

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 760 123**

51 Int. Cl.:

**B60T 17/22** (2006.01)

**B60L 3/10** (2006.01)

**B60T 8/17** (2006.01)

**B60T 8/172** (2006.01)

**B60Q 1/44** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.12.2016 PCT/IB2016/057813**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.06.2017 WO17109690**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2016 E 16834112 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2019 EP 3393873**

54 Título: **Método para controlar y recuperar la adherencia de las ruedas de un eje controlado de un vehículo ferroviario**

30 Prioridad:  
**22.12.2015 IT UB20159358**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**13.05.2020**

73 Titular/es:  
**FAIVELEY TRANSPORT ITALIA S.P.A. (100.0%)  
Via Volvera 51  
10045 Piossasco (TO), IT**

72 Inventor/es:  
**TIONE, ROBERTO**

74 Agente/Representante:  
**LINAGE GONZÁLEZ, Rafael**

ES 2 760 123 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**

Método para controlar y recuperar la adherencia de las ruedas de un eje controlado de un vehículo ferroviario

5 La presente invención se refiere a un sistema para controlar y recuperar la adherencia de las ruedas de un eje controlado de un vehículo ferroviario.

10 Se instalan sistemas electrónicos a bordo de la mayoría de los vehículos ferroviarios modernos, que normalmente incluyen subsistemas de control de deslizamiento de ruedas, destinados a intervenir tanto cuando el vehículo está en la fase de tracción como cuando está en la fase de frenado. Estos subsistemas se conocen como sistemas antiderrape o antideslizamiento, o también sistemas de WSP (protección frente a deslizamiento de ruedas).

15 Un sistema para controlar la adherencia de las ruedas, en una función antideslizante, se representa esquemáticamente en la figura 1 de los dibujos adjuntos, que se refiere a un vehículo con n ejes A1, A2, ..., An controlados. Los ejes A1, A2, ..., An comprenden un árbol S1, S2, ..., Sn respectivo, y un par respectivo de ruedas W1, W2, ..., Wn solidarias en rotación con el mismo.

20 Los dibujos ilustran de manera general tan solo una de las ruedas de cada eje.

25 El sistema de WSP de la figura 1 comprende una unidad electrónica de control, ECU, normalmente basada en arquitectura de microprocesador, que recibe señales de tacómetro relacionadas con la velocidad angular de cada eje A1, A2, ...An a partir de detectores SS1, SS2, ..., SSn asociados respectivamente con estos ejes. La unidad electrónica de control, ECU, también está conectada a los aparatos TC1, TC2, ..., TCn de control de par, cada uno asociado con un eje A1, A2, ..., An respectivo.

30 La unidad electrónica de control, ECU, se proporciona para accionar la modulación del par aplicado a cada eje según un algoritmo predeterminado si, en caso de aplicar par durante la tracción o el frenado en una situación de adherencia degradada, las ruedas de uno o más ejes terminan en un posible estado de deslizamiento incipiente. La modulación de par se implementa de tal manera que se impide un bloqueo total de los ejes, posiblemente para llevar cada eje a una situación de deslizamiento controlado con vistas a recuperar la adherencia y en cualquier caso durante toda la duración de la situación de adherencia degradada.

35 La figura 2 muestra un diagrama de bloques que ilustra el control implementado en un único eje: el error o la diferencia E(t) entre el valor de velocidad de referencia  $V_R(t)$  al que se desea hacer deslizar el eje A controlado y la velocidad medida angular  $V_M(t)$  detectada por el sensor SS asociado y condicionada por un módulo APM de adquisición y procesamiento se aplica como señal de entrada a un módulo CM de control, que proporciona como salida una señal de accionamiento Y(t) al aparato TC de control de par asociado con el eje A.

40 La figura 3 ilustra a modo de ejemplo no limitativo una posible manera de realizar el aparato TC de control de par. Tal aparato comprende una unidad 100 electrónica de control y accionamiento, que controla un grupo 101 de válvulas de solenoide que incluye una válvula 102 de solenoide de carga y una válvula 103 de solenoide de descarga. En la realización ilustrada, estas válvulas de solenoide son válvulas de tres vías con dos posiciones. La válvula 102 de solenoide está normalmente abierta, y la válvula 103 de solenoide está normalmente cerrada.

45 La salida de la válvula 102 de solenoide de carga está acoplada, de una manera conocida en sí misma, a un cilindro 104 de freno asociado con el eje A.

50 Bajo el control de la unidad 100 electrónica, el grupo 101 de válvulas permite reducir, mantener o aumentar selectivamente la presión de control suministrada al cilindro 104 de freno, dentro de valores comprendidos entre la presión atmosférica y la presión de frenado procedente de un conducto 113 conectado a la válvula 102 de solenoide de carga. La unidad 100 puede estar predispuesta para controlar la presión al cilindro 104 de freno en un modo de bucle abierto, delegando el cierre del bucle de control a un bucle de velocidad según la figura 2, o para controlar dicha presión en un modo de bucle cerrado a través de una realimentación lograda mediante el uso de un sensor 105 de presión.

60 Un motor 106 eléctrico está asociado con el eje A, que puede aplicar a tal eje un par, tracción o frenado, según una petición de par 107 aplicado a un inversor 108 que acciona este motor eléctrico. El par que va a aplicarse al eje A por medio del motor 106 corresponde a una petición de par 110, modificado por un par 111 de corrección, variable entre cero y el valor del par 110. El par 107 es positivo en caso de tracción y negativo en caso de frenado. Un módulo 112 de combinación, en caso de deslizamiento durante el frenado, "combina" la petición de modulación del par aplicado al eje A entre el sistema neumático y el sistema regenerativo, de una manera predeterminada.

65 El aparato de control de par ilustrado en la figura 3 puede realizarse según muchas variantes conocidas por los expertos en la técnica. Por ejemplo, en el caso de vehículos ferroviarios arrastrados, o que cumplen con

reglamentos de la UIC, que normalmente tienen sistemas antideslizantes de tipo neumático completamente aislados de los sistemas de tracción, la unidad 100 no se acciona por el módulo 112 de combinación mediante una petición 113 de modulación, tal como se ilustra en la figura 3, sino directamente por el módulo CM de control de la figura 2, mediante una petición 114 de modulación de par ilustrada mediante una línea discontinua en la figura 3.

El módulo CM de control de la figura 2 puede funcionar según algoritmos logrados mediante diagramas de estados, o estructuras de PID, o sistemas basados en una lógica difusa. Estos algoritmos tienen el objetivo de mantener el eje, que está en un estado de deslizamiento incipiente, a una denominada velocidad de "deslizamiento" correspondiente a una fracción de la velocidad del vehículo, conociéndose también tal velocidad como velocidad de consigna. Tales algoritmos requieren procedimientos de ajuste de parámetros, de tal manera que se hace que tales algoritmos sean estables, evitando o al menos limitando las oscilaciones del sistema y, en el caso de sistemas de WSP, evitando oscilaciones excesivas de la velocidad instantánea del eje controlado alrededor de la velocidad de consigna. El ajuste de los parámetros anteriormente mencionados es más preciso y exacto cuanto menos varían las variables de sistema alrededor de uno de sus valores convencionales.

En el caso de un sistema de control de adherencia, una de las variables que tiene un amplio intervalo de variación es la fuerza de fricción instantánea  $F_a(t) = \mu(\delta) m g$ , donde  $m$  es la masa en el punto de contacto entre la rueda y el raíl,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\mu$  es el coeficiente de adherencia y  $\delta$  es el deslizamiento, es decir el valor de la diferencia entre la velocidad del vehículo y la velocidad tangencial de la rueda, dividido entre la velocidad del vehículo. La fuerza  $F_a(t)$  actúa en el punto de contacto entre la rueda y el raíl (figura 8).

El coeficiente de adherencia  $\mu$  varía en función del deslizamiento  $\delta$  sustancialmente de la manera ilustrada en el gráfico de la figura 7. En condiciones normales de peso de vehículo, valores de  $\mu$  pseudoestáticos ( $\delta \approx 0$ ), tales como para permitir que comience el fenómeno de deslizamiento, están cerca de 0,09 y pueden disminuir hasta valores de aproximadamente 0,01 o incluso menos en presencia de hojas húmedas o mezclas de agua y óxido en los raíles, es decir, experimentando variaciones del orden de 20 dB. Además, en el caso de determinados contaminantes, dado un valor de  $\mu$  inicial determinado ( $\approx 0$ ), el valor instantáneo de  $\mu(\delta)$ , a la variación en tiempo real de  $\delta$ , puede experimentar variaciones de hasta -6 dB, o superiores.

Además, la masa  $m$  en el eje puede variar entre el peso de tara y el peso de carga completo, tanto de manera estática como dinámica durante el deslizamiento, debido al cabeceo del vagón, con la consiguiente redistribución del peso entre los dos ejes del vagón.

En un estado de deslizamiento simultáneo de múltiples ejes, puede producirse el denominado fenómeno de "limpieza de raíles": un eje deslizante produce fricción en el punto de contacto entre las ruedas y los raíles, inyectando de ese modo energía y limpiando parcialmente los propios raíles, aumentando el valor  $\mu$  para el siguiente eje. Este fenómeno provoca que los ejes consecutivos "encuentren" valores de adherencia instantáneos diferentes unos de otros.

Se observa entonces que, a medida que disminuye la velocidad, el coeficiente de fricción entre el disco de freno y la pastilla de freno (en el caso de frenos de discos) o entre la rueda y la zapata (en el caso de frenos de zapata) puede variar de manera considerable.

Finalmente, un sistema destinado a gestionar un control de par por medio de una pluralidad de accionadores, tales como el descrito con referencia a la figura 3, debe adaptarse a diferentes funciones de transferencia y diferentes constantes de tiempo, en tiempo real. La coexistencia de estos cambios requiere la implementación de un ajuste "no rígido", tal como para aceptar todo el espectro de variaciones, con la consecuencia de no obtener un control preciso y sensible frente a variaciones rápidas del entorno, o un ajuste adaptativo "mapeado" mediante una "tabla de consulta" de parámetros seleccionados en tiempo real en función de una o más de las variables del entorno, tal como se describe en el documento EP 2147840 A2.

El documento EP 2147840 A1 describe un método para el control y la posible recuperación de adherencia de las ruedas de un eje controlado de un vehículo ferroviario. Un método de este tipo comprende la generación de una primera señal de velocidad, indicativa de la velocidad angular real de las ruedas de dicho eje, y de una segunda señal de velocidad indicativa de la velocidad de vehículo real. A partir de estas señales de velocidad, se calcula el valor del deslizamiento instantáneo real de las ruedas del eje. El error o la diferencia entre el valor del deslizamiento instantáneo real y un valor de deslizamiento deseado se calcula en función de la aceleración detectada de las ruedas del eje y la presión de freno conferida a los cilindros de freno asociados con estas ruedas. Este error o diferencia de deslizamiento se usa para generar una señal de accionamiento para los medios de control de la presión de frenado. Esta señal de accionamiento se genera con el uso de un dispositivo de control de tipo PID, cuyos parámetros se modifican en función de la velocidad detectada del vehículo, pudiendo adoptar estos parámetros una pluralidad de valores discretos predeterminados respectivos para diferentes intervalos de valores de velocidad de vehículo.

En los documentos DE 3902846 y EP 0089899 se describen sistemas de control de deslizamiento adicionales para vehículos ferroviarios.

5 En vista del contexto técnico descrito anteriormente, un objetivo de la presente invención es proporcionar un método mejorado para controlar y posiblemente recuperar la adherencia de las ruedas de un eje controlado de un vehículo ferroviario, haciendo posible en particular corregir de una manera continua, en tiempo real, los parámetros de control, permitiendo una adaptación a los valores instantáneos de adherencia y peso del vehículo.

10 Este y otros objetivos se logran según la invención con un método cuyas características destacadas se definen en la reivindicación 1 adjunta.

En una implementación del método, la señal de entrada anteriormente mencionada es una señal representativa de la velocidad de consigna para las ruedas del eje.

15 En otra realización del método, dicha señal de entrada es una señal representativa del error o diferencia anteriormente mencionado de la velocidad.

20 Características y ventajas adicionales de la invención resultarán videntes a partir de la siguiente descripción detallada, implementada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 es un diagrama de bloques de un sistema de control antideslizante de las ruedas de un vehículo ferroviario;

25 - la figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control de bucle cerrado de la velocidad del eje;

- la figura 3 es un diagrama de una posible realización de un aparato para controlar el par aplicado a un eje;

30 - las figuras 4, 5 y 6 son diagramas de bloques de diferentes maneras de construir sistemas para la implementación de un método de control según la presente invención;

- la figura 7 es un gráfico que muestra de manera cualitativa la tendencia del coeficiente de adherencia  $\mu$  de una rueda, mostrado en el eje de las y, en función del deslizamiento  $\delta$ , mostrado en el eje de las x; y

35 - la figura 8 es un diagrama que ilustra fuerzas aplicadas a una rueda de un eje.

El método según la presente invención aplica técnicas de tipo adaptativo al ajuste y a la corrección dinámica de los parámetros de control del deslizamiento de las ruedas de un eje, realizándose tales técnicas de manera continua a lo largo del tiempo, en tiempo real y no basándose en vectores o tablas paramétricas previamente mapeadas.

40 La invención, para este objetivo, usa una técnica de control basada en el filtrado adaptativo, tal como se describe, por ejemplo, en B. Widrow y S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Nueva Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1985.

45 Se conocen diversos tipos conocidos de filtros adaptativos, adecuados para su uso en un método según la invención. A modo de ejemplo no limitativo, la presente invención proporciona el uso de filtros adaptativos conocidos como filtros de LMS (mínimos cuadrados). Para una descripción precisa de las propiedades generales, características, criterios de convergencia y las variantes de implementación de filtros de LMS, consúltese la bibliografía disponible o el texto de referencia anteriormente citado.

50 Los filtros adaptativos usados pueden consistir tanto en estructuras de tipo FIR (respuesta de impulsos finitos) como en estructuras de tipo IIR (respuesta de impulsos infinitos).

55 Según el simbolismo actual para describir un filtro adaptativo, X(t) y Y(t) designarán la entrada y la salida de tal filtro.

En la siguiente descripción y en los dibujos adjuntos, la variable de tiempo t se designará mediante la letra T para indicar que tal tiempo se entiende en un sentido discreto, concretamente que el método/sistema funciona con muestras finitas con un periodo T.

60 La figura 4 muestra un primer sistema de control ilustrado esquemáticamente para implementar el método según la presente invención.

65 El sistema según la figura 4 comprende un bloque RM que representa un modelo de referencia que recibe como entrada la velocidad de consigna  $V_{\text{CONSIGNA}}$  para las ruedas W del eje A controlado y que proporciona en su salida la velocidad  $V_R(t)$  del eje A en respuesta a la velocidad de consigna y sus variaciones.

El bloque RM tiene una función de transferencia  $G$ , que de manera ideal es  $G = 1$ . Sin embargo, un sistema más significativo, es decir, uno que se adhiere más a la realidad, sería, por ejemplo (pero no de manera exclusiva), una función de transferencia de segundo orden, que se aproxima al modelo esperado del complejo formado por el módulo CM de control del aparato TC de control de par y por las ruedas  $W$  de la figura 2.

En la figura 4, AF indica un filtro adaptativo, por ejemplo, un filtro de tipo LMS.

En la entrada  $X(T)$  de tal filtro AF se suministra una señal que es una función de la velocidad  $V_{\text{CONSIGNA}}$ , por ejemplo, una señal proporcional a la velocidad de vehículo, normalmente entre el 65% y el 95% de la velocidad del vehículo.

La salida  $Y(T)$  del filtro AF adaptativo es una señal para accionar el aparato TC de control de par, que a su vez está acoplado al eje A y a sus ruedas  $W$ .

La salida  $V_R(T)$  del bloque RM se aplica a una entrada de un sumador ADD, a otra entrada del cual llega una señal  $V_M(T)$  indicativa de la velocidad angular del eje A realmente medida por medio de un detector SS y un módulo APM de adquisición y procesamiento asociado.

El sumador ADD proporciona en su salida una señal de error  $E(T)$  indicativa del error o la diferencia entre la velocidad  $V_R(T)$  y la velocidad medida  $V_M(T)$ , es decir la diferencia entre la velocidad esperada en la salida del bloque RM y la velocidad  $V_M(T)$ .

La señal de error  $E(T)$  se alimenta al filtro AF adaptativo, en el que se usa para implementar una corrección continua de los parámetros de este filtro, siempre que este error  $E(T)$  tienda a cero.

La estabilización de los coeficientes o parámetros del filtro AF adaptativo puede producirse rápidamente si la señal de entrada  $X(T)$  tiene un contenido armónico equivalente al ancho de banda del proceso que va a controlarse.

En el caso del sistema según la figura 4, la velocidad  $V_{\text{CONSIGNA}}$  es una señal con un contenido armónico prácticamente nulo y por tanto relativamente insatisfactorio con respecto a la necesidad de un nuevo ajuste rápido de los parámetros o coeficientes del filtro AF. Una solución de este tipo todavía puede usarse eficazmente inicializando los coeficientes del filtro AF a valores convencionales, previamente calculados basándose en una situación inicial de compromiso y, posteriormente, en el transcurso de un fenómeno de deslizamiento, las variaciones del error  $E(T)$  en la entrada del filtro AF son suficientes para implementar en tiempo real una corrección apropiada de los coeficientes o parámetros del filtro.

En la figura 5 se ilustra una solución alternativa: el error  $E(T)$  no sólo se usa como factor de corrección del algoritmo adaptativo implementado por el filtro AF, sino también como entrada  $X(T)$  del propio filtro AF.

De hecho, el error  $E(T)$  tiene un contenido armónico apropiado para la auto-calibración del filtro AF y al mismo tiempo contiene la información necesaria para la generación de las correcciones de la fuerza de frenado que actúa sobre el eje A controlado.

La solución según la figura 5 permite una calibración dinámica muy rápida de los coeficientes o parámetros del filtro AF adaptativo, aunque inicialmente estos coeficientes o parámetros fueran completamente de cero.

Tal como se conoce a partir de la bibliografía, los filtros adaptativos de tipo LMS pueden realizarse usando tanto estructuras de FIR como estructuras de IIR.

Las estructuras de FIR son inherentemente estables, no teniendo ninguna memoria. Sin embargo, esta característica impide la implementación de funciones de control que tienen un componente integrante, a menos que se usen los integradores naturales existentes aguas abajo en el sistema, por ejemplo, la integración natural representada por el cilindro de frenado.

La figura 6 ilustra una realización que permite superar la falta de un componente integrante en un filtro AF adaptativo de tipo LMS producido mediante una estructura de FIR. Se proporciona un integrador I sustancialmente en paralelo a este filtro AF adaptativo, entre la entrada de este filtro y un sumador ADD1, que recibe la salida del filtro AF y la salida del integrador I; la salida del sumador ADD1 se conecta al aparato TC de control de par.

Un aparato STA de autoajuste puede estar opcionalmente asociado con el integrador I e incluye una célula C de tipo LMS dedicada, conectada entre la salida del integrador I y el sumador ADD1 y accionada en función de la señal de error  $E(T)$ .

En general, en la implementación de un método de control según la presente invención, con el fin de evitar problemas de desviaciones en los coeficientes de filtro adaptativo durante la ejecución del método, es posible limitar la variación de los coeficientes de filtro adaptativo a un intervalo de valores de seguridad almacenados en memoria no volátil.

5

Con el fin de mantener el control siempre sensible a nuevas variaciones de parámetros externos del sistema, se usa de manera apropiada la característica de función de fuga de filtros adaptativos, para realizar un desajuste continuo de los coeficientes o parámetros del filtro cuando el error  $E(T)$  es próximo a cero, o en cualquier caso dentro de los límites de variación de los coeficientes o parámetros tales como para permitir la recuperación de un ajuste correcto de estos coeficientes o parámetros en cuanto representan valores de  $E(T)$  significativos.

10

También se incluyen en el alcance de la presente invención implementaciones en las que se usa un filtro adaptativo realizado con una estructura de tipo IIR, que puede adoptar una configuración de tipo PID (proporcional-integral-derivativa).

15

Evidentemente, sin alterar el principio de la invención, las realizaciones y los detalles de construcción pueden variarse ampliamente con respecto a los descritos e ilustrados meramente a modo de ejemplo no limitativo, sin por ello alejarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para controlar y posiblemente recuperar la adherencia de las ruedas (W) de un eje (A) controlado de un vehículo ferroviario, que comprende las etapas de
 

5 generar señales de velocidad ( $V_M$ ) indicativas de la velocidad angular de las ruedas (W) de dicho eje (A);

10 caracterizado por

generar una señal de error (E) indicativa del error o la diferencia entre una velocidad de referencia ( $V_R$ ) para las ruedas (W), determinada por medio de un modelo de referencia (RM) en respuesta a una velocidad de consigna asignada ( $V_{CONSIGNA}$ ) y la velocidad indicada por dichas señales de velocidad ( $V_M$ ); y

15 generar una señal de accionamiento (Y) para medios (TC) de control de par aplicados a las ruedas (W) de dicho eje (A), mediante filtrado adaptativo (AF) de una señal de entrada (X) que es una función de dicha velocidad de consigna ( $V_{CONSIGNA}$ ), modificando parámetros del filtrado adaptativo (AF) en función de dicha señal de error (E), tal como para hacer que dicho error o diferencia (E) de velocidad tienda a

20 cero.
2. Método según la reivindicación 1, en el que dicha señal de entrada (X) es una señal representativa de dicha velocidad de consigna ( $V_{CONSIGNA}$ ).
- 25 3. Método según la reivindicación 1, en el que dicha señal de entrada (X) es una señal (E) representativa de dicho error o diferencia de velocidad.
4. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha señal de accionamiento (Y) se genera por medio de un filtro adaptativo (AF) que tiene una estructura de tipo FIR, con un integrador (I)
 

30 paralelo.
5. Método según la reivindicación 3, en el que la señal proporcionada por dicho integrador (I) se somete a calibración adaptativa.
- 35 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la señal de accionamiento (Y) se obtiene por medio de un filtro adaptativo (AF) que tiene una estructura de tipo IIR y preferiblemente una configuración de tipo PID.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se inicializan parámetros o coeficientes del filtrado adaptativo con valores previamente calculados almacenados en una memoria no
 

40 volátil.
8. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los parámetros o coeficientes del filtrado adaptativo están limitados en una banda previamente definida de variación y se almacenan en
 

45 una memoria no volátil.
9. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, por medio de una función de fuga del filtrado adaptativo, se reducen los parámetros o coeficientes de dicho filtrado de una manera
 

50 continua en el tiempo.

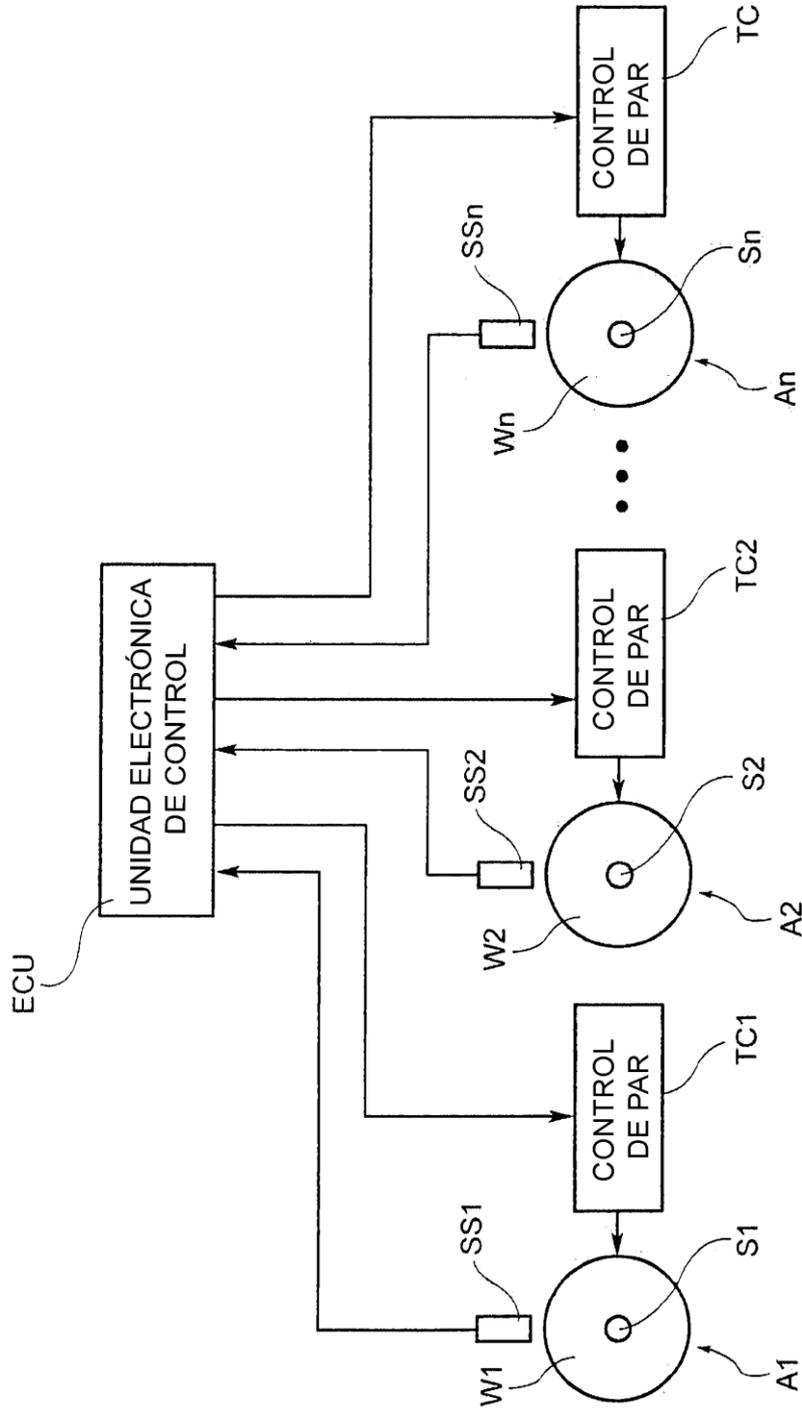


FIG. 1

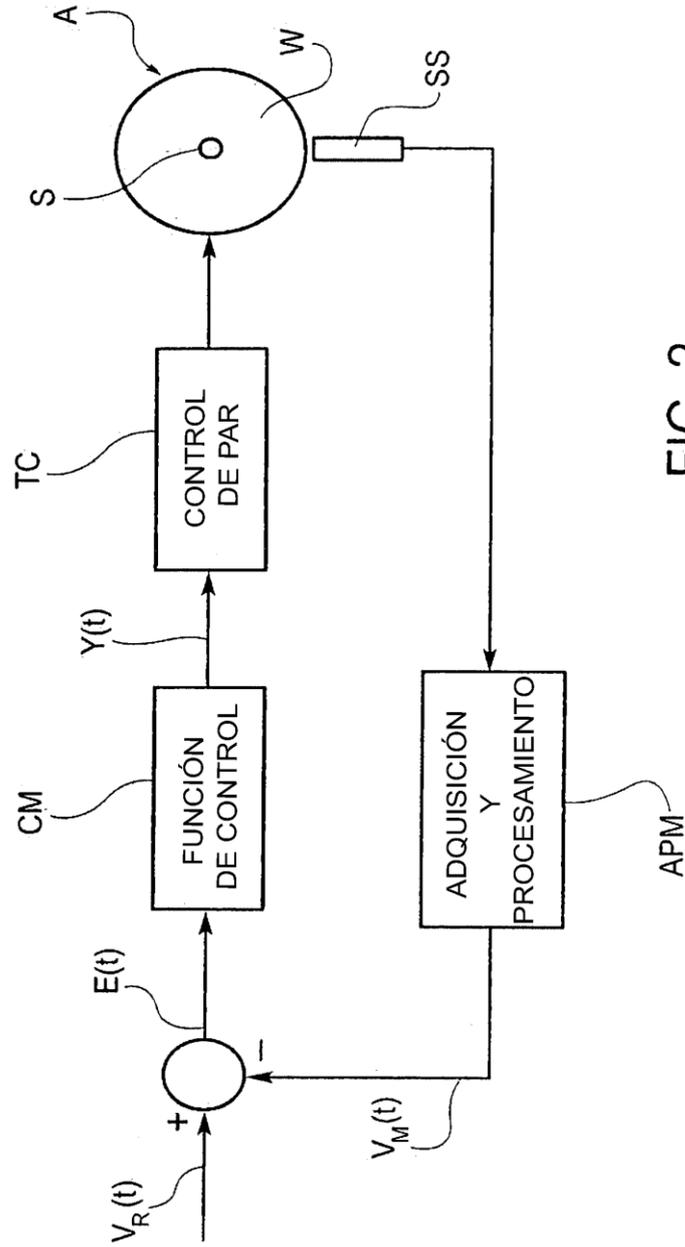


FIG. 2

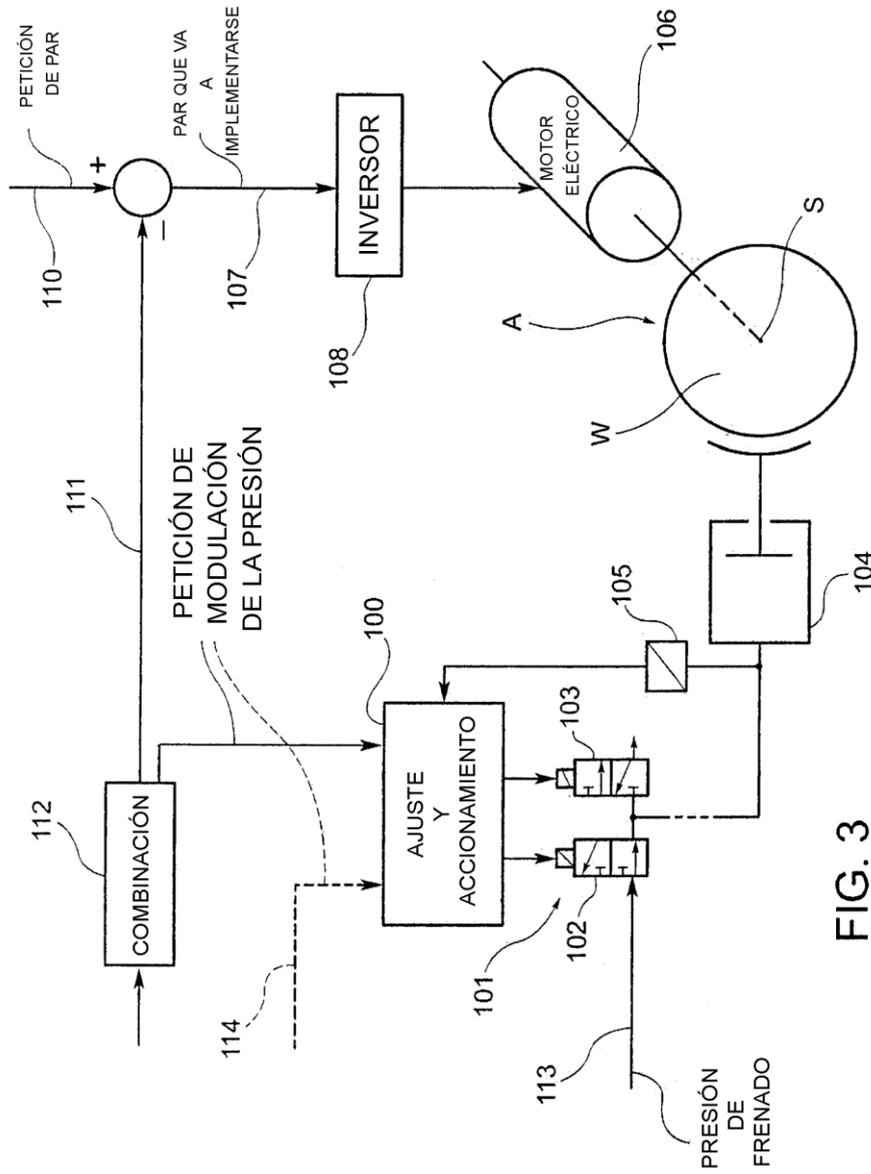


FIG. 3

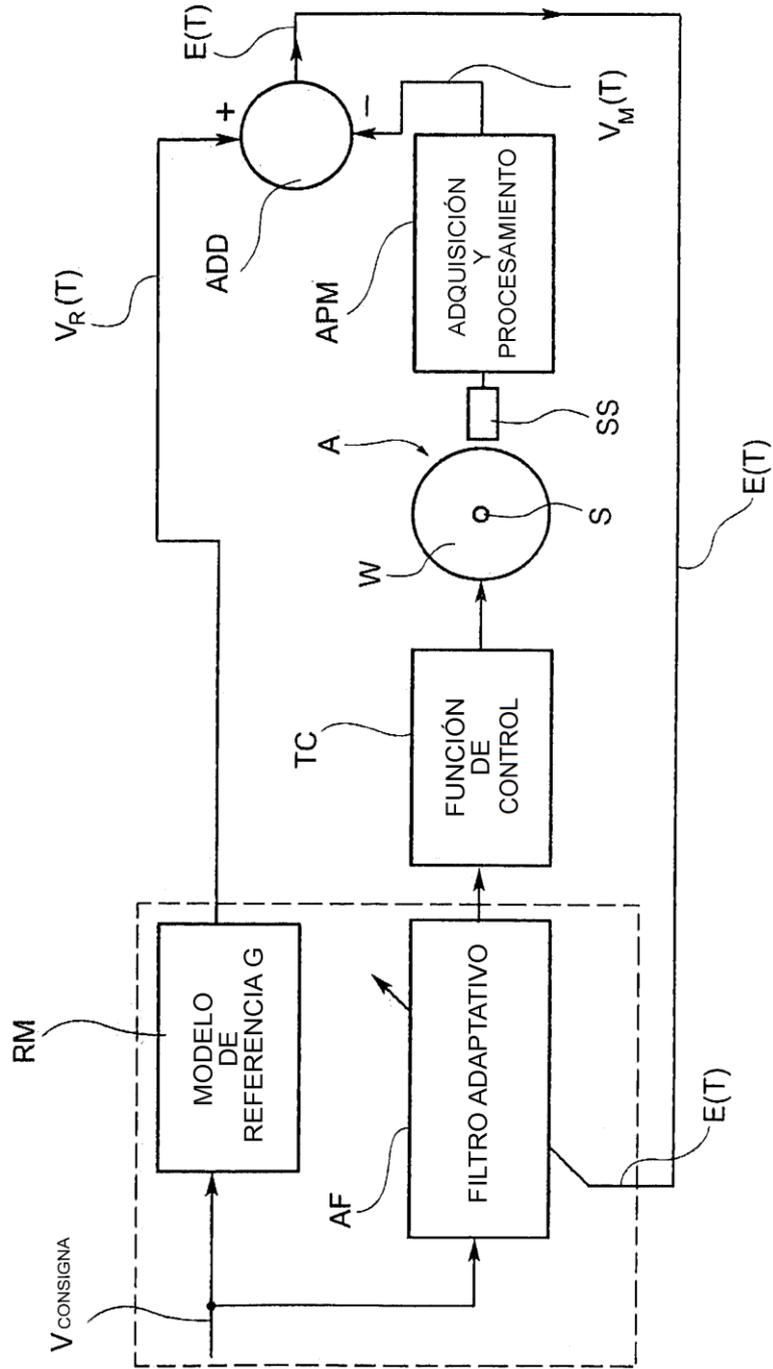


FIG. 4

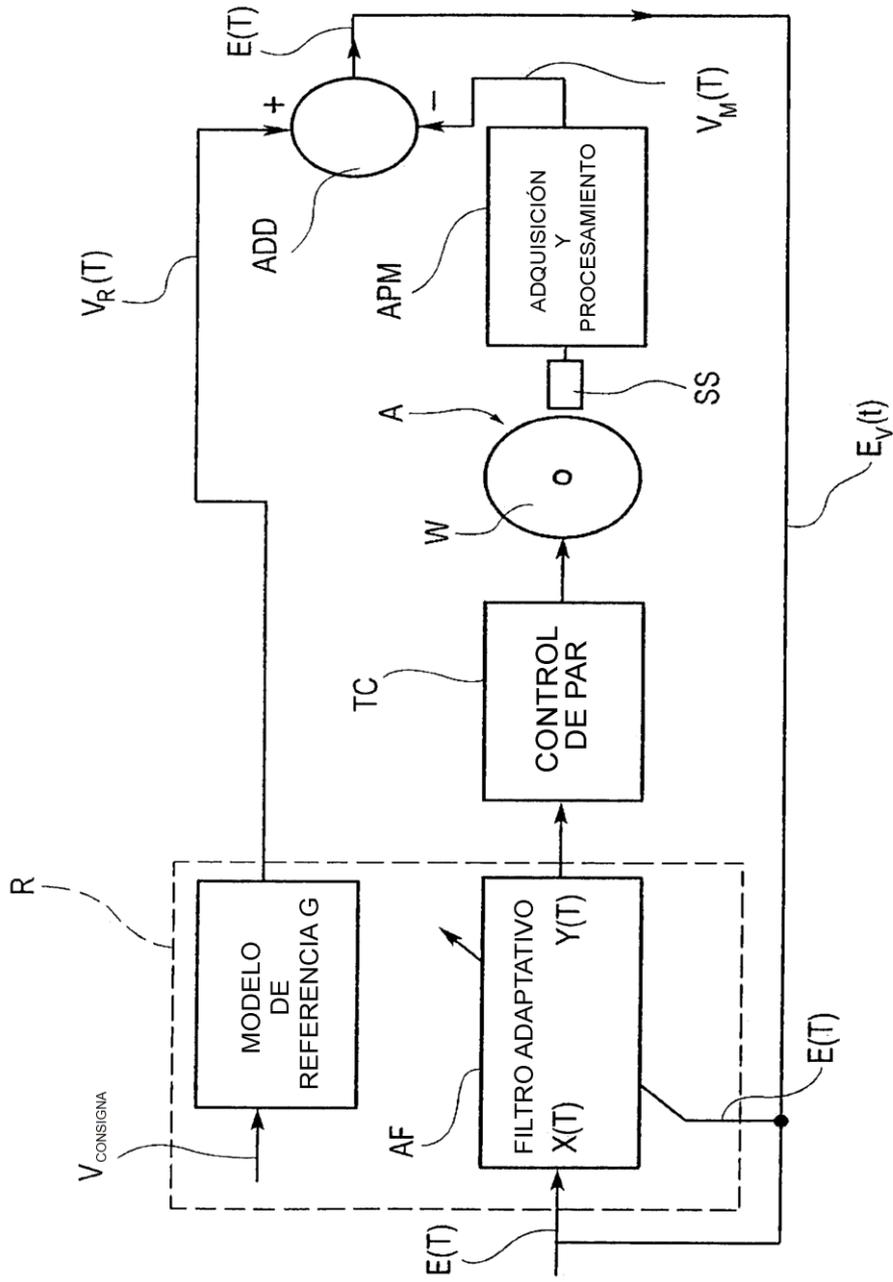


FIG. 5

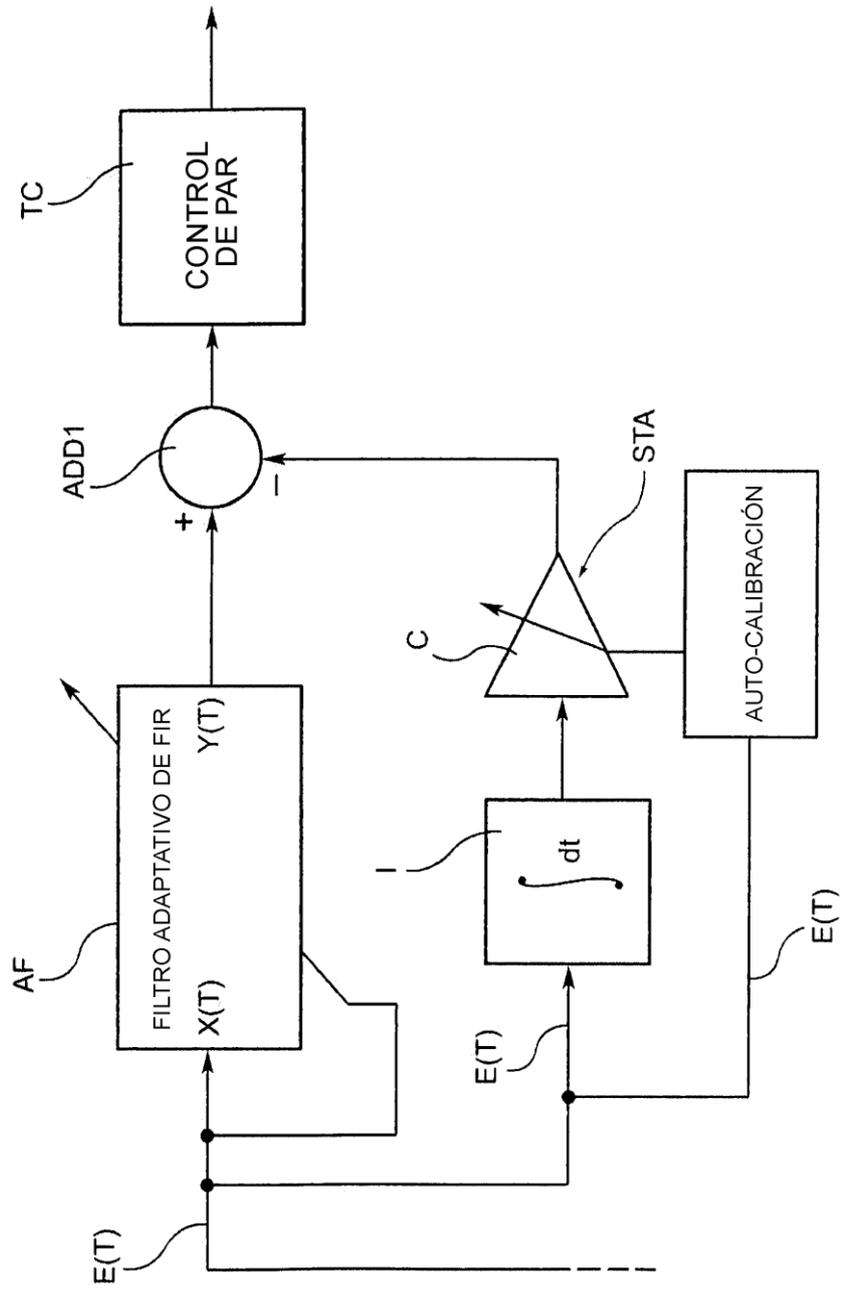


FIG. 6

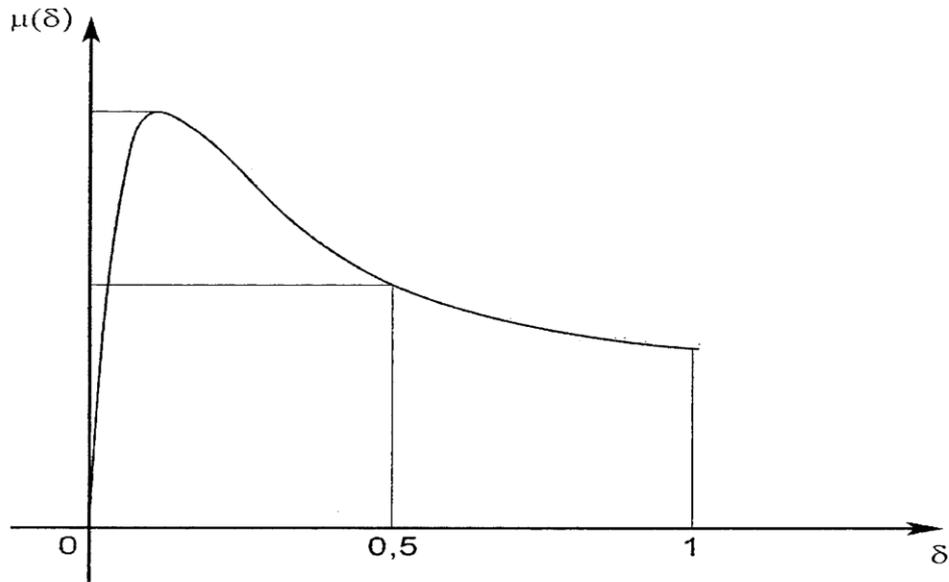


FIG. 7

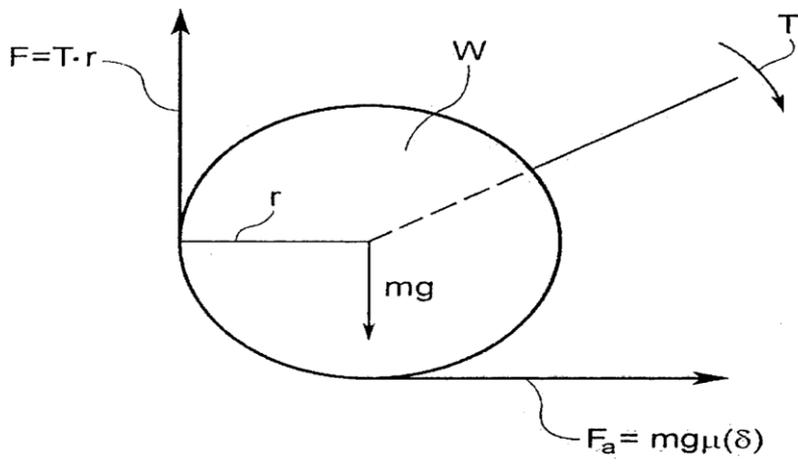


FIG. 8