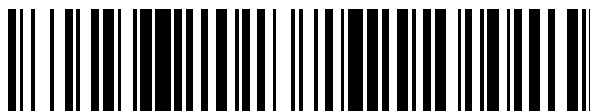


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 561 056**

51 Int. Cl.:

F23N 5/16 (2006.01)

F02C 9/00 (2006.01)

F02C 9/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.05.2005** **E 05253077 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.12.2015** **EP 1605205**

54 Título: **Procedimiento y aparato para predecir y/o evitar extinciones de llama por reducción de suministro de combustible en un motor de turbina de gas**

30 Prioridad:

28.05.2004 US 856583

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

24.02.2016

73 Titular/es:

GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US

72 Inventor/es:

NORMAN, BRUCE GORDON;
SHAH, MINESH ASHOK;
ZIMINSKY, WILLY STEVE;
TAWARE, AVINASH VINAYAK;
SINGH, AJAI y
WU, PINGCHUAN

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 561 056 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

Procedimiento y aparato para predecir y/o evitar extinciones de llama por reducción de suministro de combustible en un motor de turbina de gas

5 La presente invención se refiere, en general, al control de motores de turbina de gas y, más en particular, a procedimientos y aparatos para proporcionar una advertencia anticipada o evitación de extinciones de llama por reducción de suministro de combustible.

10 En un procedimiento de combustión en motores de turbina de gas, se combinan combustible y aire. Para controlar la producción de óxidos de nitrógeno (NOx) en este procedimiento, el procedimiento de combustión se controla mediante el control de la temperatura de la llama. El combustible y el aire se pueden premezclar de manera uniforme para evitar unas temperaturas de combustión altas, y el motor se puede operar por debajo de determinadas temperaturas para evitar la producción de unas cantidades inaceptables de NOx.

15 El documento EP1327824 describe un procedimiento que comprende detectar una presión en una cámara de combustión con un sensor de pulsación y formar una señal de presión correspondiente, determinar por lo menos una primera componente de señal relativa en un primer rango de frecuencias y una segunda componente de señal relativa en un segundo rango de frecuencias y producir un señal de salida que representa la proximidad al límite de extinción de la llama de acuerdo con la primera y la segunda componentes de señal relativas.

20 Las turbinas de gas con sistemas de combustión de baja emisión de NOx en seco operan a unas relaciones de C / A (Combustible / Aire) muy pobres más cerca de un límite de extinción de llama por reducción de suministro de combustible (LBO) con el fin de mantener las emisiones de NOx bajas. Unas relaciones de C / A más pobres que el valor de límite de LBO pueden dar como resultado una extinción de llama parcial o completa de la llama. Además, la variabilidad de la relación de C / A de cámara a cámara da como resultado unas cámaras que tienen unas relaciones de C / A más cerca del límite de LBO que son más propensas a una extinción de llama que las cámaras que están operando con un margen más grande con respecto al límite de LBO. Una extinción de llama en una cámara a veces conduce una extinción de llama en varias cámaras adyacentes, lo que puede finalmente desencadenar una parada de turbina. Las desconexiones de turbina debido al LBO pueden ser costosas, y pueden perderse ingresos durante el tiempo de parada y se puede infligir daño físico sobre los componentes de la combustión debido a la extinción de llama.

30 Por lo tanto, algunas configuraciones de la presente invención proporcionan un procedimiento para predecir extinciones de llama por reducción de suministro de combustible (LBO) en un motor de turbina de gas tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

35 Se apreciará que diversos procedimientos, tales como el uso de diversas firmas comprobatorias observadas en la acústica o dinámica de combustión medida de las cámaras de combustor, facilita la detección de una extinción de llama incipiente en diversas configuraciones de la presente invención. Mediante la provisión de una detección temprana, se puede proveer a un controlador con una mayor oportunidad para emprender acciones correctivas para evitar la extinción de llama.

La invención se describirá a continuación con mayor detalle, a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos, en los que: -

la figura 1 es un dibujo esquemático de bloques representativo de algunas configuraciones de un sistema de predicción / prevención de extinción de llama por reducción de suministro de combustible de la presente invención.

40 La figura 2 es un dibujo esquemático de bloques representativo de un bloque de fusión de información comprobatoria (es decir, un módulo de determinación de probabilidad) útil en unas configuraciones de la presente invención representadas por la figura 1.

45 Algunas configuraciones de la presente invención utilizan un cambio relativo de valores RMS de diferentes tonos junto con un tono de LBO en conjunción con un desplazamiento de frecuencia de uno de los tonos junto con un valor RMS del tono de LBO para llegar a una probabilidad de LBO. Los tonos se obtienen utilizando unas sondas de presión de alta respuesta que están dispuestas en el interior de unos combustores para supervisar fluctuaciones de presión en los combustores. Las señales a partir de estas sondas de presión se analizan de una forma que se describe en lo sucesivo.

50 En algunas configuraciones de la presente invención y haciendo referencia a la figura 1, un sistema de predicción / prevención de extinción de llama por reducción de suministro de combustible 100 comprende un módulo de extracción de señales de RMS 116 que está configurado para extraer diferentes tonos, un módulo de seguimiento de frecuencia 128 para el tono cálido y un módulo de determinación de probabilidad de LBO 124. Una lógica de detección 100 utiliza una observación espectral de la dinámica de una señal y de firmas evidentes tras una extinción de llama incipiente. Una turbina de gas de GE 7FA, por ejemplo, tiene 14 cámaras y exhibe tres tonos, un
55 tono de LBO (10 - 25 Hz), un tono frío (80 - 120 Hz) y un tono cálido (130 - 160 Hz). Las firmas incluyen cambios de energía en el tono de LBO, el tono frío y el tono cálido así como un desplazamiento de frecuencia del tono cálido

a medida que el combustor se aproxima al LBO. Por ejemplo, en un experimento, los espectrogramas de dinámica de las cámaras durante un suceso de LBO indicaron que el tono de LBO se fortalece al tiempo que el tono cálido se debilita y desplaza su frecuencia.

En algunas configuraciones de la lógica de detección de LBO 100 y haciendo referencia al diagrama esquemático o lógico de la figura 1, unas señales 102 de dinámica a partir de unas sondas de presión a partir de cada cámara supervisada (por ejemplo, 14 cámaras) se muestrean a alta frecuencia, F_s , y se pasan a través de uno o más filtros de antialiasing 104. Las señales resultantes se aplican a un submuestreador 106, lo que reduce la carga computacional mediante el submuestreo de la dinámica registrada a alta frecuencia (en kHz) a una frecuencia más manejable (en Hz) para el cálculo de valores RMS. Por ejemplo, si $F_s = 24$ kHz, entonces una tasa de diezmador de $M = 48$ se puede seleccionar para reducir la tasa de muestreo a 500 Hz. Los filtros 108 de paso de banda, por ejemplo, los filtros de Butterworth 110, 112 y 114 se usan en la salida del submuestreador 106 para extraer por filtración las señales de tono de LBO (el filtro 110), las de tono frío (el filtro 112), y las de tono cálido (el filtro 114). El valor RMS de los tonos extraídos por filtración se determina a continuación en un bloque de determinación de RMS 116. Los valores RMS en algunas configuraciones se someten a filtrado de paso bajo usando filtros de media móvil para reducir el ruido. Los tonos se extraen para cada cámara supervisada, y los valores RMS se determinan para cada tono para cada cámara supervisada.

Tal como se usa en el presente documento, una "cámara supervisada" es una cámara de combustor que tanto (a) es detectada por un sensor de presión (que puede ser un transductor de audio) como (b) tiene una señal procesada por la lógica de detección de LBO 100. Por ejemplo, la presente invención permite unas configuraciones en las que un gran número de señales 102 se reciben a partir de cámaras, pero algunas de estas señales son ignoradas por la lógica de detección de LBO 100. Las cámaras que tienen unas señales que son ignoradas no son "cámaras supervisadas", tal como se usa esa expresión en el presente documento.

El desplazamiento de frecuencia en el tono cálido para cada cámara supervisada se supervisa usando una técnica de FFT en ventana. Una probabilidad de LBO básica, $PRMSi.LBO$, se determina en el bloque 118 usando el valor RMS del tono de LBO, en la que el subíndice i es un índice que varía desde 1 hasta el número de cámaras. Se usa una función de probabilidad acumulativa de una distribución normal y la media y la varianza se eligen para lograr una probabilidad deseada de LBO para un valor RMS dado del tono de LBO en el bloque 124. En algunas configuraciones y haciendo referencia a la figura 2, esta probabilidad de LBO es potenciada por dos fragmentos obtenidos de información comprobatoria:

La relación de RMS, α , que es determinada por el bloque 120 y que refleja el cambio relativo en los tres tonos

$$\alpha = \frac{RMS_{LBO} + RMS_{FRÍO}}{RMS_{CÁLIDO}},$$

y el desplazamiento de frecuencia, β , del tono cálido, que se determina en el bloque 122 a partir de unas señales muestreadas que se filtran a través de un bloque de FFT en ventana en 132 y que se supervisan para un desplazamiento de frecuencia en 128, en la que β se define como:

$$\beta = \frac{f_U - f_C}{f_C - f_L},$$

en la que f_U es el límite superior de la frecuencia de tono cálido, f_L es el límite inferior de la frecuencia de tono cálido y f_C es la frecuencia central instantánea del tono cálido. Los parámetros f_U y f_L se ajustan a las frecuencias de corte del filtro de paso de banda de tono cálido. El parámetro α en algunas configuraciones limitadas de forma estricta, tal como se muestra en 206, para mantener la resolución después de que se haya normalizado la probabilidad. El multiplicador 208 multiplica el valor limitado de forma estricta de α por la probabilidad de LBO que se obtiene del bloque 118. El multiplicador 210 multiplica el resultado por β . La probabilidad de LBO resultante para una cámara se potencia y se normaliza entre 0 y 1 usando una función sigmoide escrita como:

$$P_{Cámara_i.LBO} = f_{sigmoide}(P_{RMS_i.LBO} \cdot \alpha \cdot \beta)$$

Esta función da la probabilidad de LBO de una única cámara. El parámetro α está limitado de forma estricta para mantener una resolución de LBO de cámara apropiada después de que se haya normalizado la probabilidad. De esta forma, la probabilidad de LBO se supervisa para todas las cámaras de combustor. La probabilidad de LBO de turbina de gas en un instante dado es determinada por el bloque de selección de máximo 126 como el máximo de todas las probabilidades de LBO de cámara computadas en ese instante de tiempo. En algunas configuraciones, esta probabilidad $P(LBO)$ en 130 es usada por un controlador de realimentación 134 para iniciar acciones correctivas y evitar una extinción de llama.

Diversas configuraciones del sistema de predicción / prevención de extinción de llama por reducción de suministro

de combustible 100 se pueden implementar usando componentes de muestreo y lógicos discretos, y/o un microprocesador u ordenador programado de forma adecuada, y/o componentes de procesamiento de señal y/o soporte lógico o soporte lógico inalterable adecuados.

5 En algunas configuraciones de la presente invención, los parámetros sintonizables de los tres módulos de la variante propuesta del algoritmo incluyen el cómputo de RMS. Por ejemplo, el módulo de cómputo de RMS 116 está configurado para extraer las componentes de tono de LBO, de tono frío y de tono cálido a partir de datos submuestreados de dinámica y para computar valores RMS respectivos (en psi) antes de la aplicación de un filtro de media móvil para reducir el ruido.

10 La tasa de diezmado o la tasa de submuestreo M del diezmador 106 en algunas configuraciones se elige de tal modo que la frecuencia submuestreada es más grande que dos veces el rango de frecuencias de interés. En el presente ejemplo, la frecuencia de interés es de hasta 200 Hz. Por lo tanto, M se elige para submuestrear la tasa a un valor más grande que 400 Hz. A medida que cambia la frecuencia de muestreo, F_s , se puede ajustar M en consecuencia.

15 El tamaño de ventana (el número de muestras) para el bloque de determinación de RMS 116 en algunas configuraciones se elige para dar una resolución lo bastante fina para someter a seguimiento el valor RMS con el tiempo y se sincroniza con el seguimiento de frecuencia de tonos cálidos en el tiempo.

20 Los coeficientes del filtro (de antisolape) de paso bajo para el filtro 104 están configurados en algunas configuraciones en una estructura de secciones de segundo orden. En algunas configuraciones, el filtro 104 se rediseña si la frecuencia de muestreo cambia de tal modo que la frecuencia de corte de 3 dB se encuentra en el límite superior de la región frecuencias de interés (200 Hz en este ejemplo).

25 En algunas configuraciones, los coeficientes del filtro de paso de banda 110, 112 y 114 están configurados en una estructura de secciones de segundo orden. La frecuencia de muestreo de los filtros 110, 112 y 114 es la frecuencia submuestreada. Los filtros 110, 112 y 114 en algunas configuraciones se rediseñan si cambia la frecuencia submuestreada. En algunas configuraciones, las bandas de LBO, de tono frío y de tono cálido se sintonizan de forma diferente para diferentes máquinas de turbinas de gas (7FA).

En algunas configuraciones, un tamaño de filtro de media móvil para un suavizado de valores RMS 116 se ajusta a 5 muestras. El aumento del tamaño del filtro potencia la reducción de ruido a costa de introducir un retardo adicional.

30 En algunas configuraciones, el módulo de seguimiento de frecuencia de tono cálido 128 somete a seguimiento la frecuencia dominante de tono cálido (f_c) mediante la aplicación de un cómputo de FFT de ventana de Hanning sin solapamiento sobre una señal de acústica sin procesar en el dominio del tiempo. El tamaño de ventana de FFT ajusta la resolución temporal a una frecuencia de muestreo particular. Por ejemplo, el uso de 8192 puntos da una resolución temporal de 0,64 segundos a una tasa de muestreo de 12,8 kHz. La tasa de submuestreo M y el tamaño de ventana de RMS en algunas configuraciones se coordina para sincronizar los vectores de valor RMS y el vector de frecuencia de tono cálido. En algunas configuraciones, no obstante, se usa una interpolación para alinear el vector de desplazamiento de frecuencia con el valor RMS en el tiempo. Si el número de barridos de FFT a promediar se ajusta a un valor más grande que uno, se obtiene un seguimiento de frecuencia con menos ruido a costa de un tiempo computacional aumentado. El uso de solapamiento de ventana da como resultado una resolución temporal aumentada y una precisión mejorada del seguimiento de frecuencia, a costa de un retardo de tiempo en comparación con una configuración de no solapamiento. En algunas configuraciones, los límites inferior y superior del tono cálido coinciden con los ajustes de filtro de paso de banda de tono cálido.

40 El módulo de cómputo de probabilidad de LBO 124 determina la probabilidad de LBO de acuerdo con un modelo estadístico previamente definido, usando una señal de RMS de tono de LBO como una entrada. La probabilidad se refina a continuación usando dos elementos de información comprobatoria, α y β , que son la relación de RMS y el desplazamiento de frecuencia del tono cálido, respectivamente. En diversas configuraciones, a continuación la probabilidad de LBO potenciada se somete a una normalización no lineal entre 0 y 1 usando una función sigmoide en el bloque 212. En algunas configuraciones, el umbral para una probabilidad de un 95 % de un suceso de LBO se sintoniza usando el valor RMS del tono de LBO. La media y la varianza del modelo estadístico también se sintonizan en algunas configuraciones usando datos históricos del tono de LBO de la turbina. También en algunas configuraciones, la relación α está limitada de forma estricta por el bloque 206 usando un umbral SP que, en sí mismo, se puede sintonizar usando datos históricos de LBO. Unos parámetros, Q_0 , Q_1 , que controlan el comportamiento de establecimiento de correspondencia de la función sigmoide, se ajustan en algunas configuraciones para establecer una correspondencia del valor de probabilidad potenciada al valor máximo de $\alpha \times \beta$ con 1 de acuerdo con una relación escrita como:

$$P_{\text{Cámara}_i, \text{LBO}}(t) = \frac{1}{1 + e^{-(2(P_{\text{RMS}_i, \text{LBO}}(t) \cdot \alpha \cdot \beta) - Q_1)/Q_0)}}$$

55 Se proporcionó una configuración tal como se ha descrito en lo que antecede para analizar cuatro sucesos de LBO,

teniendo lugar tres en una turbina de gas 7FA de GE y uno en una turbina de gas 9H de GE. La configuración predijo correctamente los LBO en cada suceso, con la probabilidad de LBO creciendo y volviéndose unitaria antes de la desconexión de turbina. Esta predicción se corresponde con una ventana de oportunidad para emprender acciones correctivas que evitarían el LBO. En algunos casos la probabilidad de LBO indicó un suceso de LBO tan pronto como 25 segundos antes del LBO real.

En uno de los sucesos de 7FA, la máquina experimentó una desconexión durante una reducción prolongada. Los datos acústicos para las 14 cámaras se muestrearon a 24 kHz. Se eliminaron dos cámaras (las cámaras 6 y 12) del análisis, ya que sus datos se habían corrompido debido a cables defectuosos. La tasa de diezmado se mantuvo a 48 para ajustar la frecuencia submuestreada a 500 Hz. Las bandas para los filtros de paso de banda 110, 112 y 114 se seleccionaron de forma apropiada. El tamaño de ventana de RMS se ajustó para generar un valor cada 0,5 segundos. El tamaño de ventana de FFT se mantuvo a 12000 muestras sin solapamiento alguno con el fin de someter a seguimiento la frecuencia de tono cálido cada 0,5 segundos. Los espectrogramas de los datos de dinámica recopilados para las diferentes cámaras durante el suceso de LBO mostraron con claridad unos fragmentos comprobatorios de información tales como el desplazamiento de frecuencia de tono cálido así como el cambio relativo en las magnitudes de los diferentes tonos. Asimismo, el LBO se hizo prominente y más fuerte a medida que la turbina se aproximaba al LBO.

Se obtuvieron resultados de detección de LBO a partir de este experimento. A medida que el tono de LBO se hacía más fuerte, la probabilidad de extinción de llama para cada cámara presentó un máximo más elevado. Los parámetros α y β también presentaron un máximo más elevado debido a que, a medida que el tono de LBO se hacía más fuerte, el tono cálido se debilitó y desplazó su frecuencia. El tono frío se hizo más fuerte para algunas de las cámaras. El producto de α y β presentó un máximo más elevado como resultado. La probabilidad de LBO fue potenciada por este producto y se normalizó usando una función sigmoide. El máximo de la probabilidad de todas las cámaras se seleccionó en cada instante de tiempo para indicar la probabilidad de desconexión de turbina. La probabilidad presentó un máximo por encima de 0,75 casi 28 segundos antes de que la turbina experimentase una desconexión (es decir, cuando la potencia cayó a cero) y 23 segundos antes de que empezara a aumentar la difusión de la temperatura de los gases de escape. Por lo tanto, se proporcionó a una ventana de tiempo de 23 segundos para emprender acciones correctivas para evitar un LBO.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para predecir extinciones de llama por reducción de suministro de combustible (LBO) en un motor de turbina de gas, comprendiendo dicho procedimiento:

extraer (116) un tono de LBO, un tono frío y un tono cálido en unas señales (102) de presión representativas de la presión en el interior de cada una de una pluralidad de cámaras de combustor supervisadas y determinar valores RMS para cada uno de dichos tonos;
someter a seguimiento (128) una frecuencia de un tono cálido en cada cámara supervisada usando una función de densidad de probabilidad acumulativa de una distribución normal y una media y una varianza seleccionadas para lograr una probabilidad deseada de LBO para un valor RMS dado del tono de LBO;
utilizar los tonos extraídos y la frecuencia sometida a seguimiento para determinar (124) una probabilidad de un LBO; y **caracterizado por**
refinar la probabilidad determinada de un LBO usando una relación de RMS (α) que refleja el cambio relativo en el tono de LBO, el tono frío y el tono cálido y el desplazamiento de frecuencia (β) del tono cálido.

2. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicha probabilidad determinada (124) de un LBO es más alta cuando el tono cálido se debilita y su frecuencia se desplaza.

3. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, que además comprende submuestrear las señales (102) de presión, y en el que extraer el tono de LBO, el tono frío y el tono cálido comprende utilizar unos filtros (108) de paso de banda que tienen unas bandas de paso de 10 - 25 Hz, 80 - 120 Hz y 130 - 160 Hz, respectivamente, para extraer cada uno de dichos tonos a partir de las señales de presión submuestreadas.

4. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que además comprende limitar la relación de RMS por medio de un umbral que se sintoniza usando datos históricos de LBO.

5. Un procedimiento de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que utilizar los tonos extraídos y la frecuencia sometida a seguimiento para determinar (124) una probabilidad de un LBO comprende determinar una probabilidad máxima sobre un conjunto de todas las cámaras supervisadas para determinar una probabilidad de un LBO.

6. Un procedimiento de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que además comprende normalizar dicha probabilidad determinada usando una normalización no lineal.

7. Un procedimiento de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, enviar una señal (130) a un controlador (134) para que emprenda acciones correctivas para prevenir un LBO cuando la probabilidad de LBO determinada es indicativa de un LBO incipiente.

8. Un aparato para predecir extinciones de llama por reducción de suministro de combustible (LBO) en un motor de turbina de gas, configurado dicho aparato para:

extraer (116) un tono de LBO, un tono frío y un tono cálido en unas señales (102) de presión representativas de la presión en el interior de cada una de una pluralidad de cámaras de combustor supervisadas y determinar valores RMS para cada uno de dichos tonos;
someter a seguimiento (128) una frecuencia de un tono cálido en cada cámara supervisada usando una función de densidad de probabilidad acumulativa de una distribución normal y una media y una varianza seleccionadas para lograr una probabilidad deseada de LBO para un valor RMS dado del tono de LBO;
utilizar los tonos extraídos y la frecuencia sometida a seguimiento para determinar (124) una probabilidad de un LBO; y

caracterizado porque dicho aparato está configurado para refinar la probabilidad determinada de un LBO usando una relación de RMS (α) que refleja el cambio relativo en el tono de LBO, el tono frío y el tono cálido y el desplazamiento de frecuencia (β) del tono cálido.

9. Un aparato de acuerdo con la reivindicación 8, en el que dicha probabilidad determinada (124) de un LBO es más alta cuando el tono cálido se debilita y su frecuencia se desplaza.

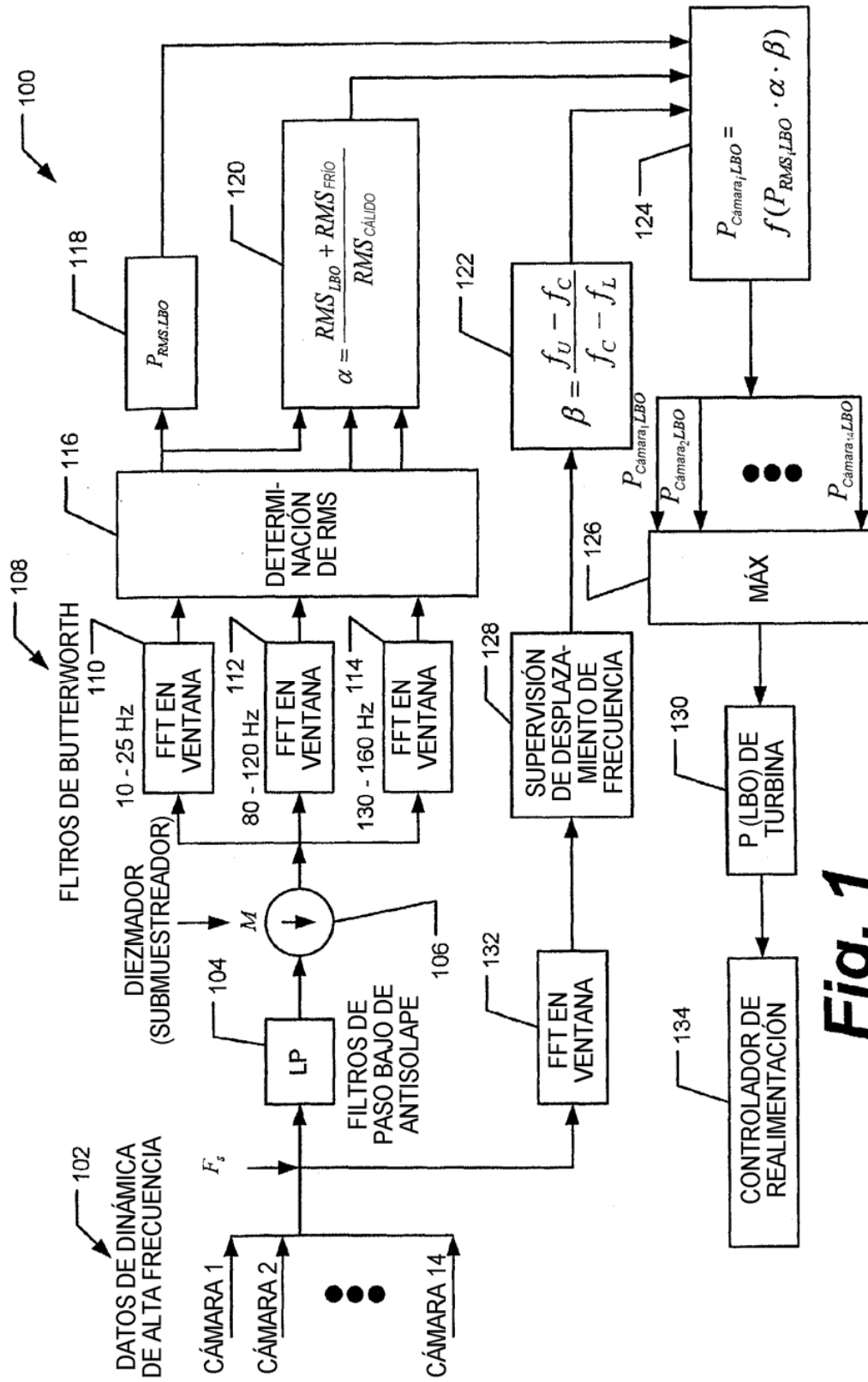


Fig. 1

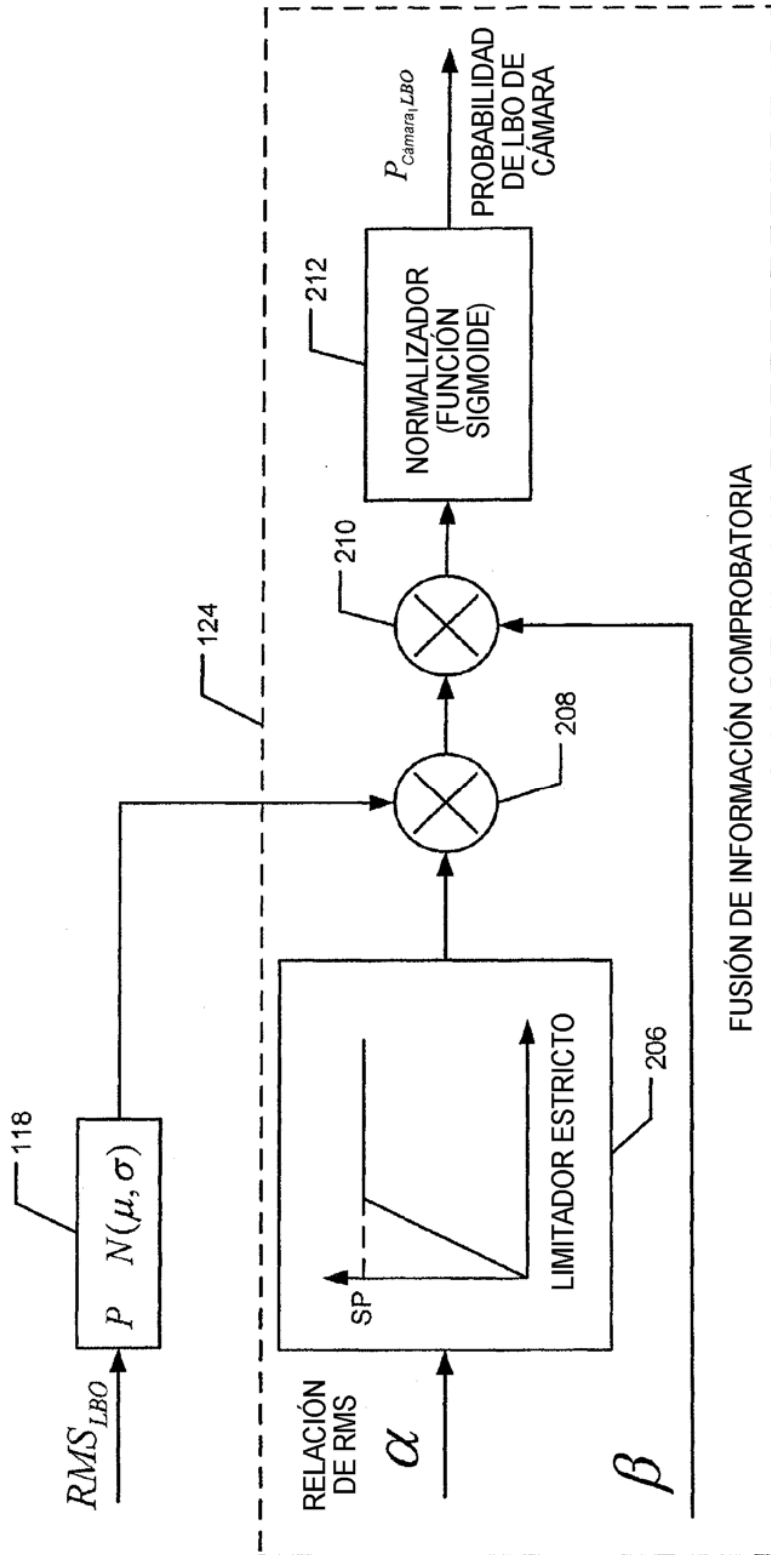


Fig. 2