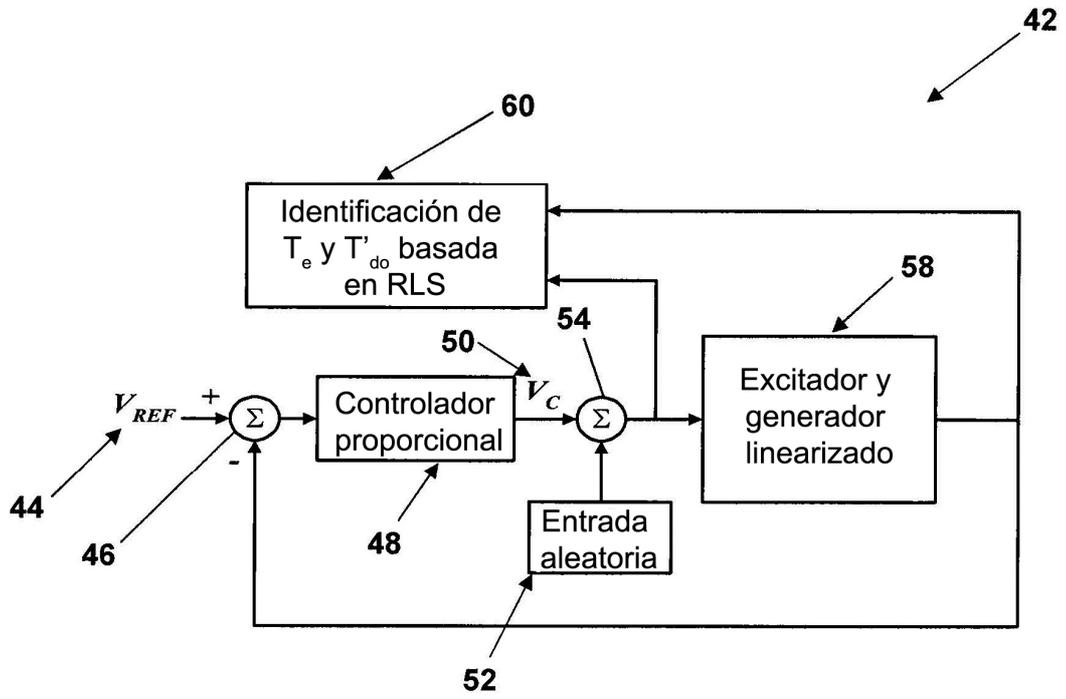


Fig. 4

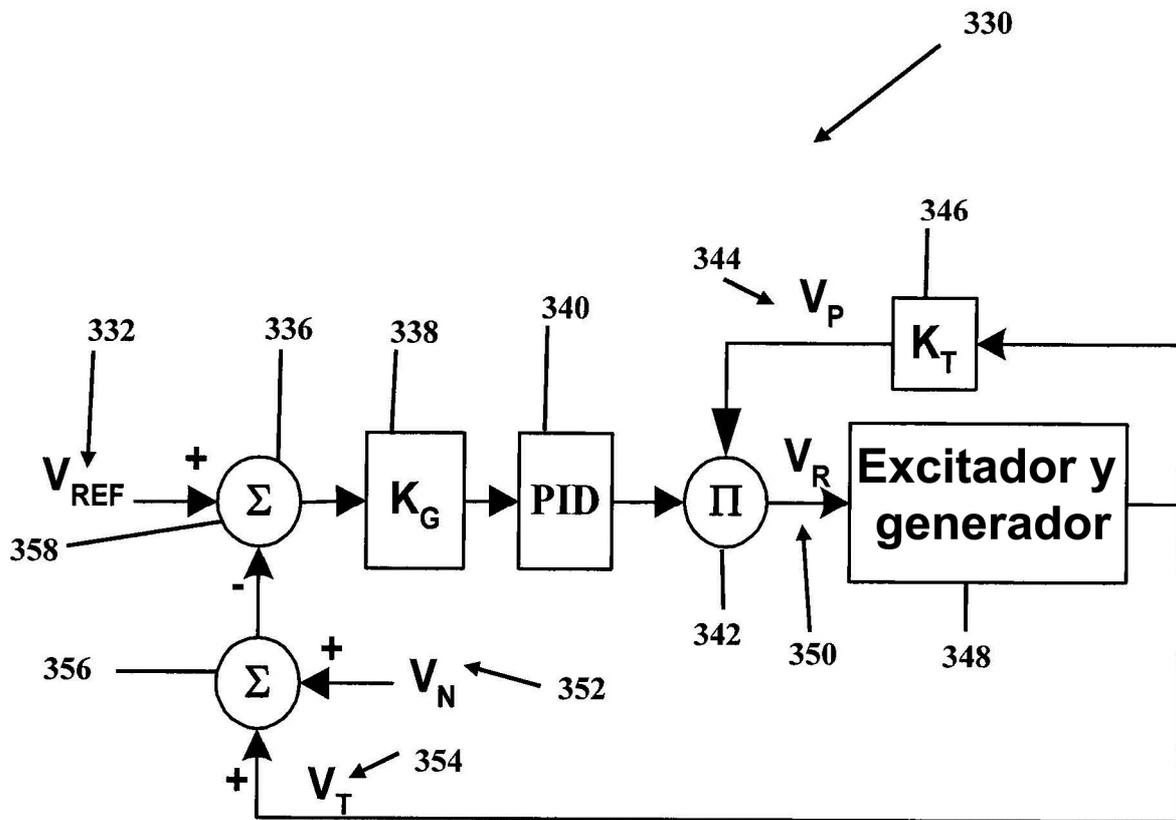
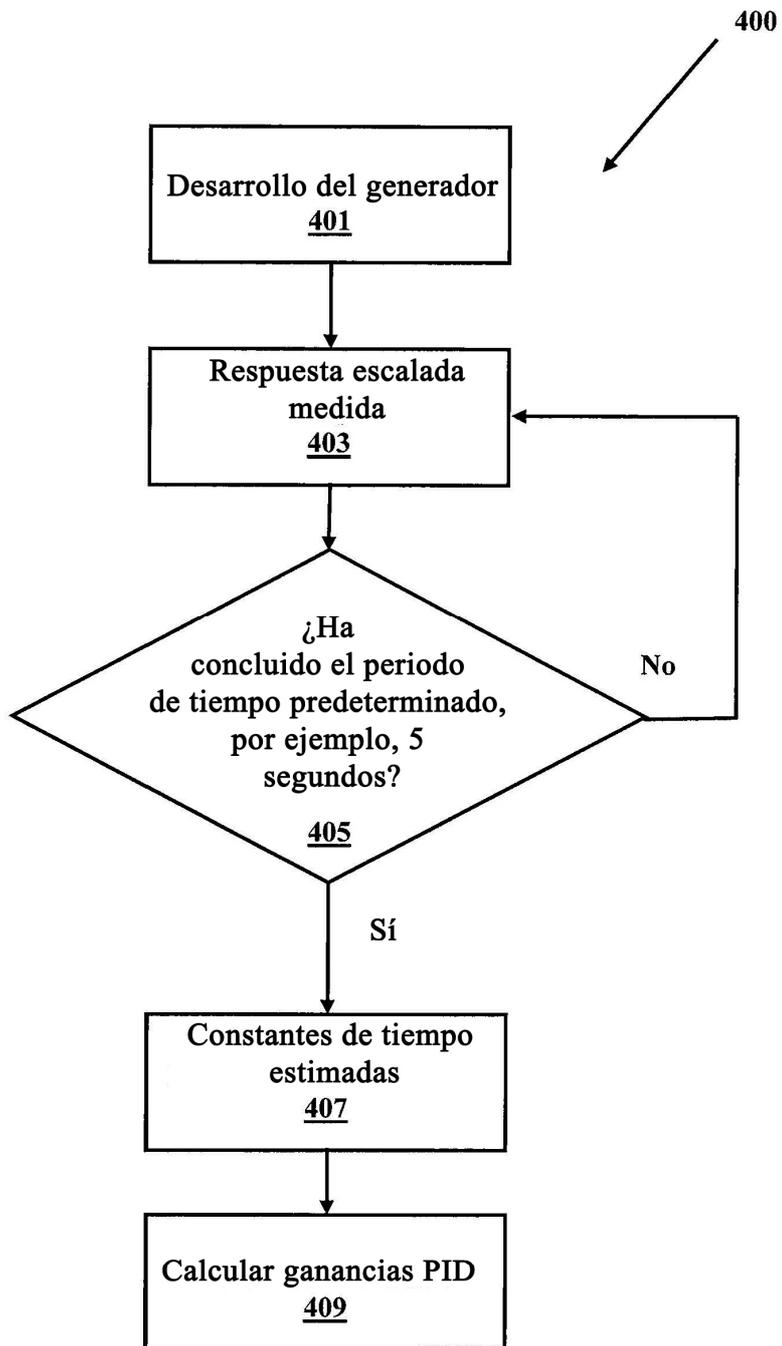


Fig. 5



**Fig. 6**

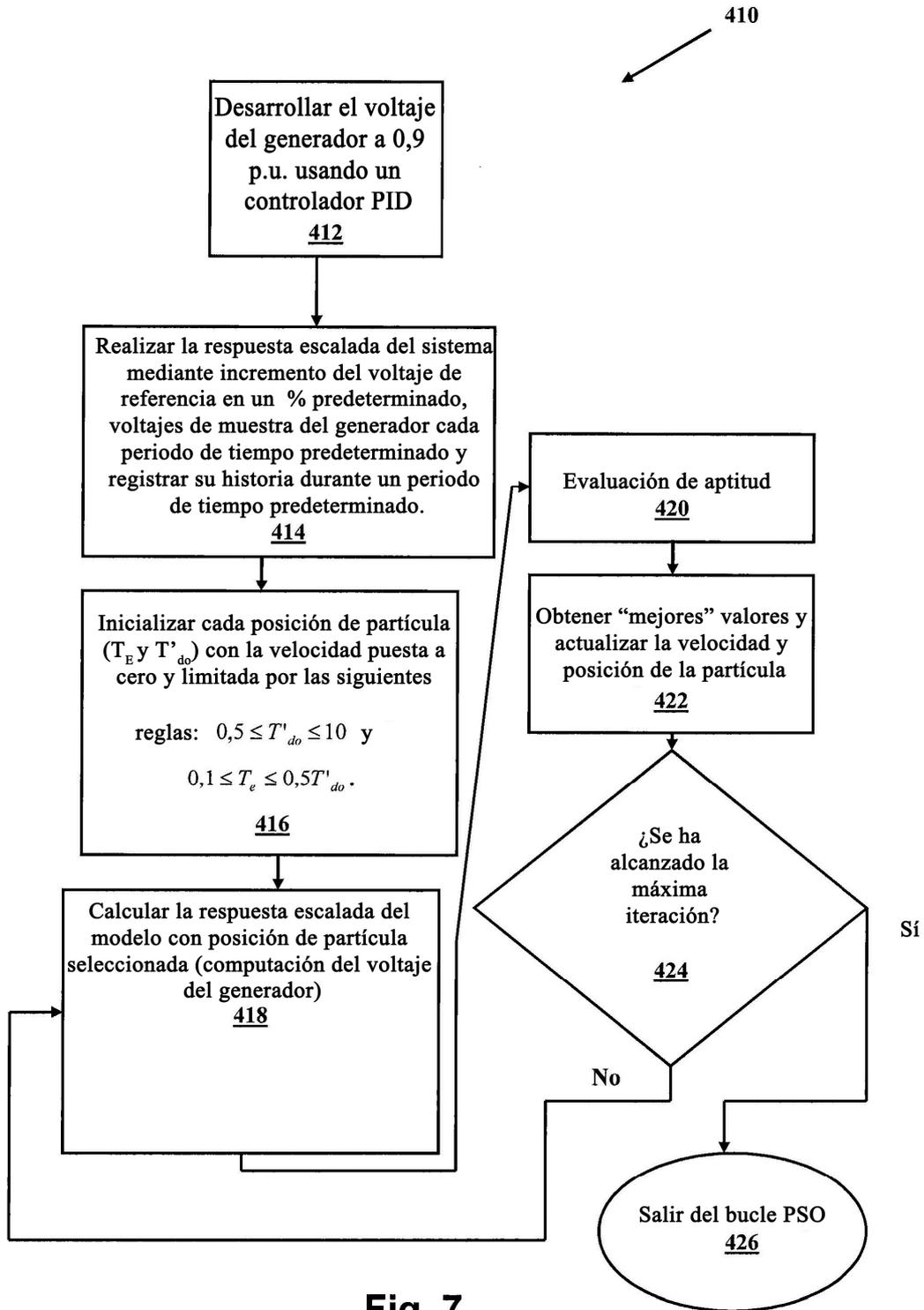


Fig. 7

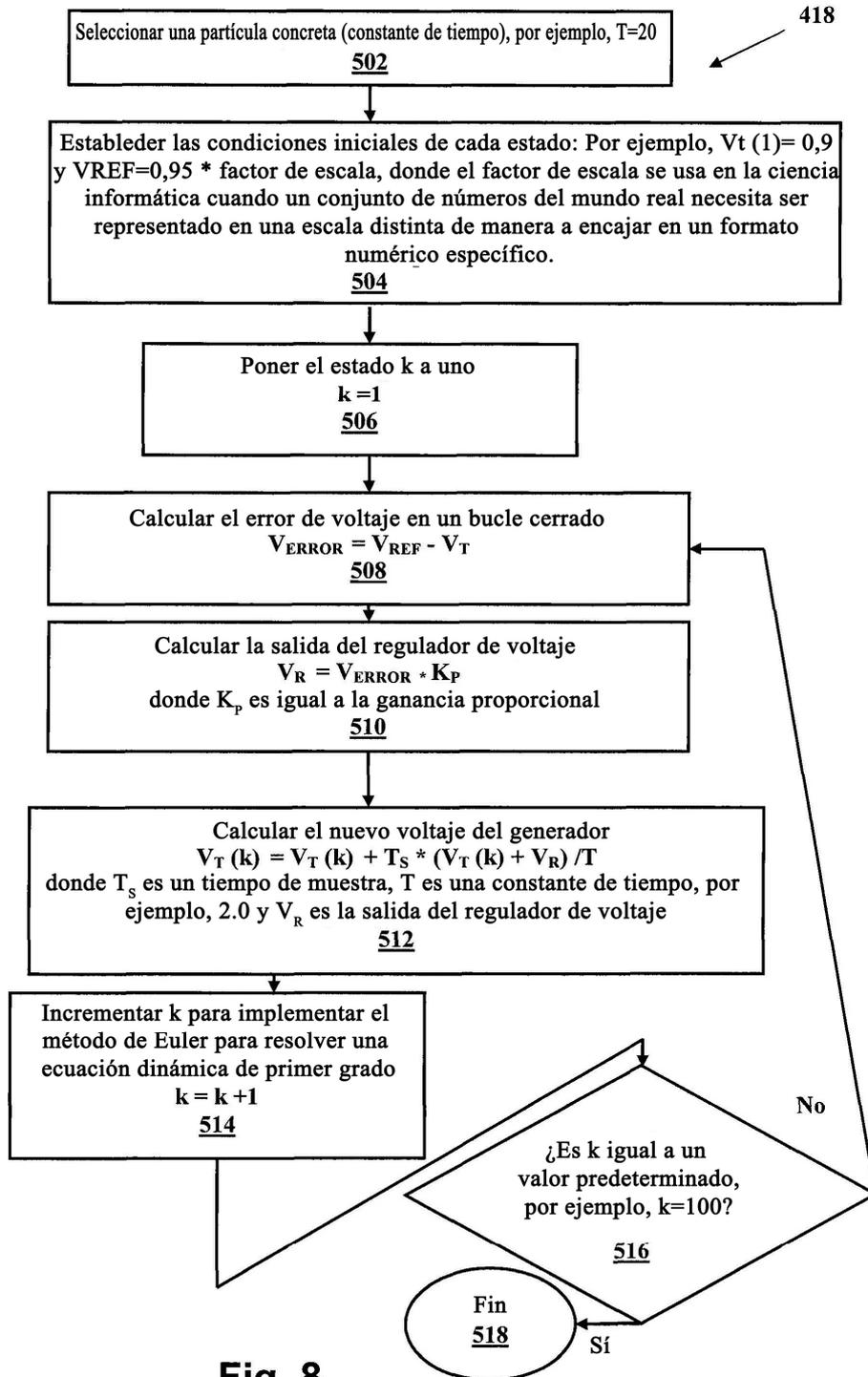
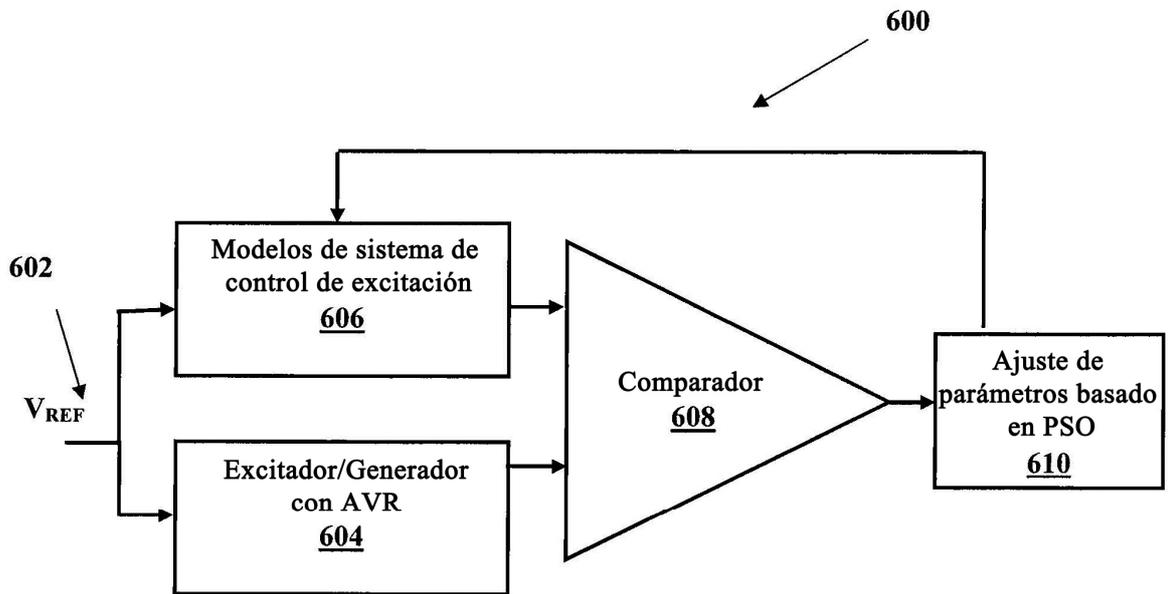


Fig. 8



**Fig. 9**

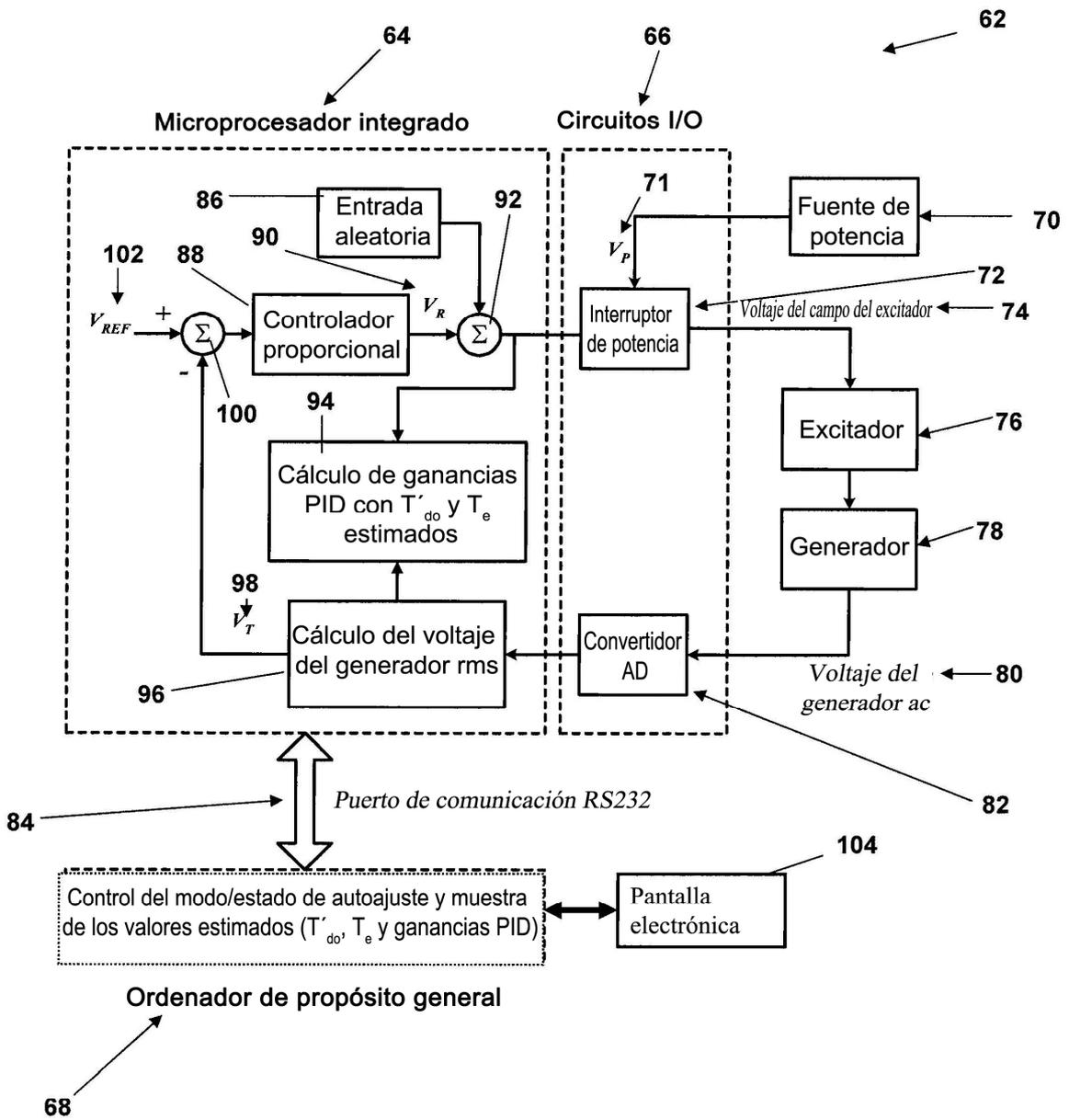


Fig. 10

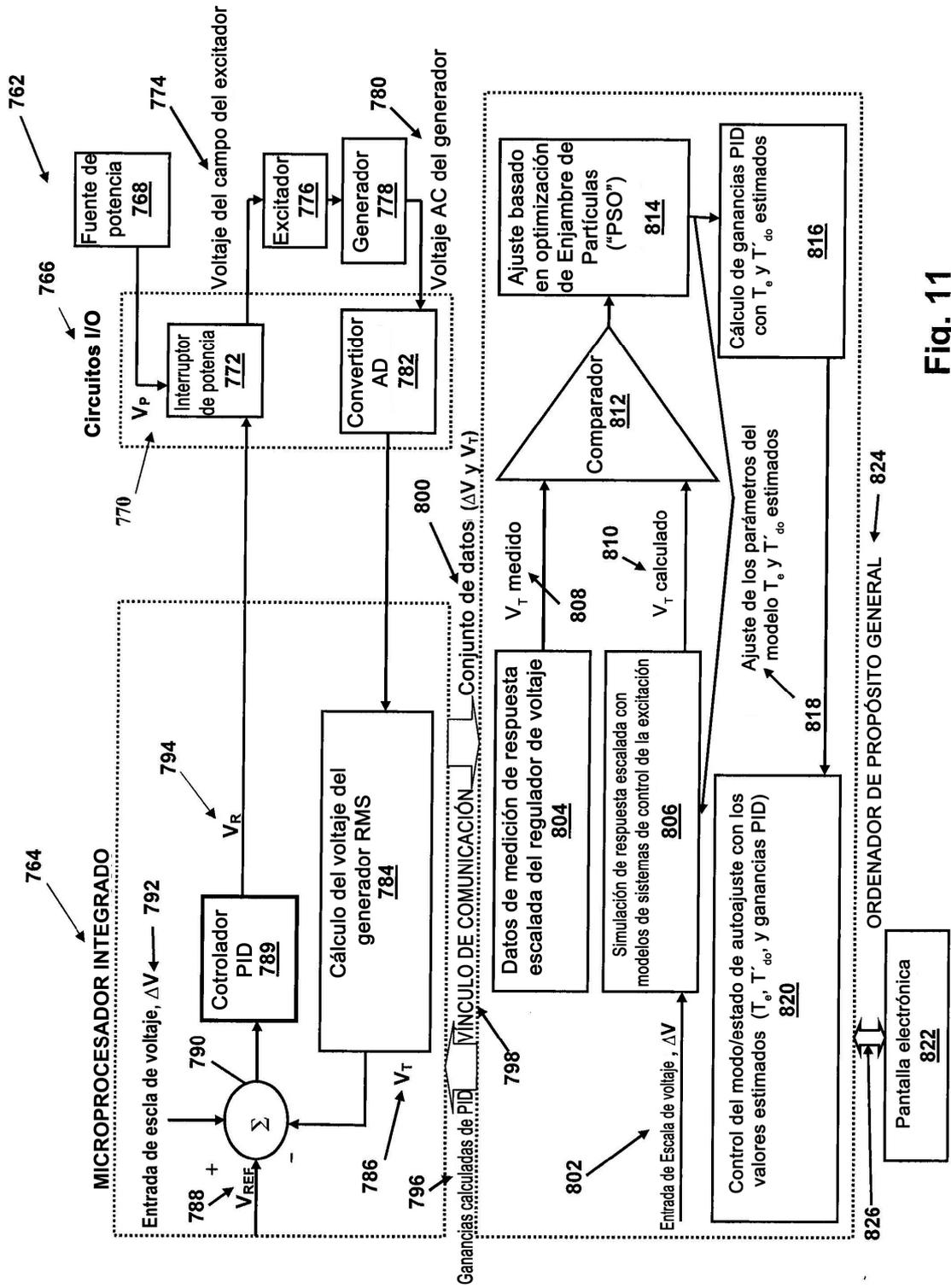


Fig. 11

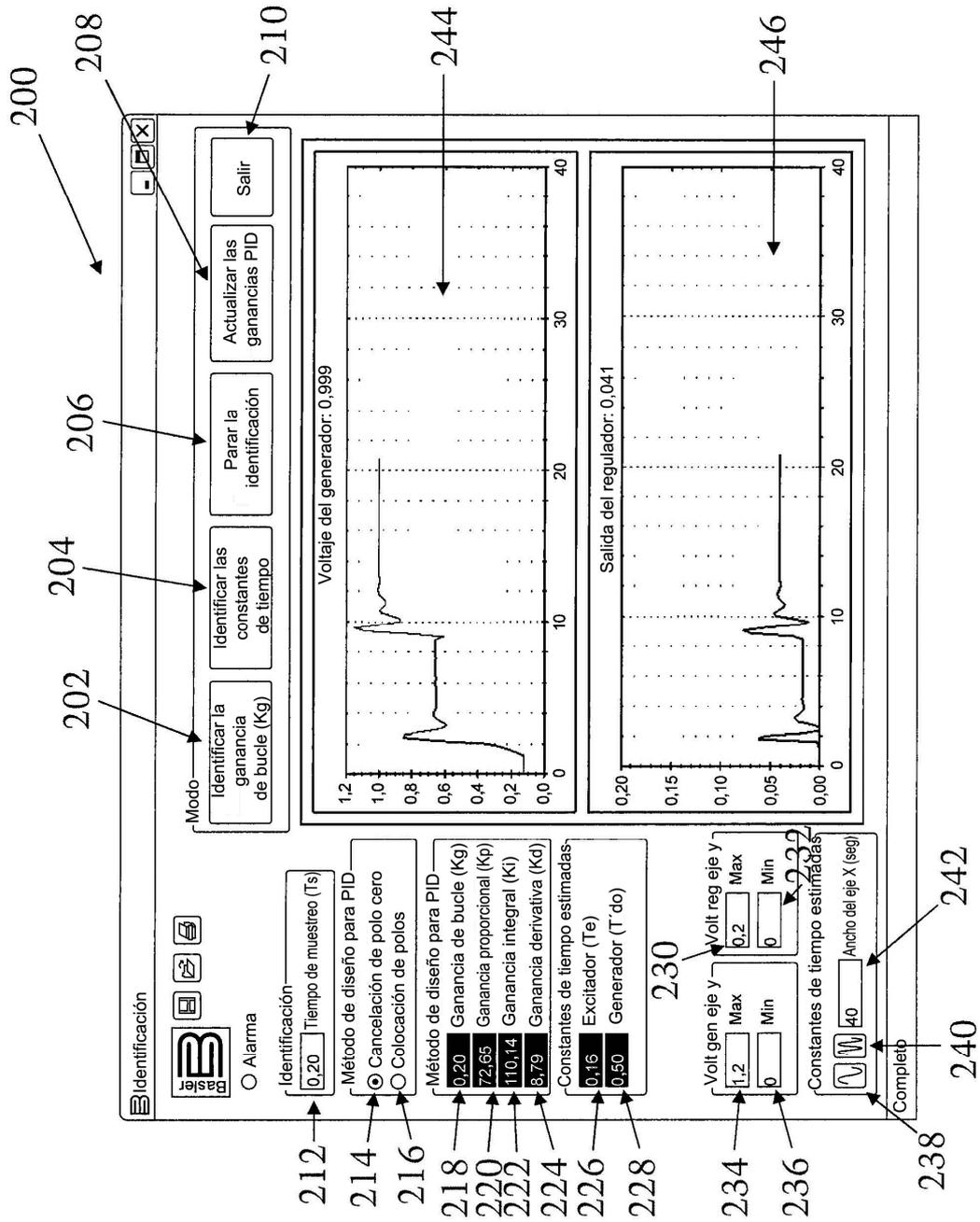


Fig. 12

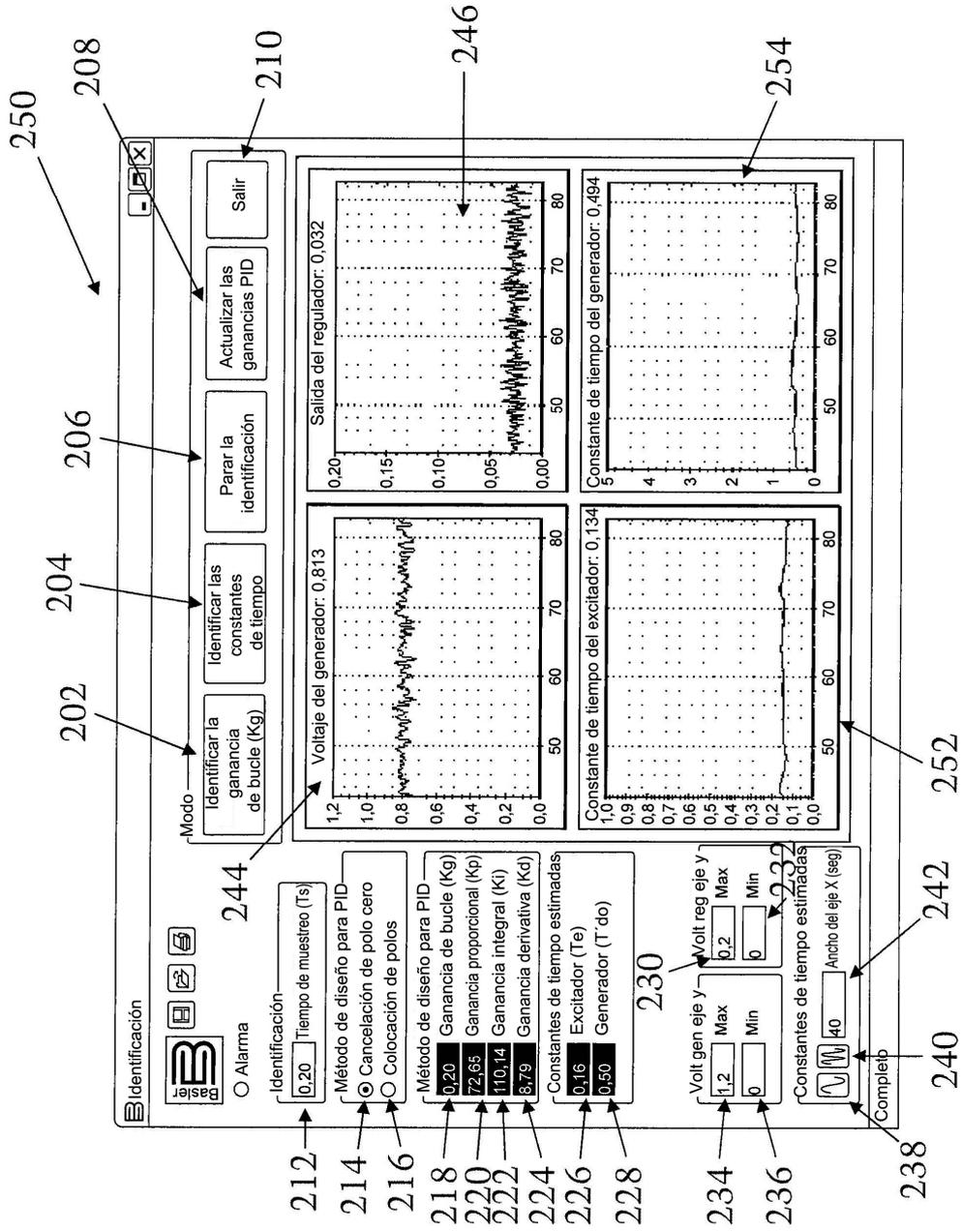


Fig. 13

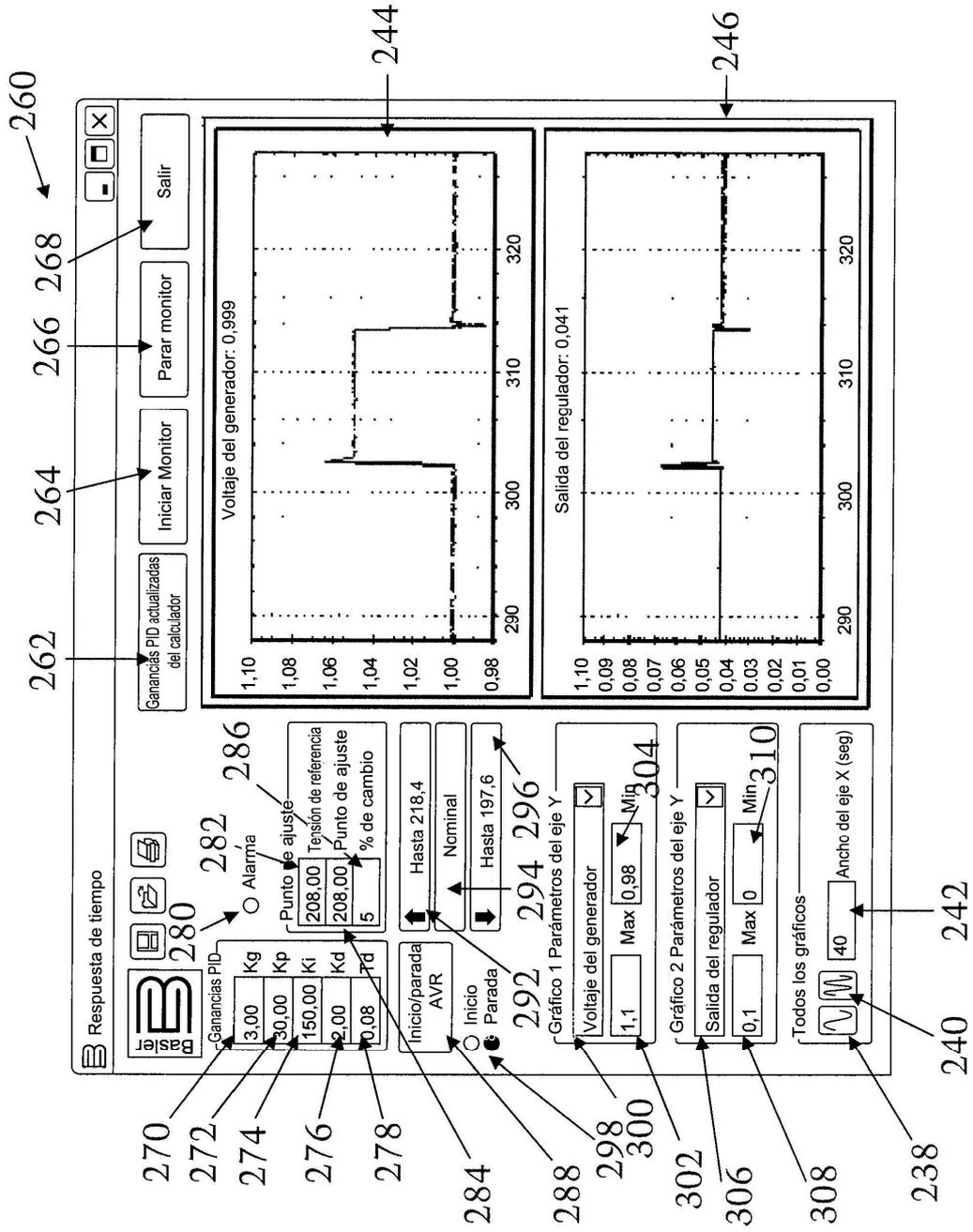


Fig. 14

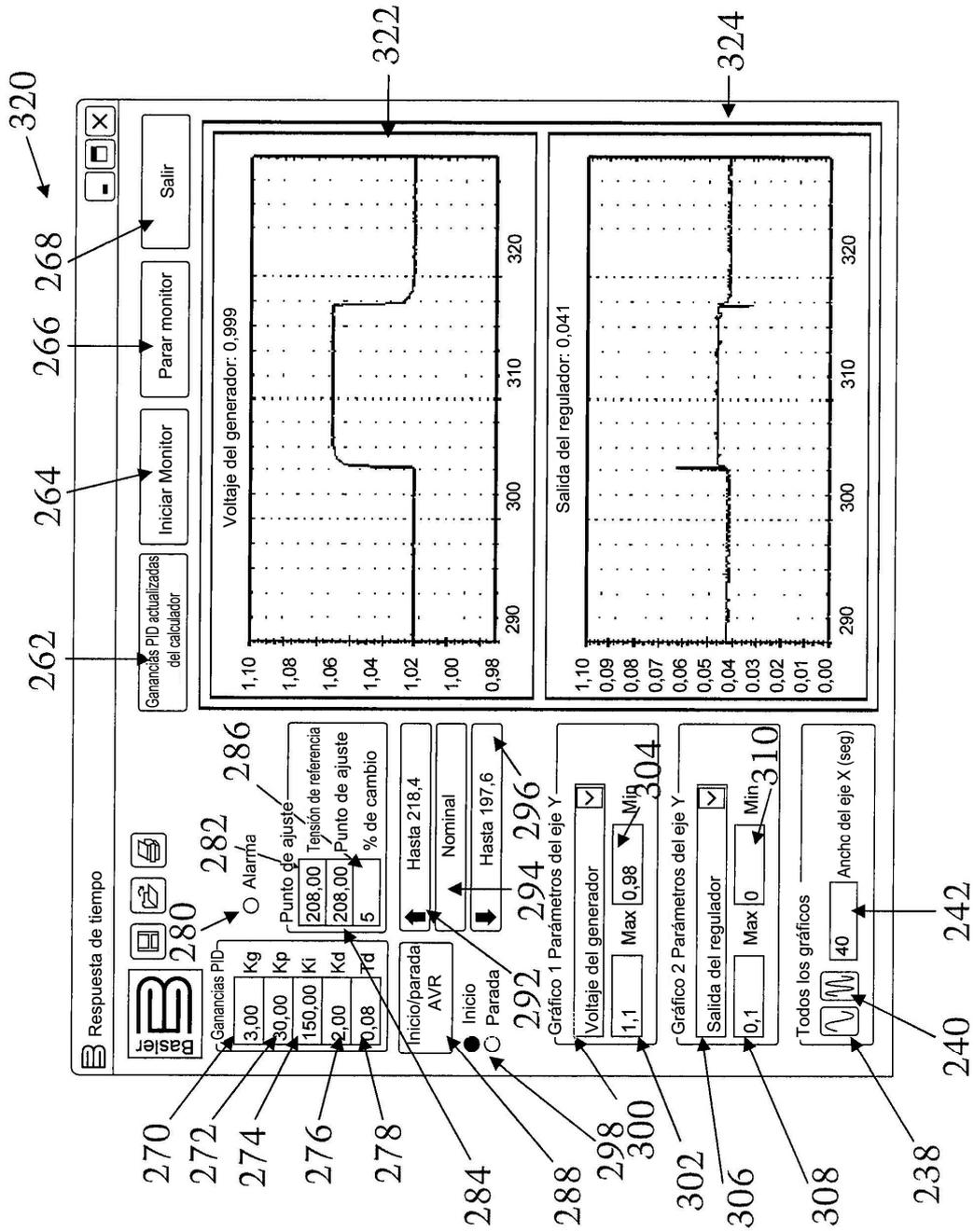


Fig. 15

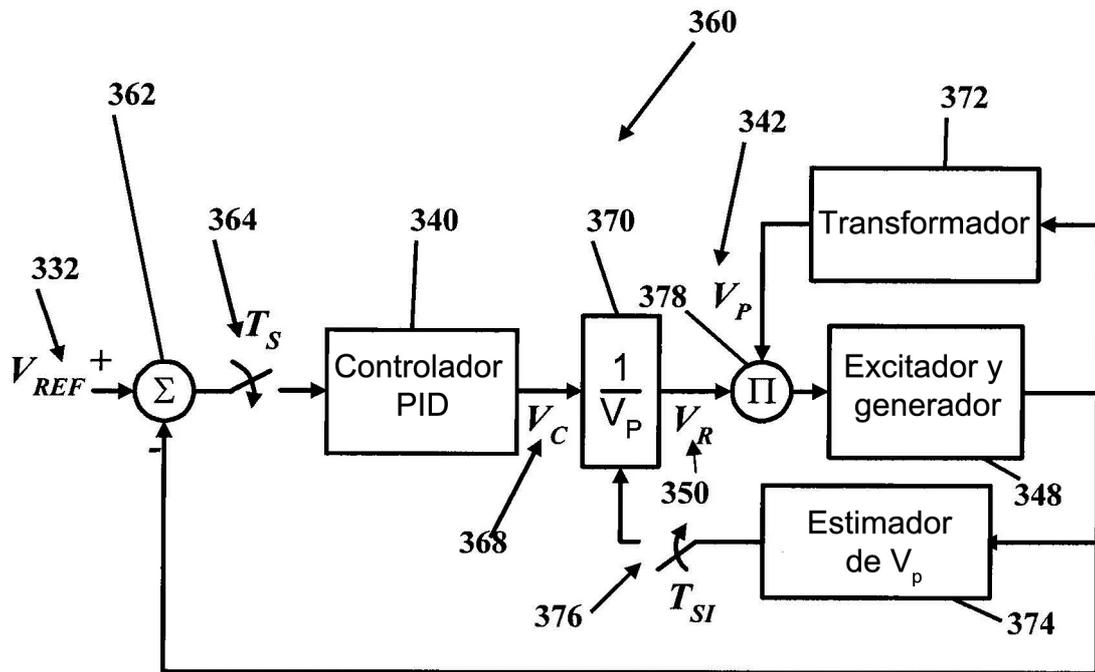


Fig. 16

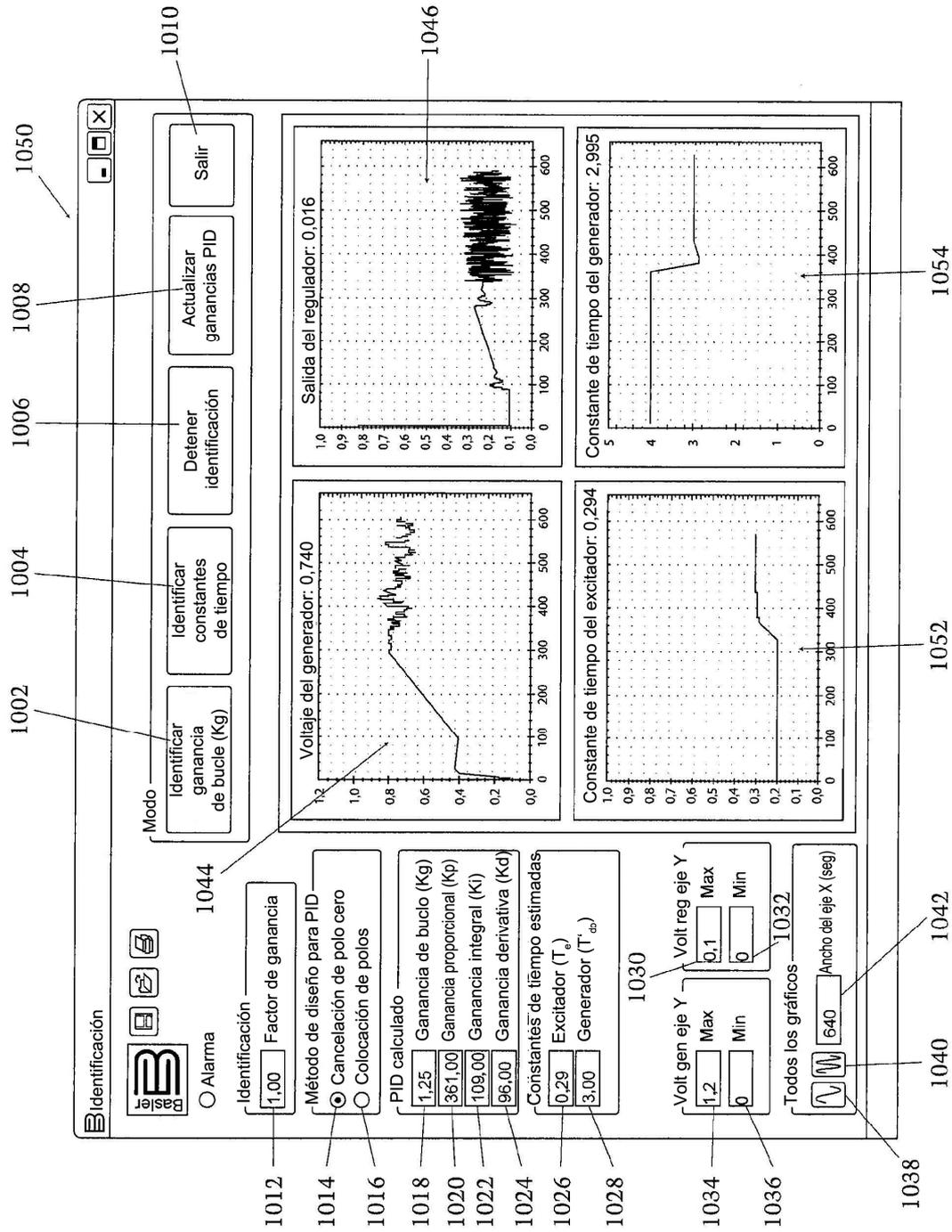


Fig. 17

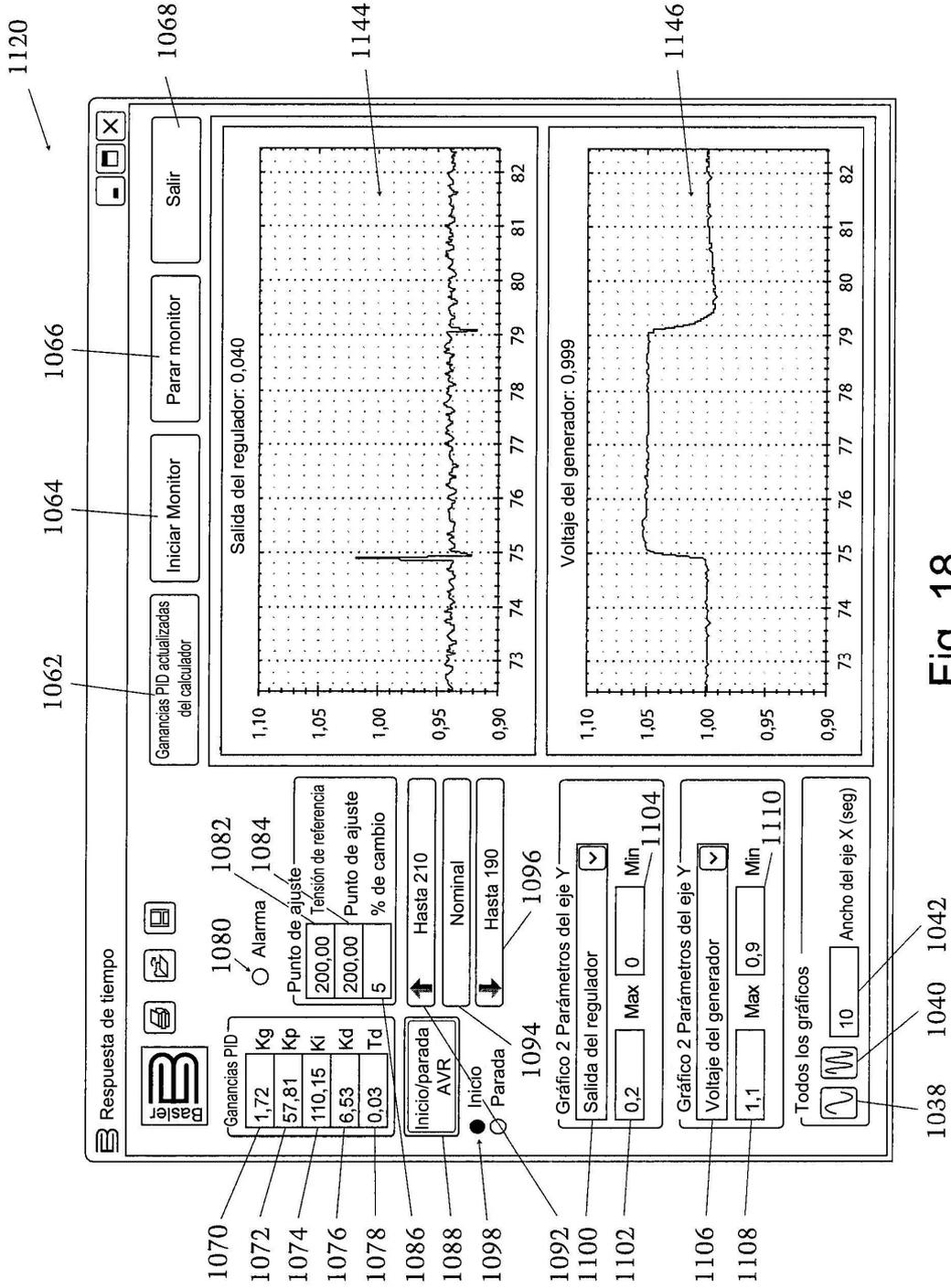


Fig. 18

1200

**TABLA**  
**RESULTADOS ESTIMADOS DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS**

**Entrada de potencia externa**

1202 →

Constantes de tiempo ( $T_e, T'_{do}$ )	RLS	PSO
(0,15; 2,0)	(0,14; 1,99)	(0,13; 2,01)
(0,3; 3,0)	(0,29; 3,0)	(0,31; 3,1)
(0,5; 4,0)	(0,49; 4,0)	(0,51; 4,09)

**Entrada de potencia autoexcitada**

1204 →

Constantes de tiempo ( $T_e, T'_{do}$ )	RLS	PSO
(0,15; 2,0)	(0,15; 1,98)	(0,13; 1,96)
(0,3; 3,0)	(0,3; 2,98)	(0,28; 3,02)
(0,5; 4,0)	(0,5; 3,98)	(0,48; 3,90)

**Caso de derivación con ruido**  
**(10 % de error relativo en el voltaje del generador)**

1206 →

Constantes de tiempo ( $T_e, T'_{do}$ )	RLS	PSO
(0,15; 2,0)	(0,15; 1,98)	(0,13; 1,82)
(0,3; 3,0)	(0,3; 2,98)	(0,25; 2,85)
(0,5; 4,0)	(0,49; 3,98)	(0,43; 3,77)

**Fig. 19**

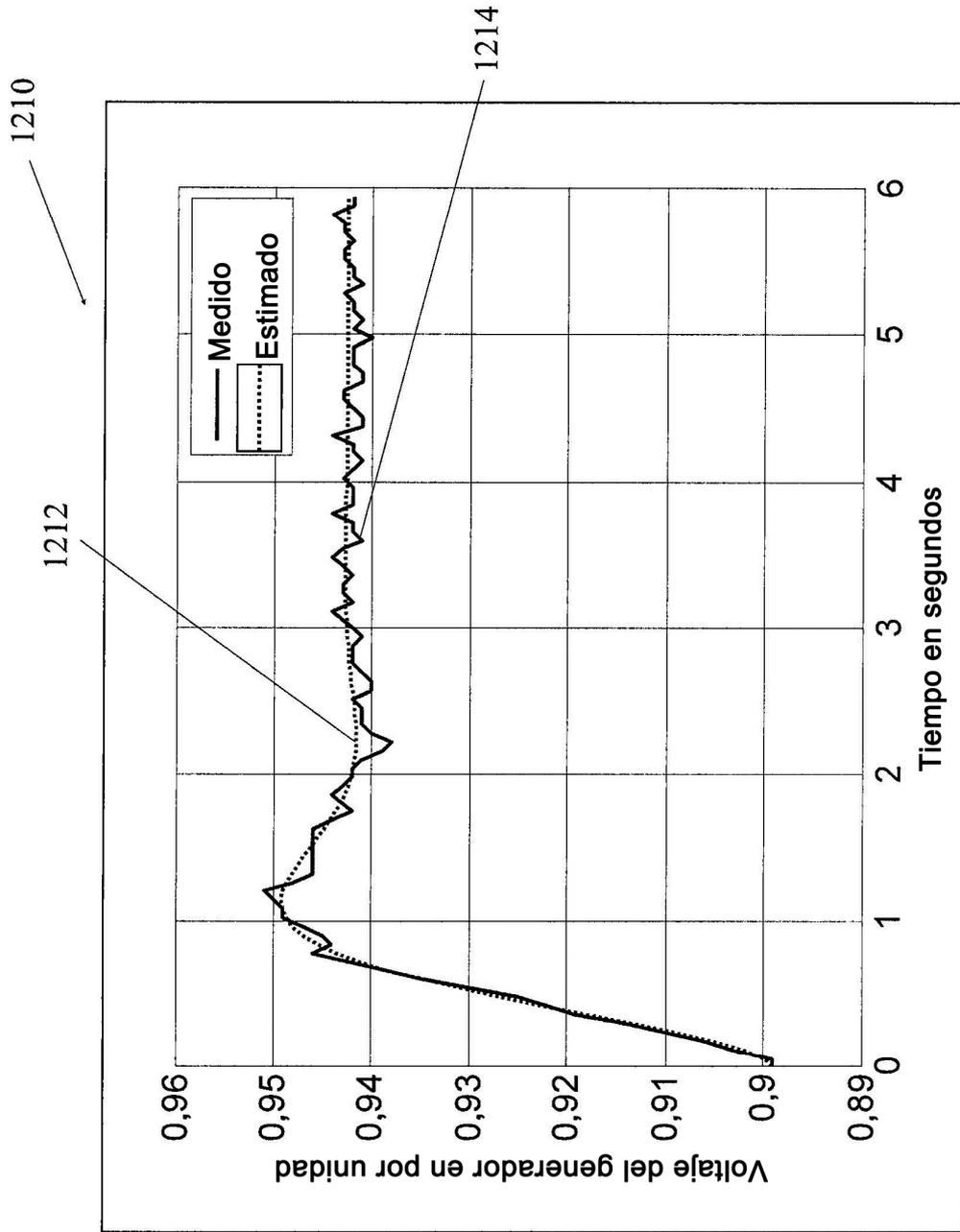


Fig. 20

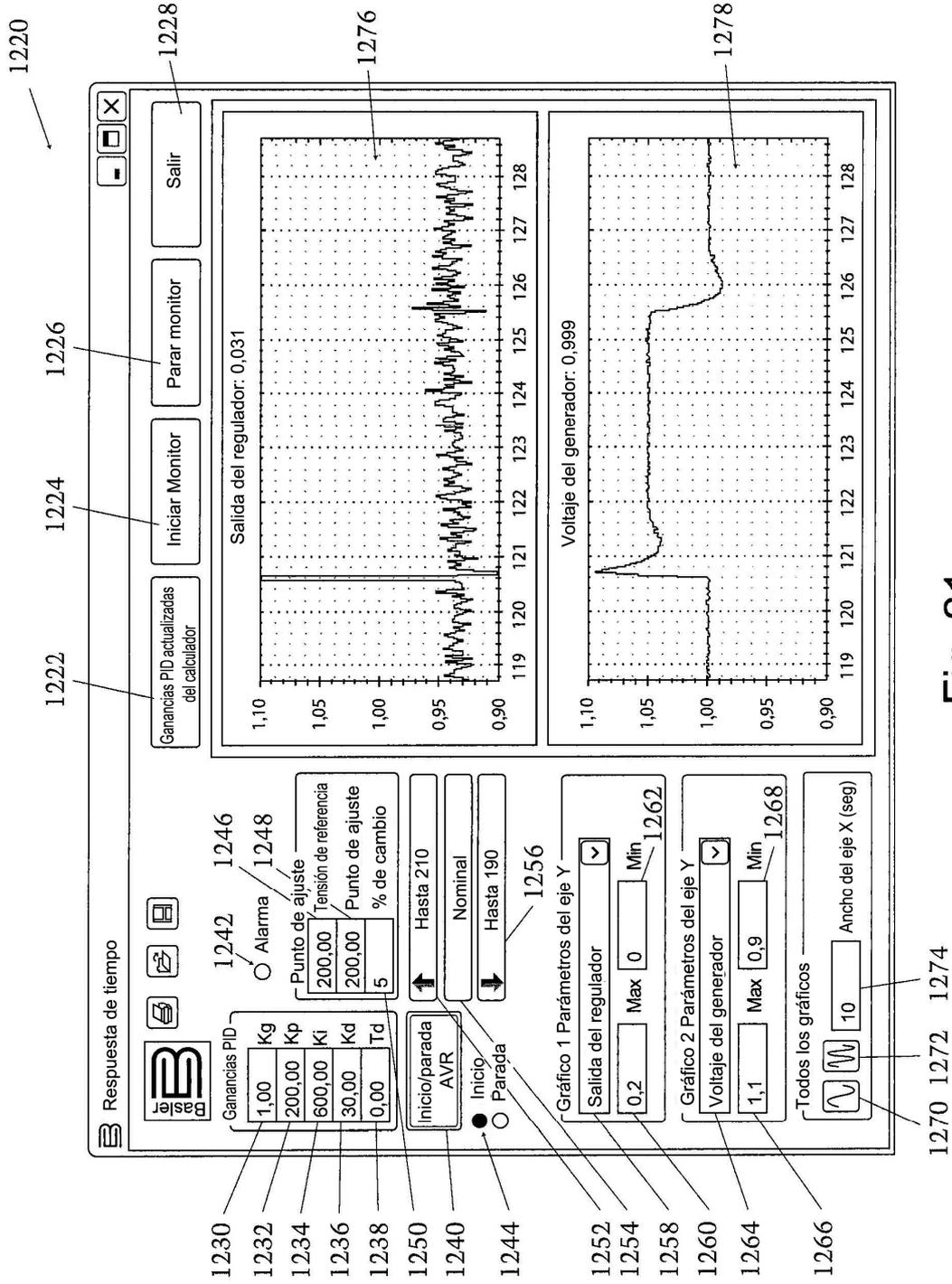


Fig. 21

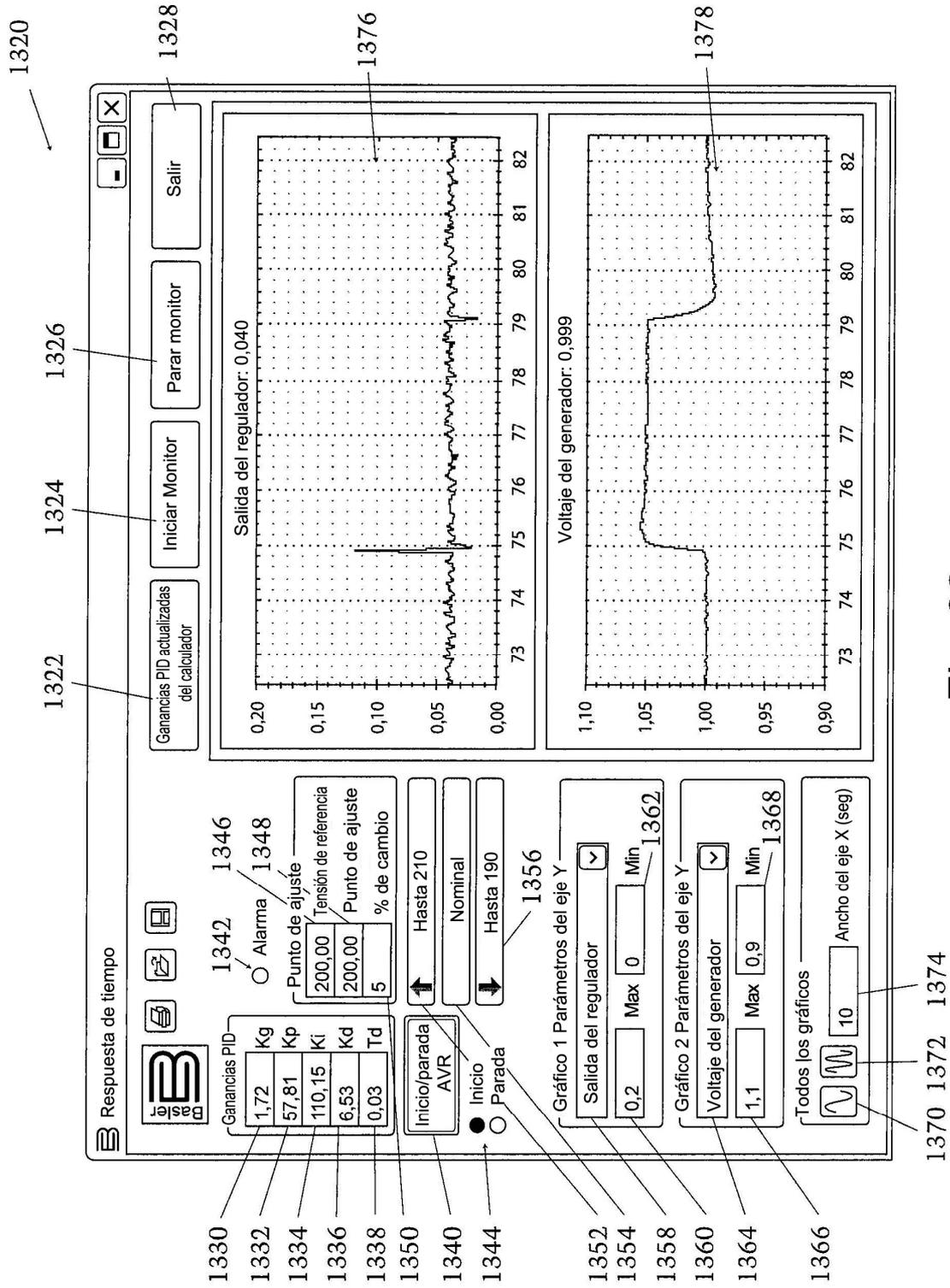


Fig. 22

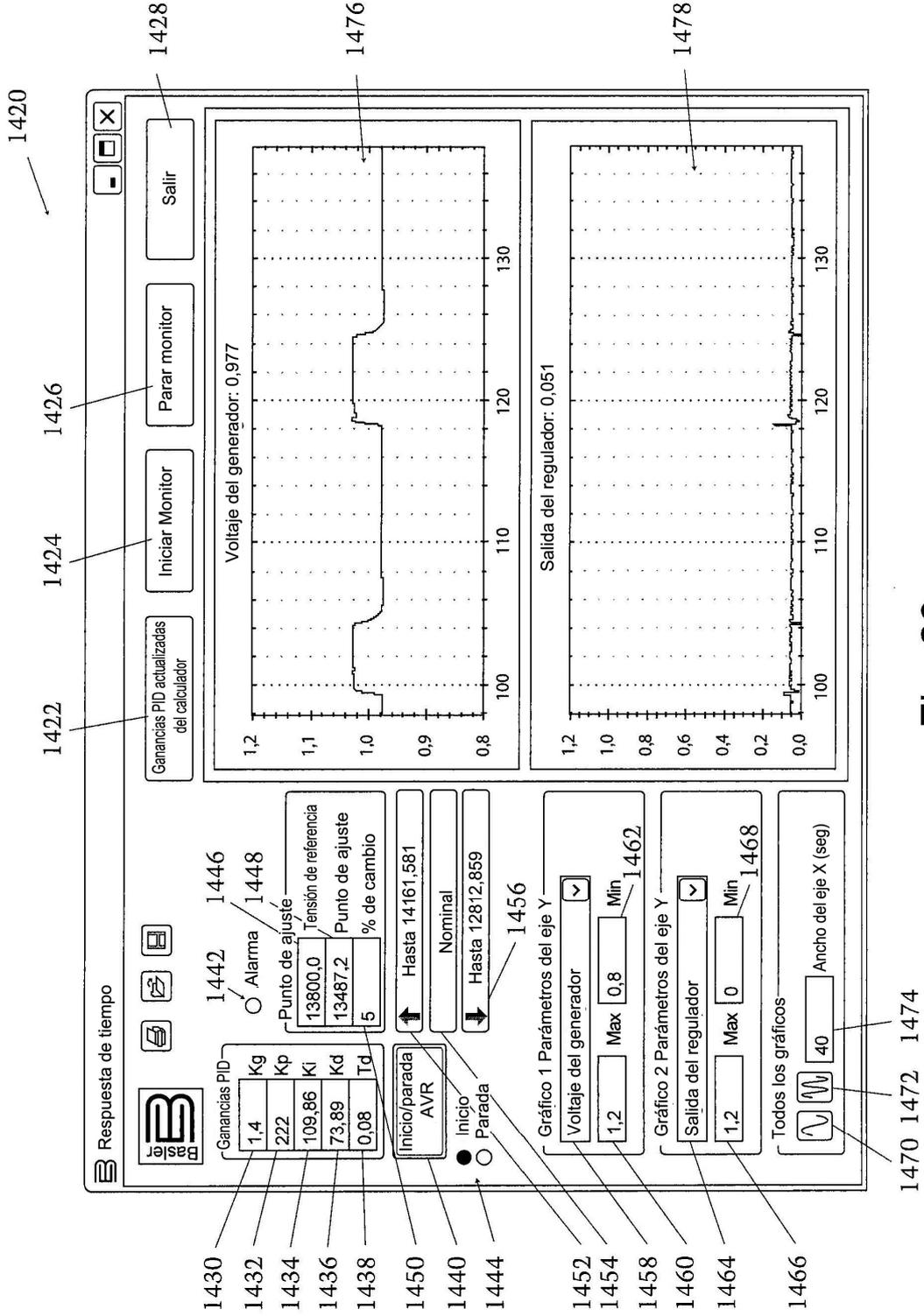


Fig. 23