



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 311 234**

51 Int. Cl.:  
**G05B 13/02** (2006.01)  
**G05B 23/02** (2006.01)  
**B01D 53/00** (2006.01)  
**G05D 21/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05782557 .2**  
96 Fecha de presentación : **03.08.2005**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1782136**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.05.2007**

54 Título: **Control en cascada de un valor medio de un parámetro de funcionamiento a un valor deseado.**

30 Prioridad: **27.08.2004 US 926991**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**01.02.2009**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**01.02.2009**

73 Titular/es: **Alstom Technology Ltd.**  
**Brown Boveri Strasse 7**  
**5400 Baden, CH**

72 Inventor/es: **Boyden, Scott, A. y**  
**Piche, Stephen**

74 Agente: **Cobo de la Torre, María Victoria**

ES 2 311 234 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

Control en cascada de un valor medio de un parámetro de funcionamiento a un valor deseado.

5 **Fundamentos de la invención****Campo de aplicación**

La presente invención se refiere, de forma general, al control de procesos. Más concretamente, esta invención se refiere a las técnicas para perfeccionar el control de procesos como, por ejemplo, los que son empleados para controlar la contaminación del aire. Los ejemplos de estos procesos comprenden - sin estar limitados a ellos - la desulfuración de gases de escape húmedos y secos (WFGD = Wet Flue Gas Desulfurization o desulfuración de gases de escape húmedos y DFGD = Dry Flue Gas Desulfurization o desulfuración de gases de escape secos, respectivamente), la eliminación de óxido de nitrógeno a través de una selectiva reducción catalítica (SCR = Selective Catalytic Reduction o reducción catalítica selectiva) y la eliminación de partículas a través de una precipitación electrostática (ESP = Electro-Static Precipitation o precipitación electrostática). Otros ejemplos más de sistemas de control de la contaminación del aire están indicados en la Patente Internacional Núm. WO 03/065135 así como en las Patentes Europeas Núms. EP 1 382 905 y EP 0 866 395.

20 **Fundamentos***Desulfuración de gases de escape húmedos*

Como ya indicado, existen varios procesos de control de la contaminación del aire para constituir una base para la discusión, y comentaremos el proceso WFGD. El proceso WFGD es el proceso más frecuentemente empleado para eliminar el dióxido de azufre SO<sub>2</sub> del gas de escape en el sector energético. La Figura 1 muestra un diagrama de bloques, que representa una vista sinóptica de un sub-sistema de desulfuración de gases de escape húmedos (WFGD) para eliminar el SO<sub>2</sub> de un contaminado gas de escape - como, por ejemplo, el gas generado por la combustión de un combustible fósil, como es el carbón, en los sistemas de generación de energía - y para producir un sub-producto de interés comercial, con lo cual se tienen atribuciones que permiten que el gas de escape pueda ser eliminado a un costo mínimo de abandono así como unas atribuciones para poder vender el mismo para su uso comercial.

En los Estados Unidos de América, el actualmente preferido sub-producto de la WFGD es un yeso de uso comercial y de una calidad relativamente alta (pureza más del 95%), apropiado para su empleo en paredes de fibras que, a su vez, son usadas en la construcción de residencias y oficinas. El yeso de uso comercial y de alta calidad (menos del 92% de pureza) constituye actualmente también un preferido sub-producto de la WFGD en la Unión Europea y en Asia; el mismo, sin embargo, es producido normalmente para ser empleado en cemento y en fertilizantes. No obstante, al producirse una caída del mercado para un yeso de mayor calidad del yeso de uso comercial, producido como un sub-producto de la WFGD, podría ser bajada para satisfacer las menos rigurosas especificaciones de calidad, necesarias para un abandono del mismo a un menor costo. En relación con ello, los costos de la eliminación pueden ser reducidos al mínimo, por ejemplo, al ser la calidad de uso apropiada, tanto para un relleno de solares residenciales como para rellenar las zonas de explotación, en las cuales había sido extraído el carbón, usado para la generación de energía.

Tal como indicado en la Figura 1, el sucio o contaminado gas de escape 112, que está cargado de SO<sub>2</sub>, es despedido de una caldera (no indicada aquí) de un sistema de generación de energía 110 - que funciona con carbón - hacia el sistema de control de contaminación de aire (APC) 120. Por regla general, el contaminado gas de escape 112, que entra en un sistema de control de contaminación APC 120, no está cargado solamente de SO<sub>2</sub>, sino el mismo contiene también otros contaminantes como, por ejemplo, el No<sub>x</sub> y materia de partículas. Previo a ser procesado por el sub-sistema de WFGD, el contaminado gas de escape 112, que entra en el sistema APC 120, es dirigido, en primer lugar, hacia otros sub-sistemas APC 122 con el objeto de eliminar del contaminado gas de escape 112 el No<sub>x</sub>, y la materia de partículas. A título de ejemplo, el contaminado gas de escape puede ser procesado a través de un sub-sistema de selectiva reducción catalítica (SCR), que aquí no está indicado, para eliminar el No<sub>x</sub>, así como a través de un sub-sistema precipitador electrostático (EPS), tampoco indicado aquí, o de un filtro (no indicado) para así eliminar la materia de partículas.

El gas de escape 114, cargado de SO<sub>2</sub> y después de los otros sub-sistemas APC 122, es dirigido hacia el sub-sistema de WFGD 130. El gas de escape 114, cargado de SO<sub>2</sub>, es procesado por la torre de absorción 132. Tal como esto lo saben las personas familiarizadas con este ramo técnico, el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape 114 tiene una elevada concentración de ácido. Por consiguiente, la torre de absorción 132 actúa para poner el gas de escape 114, cargado del SO<sub>2</sub>, en contacto con un lodo líquido 148, que tiene un nivel de pH que es más elevado que el nivel de pH del gas de escape 114.

Es conocido que la mayor parte de los convencionales sub-sistemas de WFGD comprenden una unidad de procesamiento de WFGD del tipo representado en la Figura 1. Esto es conveniente por muchas razones. Por ejemplo, en este ramo técnico se sabe que las unidades de procesamiento de WFGD, con las torres de absorción de pulverización, tienen determinadas características que son convenientes para el proceso de la WFGD. No obstante, también las unidades de procesamiento de WFGD de otras configuraciones del equipo de absorción/oxidación podrían ser empleados, al ser esto deseado, en lugar de la unidad de procesamiento, indicada en la Figura 1, y las mismas podrían proporcionar

## ES 2 311 234 T3

todavía una similar funcionalidad en la desulfuración del gas de escape y conseguir unos beneficios similares a los perfeccionamientos de un avanzado control de proceso, los cuales se presentan en esta Solicitud. En aras de una mayor claridad y brevedad, esta descripción hace referencia a la convencional torre de pulverización, indicada en la Figura 1; no obstante, se ha de tener en cuenta que los conceptos aquí presentados podrían ser aplicados, asimismo, a las otras configuraciones de la WFGD.

Durante el procesamiento dentro de la torre de absorción en contra-corriente 132, el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape 114 reaccionará con el lodo, rico en carbonato de calcio (piedra caliza y agua), 148 para formar el sulfito de calcio que representa, básicamente, una sal, con lo cual queda el SO<sub>2</sub> eliminado del gas de escape 114. El gas de escape 116, ya desprovisto del SO<sub>2</sub>, es despedido de la torre de absorción 132 o hacia una chimenea de salida 117 o hacia un equipo de procesamiento de vapor descendente (no indicado). El resultante lodo transformado 144 es dirigido hacia el cristizador 134, en el cual es cristalizada la sal. El cristizador 134 y el absorbedor 132 se encuentran ubicados normalmente dentro de una misma torre, y esto sin ninguna separación física entre los mismos, a pesar de que existen distintas funciones (absorción en la fase gaseosa y cristalización en la fase líquida), que tienen lugar dentro del mismo recipiente del procesamiento. Desde aquí, el lodo de yeso 146 - que comprende la sal cristalizada - es dirigido del cristizador 134 hacia la unidad de deshidratación 136. Adicionalmente, el lodo de reciclaje 148 - que puede o no puede comprender la misma concentración en sales cristalizadas como el lodo de yeso 146 - es dirigido desde el cristizador 134 a través de las bombas 133 y de retorno hacia la torre de absorción 132 para continuar el ciclo de absorción.

El ventilador 150 somete a presión el aire ambiental 152 para proporcionar el aire de oxidación 154 para el cristizador 134. El aire de oxidación 154 es mezclado con el lodo dentro del cristizador 134 para oxidar el sulfito de calcio en sulfato de calcio. Cada molécula del sulfato de calcio liga con dos moléculas de agua para formar un compuesto que es normalmente conocido como yeso 160. Tal como indicado, el yeso 160 es eliminado de la unidad de procesamiento de WFGD 130 y es vendido, por ejemplo, a los fabricantes de paredes de fibras para la construcción.

El agua 167, recuperada de la unidad de deshidratación 136, es dirigida hacia el mezclador/bomba 140, en el que la misma es mezclada con piedra caliza fresca de base 174, procedente del triturador 170, para formar un lodo de piedra caliza. Habida cuenta de que algo del agua del proceso es perdida, tanto en el yeso 160 como en la corriente de desperdicios 169, ha de ser añadida agua limpia adicional 162 - procedente de una fuente de agua limpia 164 - para mantener la densidad del lodo de piedra caliza. Además, los desperdicios - como, por ejemplo, la ceniza - son eliminados de la unidad de procesamiento de WFGD 130 a través de la corriente de desperdicios 169. Los desperdicios podrían ser dirigidos, por ejemplo, hacia un embalse de cenizas o ser eliminados de otra manera.

En resumen, el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, cargado de SO<sub>2</sub>, 114 es absorbido por el lodo 148 dentro de la zona de contacto de lodo de la torre de absorción 132, y el SO<sub>2</sub> es luego cristalizado y oxidado dentro del cristizador 134, como asimismo es el mismo deshidratado en la unidad de deshidratación 136 para formar el deseado sub-producto del proceso, el cual constituye, según este ejemplo, un yeso de tipo comercial 160. El gas de escape 114, cargado del SO<sub>2</sub>, pasa por la torre de absorción 132 en cuestión de segundos. La cristalización completa de la sal dentro del lodo transformado 144 por parte del cristizador 134 puede necesitar de 8 hasta más de 20 horas. Por consiguiente, el cristizador 134 es de un gran volumen, que sirve como depósito de cristalización de lodo. El lodo de reciclaje 148 es bombeado en retorno hacia la parte superior del absorbedor para así recuperar un SO<sub>2</sub> adicional.

Tal como indicado, el lodo 148 es pasado hacia la parte superior de la torre de absorción 132. Esta torre 132 comprende normalmente distintos niveles de toberas de pulverización para pasar el lodo hacia el interior de la torre 132. El absorbedor 132 trabaja según una configuración de contra-corriente: El lodo pulverizado fluye dentro del absorbedor hacia abajo y entra en contacto con el gas de escape 114, que está cargado de SO<sub>2</sub> y que fluye hacia arriba, y el mismo había sido pasado hacia la parte inferior de la torre de absorción 132.

La piedra caliza fresca 172, procedente de la fuente de piedra caliza 176, es, en primer lugar, triturada dentro del triturador 170 para formar el lodo de piedra caliza 141. El flujo de la piedra caliza triturada 174 y el flujo de agua 162 - a través de la válvula 163 y hacia el mezclador/depósito 140 - son controladas para mantener dentro del mezclador/depósito 140 el suficiente nivel de lodo fresco de piedra caliza 141. El flujo del lodo fresco de piedra caliza 141 hacia el cristizador 134 es regulado para mantener un pH apropiado para el lodo 148 que, a su vez, controla la cantidad de SO<sub>2</sub> eliminada del gas de escape 114. El procesamiento de WFGD realiza normalmente la eliminación de un 92 hasta un 97% de SO<sub>2</sub> del gas de escape, aunque las personas familiarizadas con este ramo técnico saben que, por aplicarse determinadas técnicas así como por añadir al lodo unos ácidos orgánicos, la eliminación del SO<sub>2</sub> puede ser incluso mayor del 97%.

Tal como mencionado anteriormente, los convencionales sub-sistemas de WFGD reciclan el lodo. Si bien durante la producción del yeso se generan normalmente algo de agua residual así como otro tipo de desperdicios, el agua es recuperada en la máxima medida posible para ser empleada con el fin de refrescar el lodo de piedra caliza y con lo cual se reducen los desperdicios y los costos, que se presentarían al tratar el agua del proceso.

Se ha de reconocer que la piedra caliza es fácilmente disponible en grandes cantidades y en muchos lugares, por lo cual la misma es empleada como reactivo en el procedimiento de desulfuración de gas procedente del carbón. No obstante, en lugar de la piedra caliza también pueden ser usados, como alternativa, otros reactivos como son, por ejemplo, la cal viva o un compuesto de sodio. Por regla general, estos otros reactivos son más caros y no son

## ES 2 311 234 T3

actualmente competidores para el reactivo de la piedra caliza. Sin embargo, con unas muy ligeras modificaciones - tanto en el mezclador 140 como en la fuente de reactivo, situada corriente arriba - una existente WFGD en base a piedra caliza puede funcionar con la cal viva o con un compuesto de sodio. De hecho es así, que la mayoría de los sistemas de WFGD comprenden un sub-sistema de emergencia para cal viva, de tal manera que la WFGD pueda funcionar al haber dificultades en la entrega de piedra caliza y/o ciertos problemas en el mantenimiento del triturador 170.

La Figura 2 muestra más detalles de algunos aspectos del sub-sistema de WFGD, representado en la Figura 1. Según lo indicado, la unidad de deshidratación 136 puede comprender tanto una unidad de deshidratación primaria 136A como una unidad de deshidratación secundaria 136B. La unidad de deshidratación primaria 136A comprende preferentemente unos hidrociclones para separar el yeso del agua. La unidad de deshidratación secundaria 136B comprende, de forma preferente, un secador de cinta para secar el yeso. Tal como mencionado anteriormente, el gas de escape 114 entra en el absorbedor 132, normalmente desde un lado, y fluye luego hacia arriba, a través de una niebla de piedra caliza que está siendo pulverizada al interior de la parte superior de la torre de absorción. Antes de salirse del absorbedor, el gas de escape se hace pasar por un eliminador de nieblas (ME o Mist Eliminator), que no está indicado aquí y que está ubicado en la parte superior del absorbedor 132. Este eliminador de nieblas elimina de la corriente de gas de escape el líquido y los sólidos arrastrados. Para mantener el eliminador de nieblas limpio de partes sólidas es aplicado sobre el eliminador de nieblas un agua de enjuague 200. Es evidente que el enjuague 200 mantiene el eliminador de nieblas limpio dentro de la torre de absorción 132 con el agua procedente de la fuente de agua limpia 164. El agua de enjuague 200 del eliminador de nieblas es el agua más pura que es aportada al sub-sistema de la WFGD 130.

Según lo anteriormente indicado, el lodo de piedra caliza absorbe un elevado porcentaje del SO<sub>2</sub> (por ejemplo, del 92 al 97%) del gas de escape, que está pasando por la torre de absorción 132. Una vez absorbido el SO<sub>2</sub>, el lodo pulverizado cae al cristalizador 134. Según una implementación práctica, la torre de absorción 132 y el cristalizador 134 se encuentran frecuentemente alojados en una estructura única, estando la torre de absorción situada directamente por encima del cristalizador, dentro de la misma estructura. En estas implementaciones es así, que el lodo pulverizado cae sencillamente sobre el fondo de la estructura unitaria para luego ser cristalizado.

El lodo de piedra caliza entra en reacción con el SO<sub>2</sub> para producir el yeso (sulfato de calcio deshidratado) dentro del cristalizador 134. Tal como anteriormente indicado, un forzado y comprimido aire de oxidación 154 es empleado para facilitar la oxidación, que se produce según la siguiente reacción:



El aire de oxidación 154 es forzado hacia el interior del cristalizador 134 por medio del ventilador 150. Este aire de oxidación proporciona el oxígeno adicional, que es necesario para la conversión del sulfito de calcio en sulfato de calcio.

La torre de absorción 132 es empleada para llevar a efecto un contacto íntimo entre el gas de escape y el lodo líquido, el cual es necesario para conseguir las elevadas eficiencias de eliminación, exigidas por las especificaciones de la protección medio-ambiental. Las torres de absorción de contra-corriente y de una pulverización abiertas facilitan unas características particularmente convenientes para el procesamiento de piedra caliza/yeso dentro de la desulfuración WFGD: Las torres son especialmente fiables; las mismas acusan un más reducido potencial de atascamiento que otras partes componentes de una unidad de procesamiento de WFGD basada en una torre de absorción; las torres favorecen una caída del lodo a un menor costo; como asimismo son eficientes en cuanto a los costos, tanto con respecto al capital invertido como en relación con los costos del funcionamiento.

Tal como indicado en la Figura 2, la fuente de agua 164 comprende por lo general un depósito de agua 164A para almacenar una cantidad suficiente de agua limpia. También están normalmente incluidas en la misma una o varias bombas 164B para conducir el agua de enjuague ME 200 hacia la torre de absorción 132 así como una o varias bombas 164C para conducir el flujo de agua limpia 162 hacia el mezclador 140. El mezclador 140 comprende un depósito mezclador 140A así como una o varias bombas de lodo 140B para desplazar el lodo de piedra caliza fresco 141 hacia el cristalizador 134. Una o varias bombas de lodo muy grandes 133 (Véase la Figura 1) son necesarias para elevar el lodo 148 desde el cristalizador 134 hacia los múltiples niveles de pulverización dentro de la parte superior de la torre de absorción 132.

Tal como esto será descrito más abajo, el lodo de piedra caliza 148 entra normalmente en la torre de absorción 132 a través de unas toberas de pulverización (no indicadas aquí), dispuestas a distintos niveles de la torre de absorción 132. Al encontrarse a plena carga, la mayoría de los sub-sistemas de WFGD trabajan con por lo menos una bomba de lodo de 133 como repuesto. A unas cargas más reducidas, muchas veces es posible conseguir la necesaria eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub> con un número más pequeño de bombas de lodo 133. Existe un significativo incentivo económico para reducir la carga de bombeo de las bombas de lodo 133. Estas bombas son unas de las más grandes bombas en el mundo, y las mismas son impulsadas por electricidad que, de no ser así, podría ser vendida directamente a la red de energía (carga de energía parasitaria).

En la unidad de deshidratación primaria 136A, el yeso 160 es separado de los líquidos que hay dentro del lodo de yeso 146, normalmente por el empleo de un hidrociclón. El rebosadero del hidrociclón y/o de varias otras partes componentes de la unidad de deshidratación primaria 136A contiene una pequeña cantidad de sólidos. Según lo indi-

## ES 2 311 234 T3

cado en la Figura 2, el lodo de rebosadero 146A es retornado al cristalizador 134. El agua recuperada 167 es devuelta al mezclador 140 para hacer más fresco el lodo de piedra caliza. Los restantes desperdicios 168 son normalmente dirigidos desde la unidad de deshidratación primaria 136A hacia un embalse 210 para cenizas. El lodo de corriente de fondo 202 es dirigido hacia la unidad de deshidratación secundaria 136B, que muchas veces tiene la forma de un filtro de cinta; este lodo es secado para constituir el sub-producto de yeso 160. El agua recuperada 167 de la unidad de deshidratación secundaria 136B es también retornada al mezclador/bomba 140. Según lo indicado en la Figura 1, muestras u otras probetas 161 son tomadas del yeso y son analizadas, normalmente con un intervalo de pocas horas, para determinar la pureza del yeso 160. Actualmente no es posible efectuar una determinación de la pureza del yeso a través de una medición directa on-line.

Tal como indicado en la Figura 1, un regulador compensador integral proporcional (PID = proporcional integral derivative controller) 180 es normalmente empleado en conjunto con un regulador de avance de alimentación de (FF = feedforward controller) 190 para controlar el funcionamiento del sub-sistema de WFGD. Convencionalmente, los reguladores de tipo PID dirigen las directas funciones digitales del control, aplicando para ello unas fórmulas matemáticas. La finalidad de los reguladores FF 190/PID 180 consiste en controlar el pH del lodo en base a una relación fija. Por ejemplo, puede haber una relación fija entre el ajuste de la válvula 199, indicada en la Figura 1, y un medio valor pH del lodo 148, que fluye desde el cristalizador 134 hacia la torre de absorción 132. En este caso, la válvula 199 es regulada de tal manera, que el valor pH del lodo 148 pueda corresponder a un deseado valor 188, al cual se hace frecuentemente referencia como punto de ajuste o setpoint (SP).

Los reguladores FF 190/PID 180 pueden - basado en el punto de ajuste del pH - regular el flujo del lodo de piedra caliza 141 a través de la válvula 199 para incrementar o disminuir el valor pH del lodo 148, el cual es medido por el sensor pH 182. Es evidente que esto es llevado a efecto por transmitir los reguladores FF/PID unas correspondientes señales de control, 181 y 191, que tienen por resultado una instrucción de ajuste para la válvula - la cual está representada como el punto de ajuste SP 196 de control del flujo - hacia un regulador de flujo que preferentemente forma parte de la válvula 199. En respuesta al punto de ajuste SP 196 de control del flujo, el regulador de flujo dirige, a su vez, una instrucción de ajuste de la válvula 199 para modificar el flujo del lodo de piedra caliza 141 desde el mezclador/bomba 140 hacia el cristalizador 134.

Este ejemplo representa el control del valor pH empleando la combinación entre el regulador FF 190 y el regulador PID 180. Puede ser que algunas instalaciones no incluyen el regulador FF 190.

Según el presente ejemplo, el regulador PID 180 genera la señal de control PID 181 por procesar el medio valor pH 183 del lodo - el que es recibido del sensor de pH 182 - en conformidad con un algoritmo de control del flujo de piedra caliza, el cual representa una relación fija entre el medio valor pH 183 del lodo 148 que fluye desde el cristalizador 134 hacia la torre de absorción 132. Este algoritmo está normalmente guardado dentro del regulador PID 180, si bien esto no es obligatorio. La señal de control 181 puede representar, por ejemplo, un punto de ajuste de válvula (VSP) para la válvula 199 o para un medio punto de ajuste (MVSP = measured value setpoint) con respecto al flujo del triturado lodo de piedra caliza 141 que sale de la válvula 199.

Tal como esto es conocido en este ramo técnico, el algoritmo aplicado por el regulador PID 180 comprende un elemento proporcional, un elemento integral así como un elemento compensador. El regulador PID 180 calcula, en primer lugar, la diferencia entre el punto de ajuste deseado y el valor medido para poder determinar un error. A continuación, el regulador PID aplica el error sobre el elemento proporcional del algoritmo, el cual representa una constante regulable del regulador PID o para cada uno de los reguladores PID si en el sub-sistema de WFGD son empleados varios reguladores PID. El regulador PID multiplica normalmente un factor de reglaje o un rendimiento del proceso por el error con el fin de obtener una función proporcional para el ajuste de la válvula 199.

Sin embargo, al no tener el regulador PID 180 el valor correcto para el factor de reglaje o para el rendimiento del proceso, o bien al variar las condiciones del proceso, esta función proporcional será imprecisa. A causa de esta imprecisión, los puntos de ajuste VSP o MVSP, generados por el regulador PID 180, acusarán efectivamente un desajuste con respecto a los valores correspondientes al punto de ajuste SP deseado. Por consiguiente, el regulador PID 180 aplica el acumulado error con cierto retraso, empleando un elemento integral. Este elemento integral representa un factor de tiempo. También aquí es así que el regulador PID 180 multiplica un factor de reglaje o un rendimiento del proceso por el error acumulado para eliminar el desajuste.

Nos referimos ahora al elemento compensador. El elemento compensador representa un factor de aceleración, relacionado con un cambio continuo. En la práctica, el elemento compensador es aplicado raras veces en los reguladores PID, empleados para controlar los procesos de la desulfuración WFGD. Esto es porque la aplicación del elemento compensador no es especialmente beneficiosa para este tipo de aplicación de control. Por consiguiente, la mayor parte de los reguladores empleados en los sub-sistemas de WFGD son, efectivamente, los reguladores PID. No obstante, las personas familiarizadas con este ramo técnico tendrán que admitir que, en el caso de ser deseado, los reguladores PID 180 pueden ser fácilmente configurados con la lógica necesaria para aplicar un elemento compensador de una manera convencional.

Como resumen: Existen tres constantes de reglaje, que pueden ser aplicadas en los convencionales reguladores PID para regular un valor de proceso - como, por ejemplo, el valor pH del lodo de reciclaje 148, que entra en la torre de absorción 132 - a un punto de ajuste como es, por ejemplo, el flujo del lodo de piedra caliza fresca 141 hacia el

## ES 2 311 234 T3

5 cristalizador 134. Cualquiera que sea el punto de ajuste empleado, el mismo es establecido siempre en términos de un valor de proceso, y no en términos de un resultado deseado como, por ejemplo, el valor del SO<sub>2</sub> que permanece dentro del gas de escape 116, que sale de la torre de absorción 132. Indicado de otra manera, el punto de ajuste es identificado en términos del proceso, y es necesario que el controlado valor de proceso pueda ser medido directamente para que el regulador PID sea capaz de controlar el mismo. Mientras que la forma exacta del algoritmo pueda variar de un vendedor de equipo a otro, el algoritmo básico de control PID está siendo empleado en las industrias de procesos desde hace más de 75 años.

10 Haciendo otra vez referencia a las Figuras 1 y 2, se observa que - basado en las instrucciones, recibidas del regulador PID 180 y del regulador FF 190 - el regulador del flujo genera una señal que hace que la válvula 199 se abra o se cierre, con lo cual es incrementado o reducido, respectivamente, el flujo del lodo de piedra caliza triturada 141. El regulador del flujo sigue controlando el ajuste de la válvula hasta que la válvula 199 haya sido abierta o cerrada para coincidir con el punto de ajuste VSP o con el valor medido de la cantidad del lodo de piedra caliza 141, que es aportado desde la válvula 199, coincidiendo con el punto de ajuste MVSP.

15 Según el control convencional de WFGD, arriba descrito a título de ejemplo, el valor pH del lodo 148 es controlado en base a un deseado punto de ajuste pH 186. Para efectuar este control, el regulador PID 180 recibe del sensor 182 un valor de proceso, es decir, el valor medio del pH del lodo 148. El regulador PID 180 procesa el valor de proceso para generar las instrucciones 181 para la válvula 199 a efectos de ajustar el flujo del lodo de piedra caliza fresca 141, que es de un valor pH más elevado que el valor pH del lodo 144 del cristalizador, el cual procede del mezclador/depósito 20 140, y para ajustar, de este modo, el valor pH del lodo 148. Si las instrucciones 181 tienen por resultado una mayor apertura de la válvula 199, fluirán más lodo de piedra caliza 141 desde el mezclador 140 y al interior del cristalizador 134, con lo cual se produce un aumento en el valor pH del lodo 148. Si, por el contrario, las instrucciones 181 tienen por resultado el cierre de la válvula 199, fluirán menos lodo de piedra caliza 141 del mezclador 140 y, por lo tanto, al 25 interior del cristalizador 134, con lo cual se produce una reducción en el valor pH del lodo 148.

Adicionalmente, el sub-sistema de WFGD puede tener incorporado un bucle de avance de alimentación, que es implementado por emplear una unidad de avance de alimentación FF 190 con el fin de asegurar un funcionamiento más estable. Tal como indicado en la Figura 1, el valor de concentración del SO<sub>2</sub> 189 en el gas de escape 114, que 30 entra en la torre de absorción 132, es medido por el sensor 188, y este valor es introducido en la unidad de avance de alimentación 190. Numerosos sistemas WFGD, que comprenden el elemento de control de avance de alimentación FF, pueden combinar la concentración del SO<sub>2</sub> 189 del gas de escape entrante con una medición de la carga del generador, la cual procede del sistema de generación de energía 110, para determinar la cantidad de entrada de SO<sub>2</sub>, en vez de solamente determinar la concentración, para luego emplear esta cantidad de entrada del SO<sub>2</sub> como valor de entrada 35 para la unidad FF 190. La unidad de avance de alimentación FF 190 sirve como un elemento proporcional en función del tiempo transcurrido.

Según la implementación, aquí descrita a título de ejemplo, la unidad FF 190 recibe del sensor 188 una secuencia de mediciones del SO<sub>2</sub>. Esta unidad FF 190 compara el valor de concentración actualmente recibido con el valor de concentración recibido inmediatamente anterior al valor actualmente recibido. Al determinar la unidad de avance de alimentación FF 190 que se ha producido una variación en las concentraciones medidas del SO<sub>2</sub> - como, por ejemplo, desde 1.000 hasta 1.200 partes por millón - la mitad es configurada con la lógica de suavizar la función de 40 escalonamiento, con lo cual queda impedido un cambio abrupto en las operaciones.

45 El bucle de avance de alimentación mejora drásticamente la estabilidad durante el funcionamiento normal, debido a que la relación entre el valor pH del lodo 148 y la cantidad del lodo de piedra caliza 141, que pasa al cristalizador 134, es extremadamente no-lineal, mientras que el regulador PID 180 es, efectivamente, un regulador lineal. Por consiguiente, sin el bucle de avance de alimentación resulta muy difícil para el PID 180 proporcionar el control apropiado sobre una amplia gama de valores pH y con las mismas constantes de reglaje.

50 Por controlar el valor pH del lodo 148, el regulador PID 180 lleva a efecto el control, tanto de la eliminación del SO<sub>2</sub> del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, como de la calidad del sub-producto yeso 160, producido en el sub-sistema de WFGD. Incrementando el valor pH del lodo por aumentar el flujo del lodo de piedra caliza fresca 141, se incrementa la cuantía de SO<sub>2</sub> eliminada del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>. Por el otro lado, 55 al aumentarse el flujo del lodo de piedra caliza 141 - y, por lo tanto, el valor pH del lodo 148 - quedan ralentizadas la oxidación del SO<sub>2</sub> después de la absorción y, por consiguiente, la transformación de sulfito de calcio en sulfato de calcio lo que, a su vez, tendrá como resultado una inferior calidad del yeso 160, que está siendo producido.

60 Por lo tanto, existen unos objetivos de control que están en conflicto entre si, es decir, la eliminación del SO<sub>2</sub> del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, en relación con el mantenimiento de la deseada calidad del sub-producto de yeso 160. Quiere decir esto, que puede haber también un conflicto entre el cumplimiento de las exigencias para la emisión del SO<sub>2</sub> y las necesidades respecto a la calidad del yeso.

65 La Figura 3 detalla otros aspectos del sub-sistema de WFGD, descrito en relación con las Figuras 1 y 2. Según lo indicado, el gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, entra en una parte del fondo de la torre de absorción 132 a través de la abertura 310, y el gas de escape 116, que está libre del SO<sub>2</sub>, sale - a través de la abertura 312 - de una parte superior de la torre de absorción 132. En este ejemplo de una implementación convencional está indicada una torre de absorción de contra-corriente, con una multitud de niveles de pulverización de lodo. Según lo indicado, el agua de

## ES 2 311 234 T3

enjuague ME 200 entra en la torre de absorción 132 para ser dispersada mediante los pulverizadores de enjuague (no indicados aquí).

5 También está indicada una multitud de toberas de lodo 306A, 306B y 306C de la torre de absorción, de las cuales cada una comprende un pulverizador de lodo 308A, 308B o 308C, que pulveriza el lodo hacia el interior del gas de escape para absorber el SO<sub>2</sub>. El lodo 148 es bombeado desde el cristallizador 134, indicado en la Figura 1, mediante una multitud de bombas 133A, 133B y 133C, cada una de las cuales bombea el lodo hacia arriba, a los respectivos niveles distintos de las toberas de lodo 306A, 306B o 306C. Es evidente que, si bien aquí se indican 3 distintos niveles de toberas de lodo y de pulverizadores, el número de las toberas y de los pulverizadores puede variar en función de las particularidades de la implementación.

15 Una relación entre la velocidad de flujo del lodo líquido 148, que entra en el absorbedor 132, y la velocidad de flujo del gas de escape 116, que sale del absorbedor 132, está caracterizada normalmente como L/G. La relación L/G representa uno de los parámetros clave en cuanto al diseño de los sub- sistemas de WFGD.

20 La velocidad de flujo del gas de escape 116 (saturado con vapor), la cual es designada como G, está en función del gas de escape de entrada 112, procedente del sistema de generación de energía 110, situado corriente arriba de la unidad de procesamiento de WFGD 130. Por consiguiente, G no es - ni puede ser - controlada, pero sí tiene que ser dirigida en el procesamiento de WFGD. De este modo, para determinar L/G, tiene que ser ajustado el parámetro "L". Por ajustarse el número de bombas de lodo en funcionamiento así como la "alineación" de estas bombas de lodo, queda controlada la velocidad de flujo del lodo líquido 148 hacia la torre de absorción 132, la cual es designada como L. Por ejemplo, al estar funcionando solamente dos de las bombas, el funcionamiento de las bombas hacia los dos pulverizadores de niveles superiores en relación con las bombas, que funcionan hacia los pulverizadores de niveles superiores e inferiores, producirá unos distintos parámetros "L".

25 Existe la posibilidad de ajustar "L" por controlarse el funcionamiento de las bombas de lodo 133A, 133B y 133C. Las bombas individuales pueden ser conectadas o desconectadas para regular tanto la velocidad de flujo del lodo líquido 148 hacia la torre de absorción 132 como asimismo la altura efectiva a la que el lodo líquido 148 es introducido en la torre de absorción. Cuanto mayor sea la altura a la que el lodo es introducido en la torre, tanto más tiempo de contacto tiene el mismo con el gas de escape, lo cual resulta en una mayor eliminación del SO<sub>2</sub>, pero esta adicional eliminación del SO<sub>2</sub> tiene lugar a expensas de un aumento en el consumo de energía para bombear el lodo hacia los mayores niveles de pulverización. Es evidente que, cuanto mayor sea el número de bombas mayor será también la exactitud de un control de este tipo.

30 Las bombas, 133A hasta 133C, que constituyen unas piezas extremadamente grandes de un equipo rotatorio, pueden ser arrancadas y paradas de forma automática o manual. En los Estados Unidos, en la mayoría de los casos es así, que estas bombas son controladas de forma manual por el operario del sub-sistema. En Europa, sin embargo, es normal que la puesta en marcha y la parada de un equipo rotatorio - como son las bombas 133A hasta 133B - son efectuadas de forma automática.

35 Al ser variada la velocidad de flujo del gas de escape 114 - que entra en la unidad de procesamiento WFGD 130 - debido a un cambio en el funcionamiento del sistema de generación de energía 110, el operario del sub-sistema de WFGD puede regular el funcionamiento de una o de varias de las bombas, 133A hasta 133C. Por ejemplo, si la velocidad del gas de escape comienza a reducirse al 50% de la carga diseñada, el operario - o una lógica especial en el sistema de control - puede parar una o varias bombas, que bombean el lodo hacia las toberas de nivel de pulverización a uno o a varios niveles de pulverización.

40 Si bien esto no está indicado en la Figura 3, se ha de entender que muchas veces pueden estar previstos unos niveles de pulverización adicionales, con sus respectivas bombas y toberas de lodo, para ser empleados durante el periodo de mantenimiento de otra bomba o de otras toberas de lodo y/o pulverizadores de lodo, que están asociados a los niveles de pulverización primarios. La aportación de este nivel de pulverización adicional hace aumentar los costos de inversión de la torre de absorción y, por consiguiente, del sub-sistema. Por lo tanto, algunos propietarios de sub-sistemas de WFGD se decidirán si eliminan el adicional nivel de pulverización y evitan estos costos suplementarios de la inversión para, en lugar de ello, añadir unos ácidos orgánicos al lodo para así mejorar su capacidad de absorción y, por consiguiente, eliminar durante estos periodos de mantenimiento el SO<sub>2</sub> del gas de escape. Estos aditivos tienden, sin embargo, a ser caros por lo cual su aplicación tendrá por resultado unos mayores costos de operación, que con el tiempo pueden sobrepasar los ahorros en los costos de inversión.

45 Tal como indicado en la ecuación 1 arriba expuesta, para poder absorber el SO<sub>2</sub> tiene que producirse una reacción química entre el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape y la piedra caliza dentro del lodo. El resultado de esta reacción química dentro del absorbedor consiste en la formación del sulfito de calcio. Dentro del cristallizador 134, el sulfito de calcio es oxidado para formar el sulfato de calcio (yeso). Durante esta reacción química queda consumido el oxígeno. Para proporcionar suficiente oxígeno y mejorar así la velocidad de la reacción, un adicional oxígeno O<sub>2</sub> es aportado por soplar un aire comprimido 154 al interior del lodo líquido dentro del cristallizador 134.

50 Más particularmente, y conforme a lo indicado en la Figura 1, el aire ambiental 152 es comprimido para constituir el aire comprimido 154, que es forzado hacia el interior del cristallizador 134 mediante un soplador como, por ejemplo, un ventilador 150, con el fin de oxidar el sulfito de calcio dentro del todo reciclado 148, que del cristallizador 134 es

## ES 2 311 234 T3

retornado hacia el absorbedor 132, mientras que el lodo de yeso 146 es enviado hacia el sistema de deshidratación 136 a efectos de su ulterior procesamiento. Para facilitar un ajuste en el flujo del aire de oxidación 154, el soplador 150 puede tener un mecanismo de control de velocidad o de carga.

5 De forma preferente, el lodo dentro del cristalizador 134 tiene un exceso de oxígeno. Existe, sin embargo, un límite superior para la cantidad de oxígeno, que puede ser absorbida o mantenida por el lodo. Si el nivel de O<sub>2</sub> dentro del lodo se reduce excesivamente, se parará la oxidación química de CaSO<sub>3</sub> a CaSO<sub>4</sub> dentro del lodo. Al ocurrir esto, se habla normalmente de una obstrucción de piedra caliza. Una vez que se haya producido una obstrucción de piedra caliza, la piedra caliza para de disolverse dentro de la solución del lodo, y la eliminación del SO<sub>2</sub> puede quedar reducida drásticamente. También la presencia de unas cantidades de trazas de algunos minerales puede ralentizar drásticamente la oxidación de sulfito de calcio y/o la disolución de piedra caliza para formar la obstrucción de piedra caliza.

15 Teniendo en cuenta que no es un parámetro medible la cantidad del O<sub>2</sub>, que es disuelto dentro del lodo, el lodo puede ser pobre en O<sub>2</sub> en los convencionales sub-sistemas de WFGD si no se toman unas precauciones apropiadas. Esto afecta especialmente los meses de verano, en los que la más elevada temperatura del ambiente hace que se reduzca la densidad del aire ambiental 152 y merma la cantidad de aire de oxidación 154, que puede ser forzada al interior del cristalizador 134 por el soplador 150 a su velocidad o carga máximas. Además, al incrementarse de forma significativa la cantidad de SO<sub>2</sub>, eliminada del flujo de gas de escape, se requiere una correspondiente cantidad de oxígeno O<sub>2</sub> adicional para oxidar el SO<sub>2</sub>. De este modo, el lodo puede volverse efectivamente pobre en O<sub>2</sub> a causa de un incremento en el flujo del SO<sub>2</sub> hacia la unidad de procesamiento WFGD.

20 Es necesario inyectar el aire comprimido 154 que - dentro de las proporciones del diseño - sea suficiente para oxidar el absorbido SO<sub>2</sub>. Existe la posibilidad de regular la velocidad o la carga del soplador 150, y resulta conveniente ajustar el soplador 150 a la baja con unas más reducidas cargas de SO<sub>2</sub> y/o durante los periodos de un aire de ambiente más frío, toda vez que con ello se ahorra energía. Al alcanzar el soplador 150 su carga máxima, o al ser empleado todo el O<sub>2</sub> de un soplador 150, que no puede ser regulado, no es posible oxidar ningún incremento en el SO<sub>2</sub>. A la carga punta del soplador 150 - o sin un control de la velocidad de un soplador, que pueda encaminar correctamente la eliminación del SO<sub>2</sub> - existe la posibilidad de producirse una falta del O<sub>2</sub> dentro del cristalizador 134.

30 Debido al hecho de que no es posible medir el O<sub>2</sub> dentro del lodo, el nivel del O<sub>2</sub> dentro del lodo no es considerado, sin embargo, como una limitación u obstáculo en las operaciones de un convencional sub-sistema de WFGD. Por consiguiente, no existe ninguna posibilidad para controlar de manera exacta si el lodo dentro del cristalizador 134 se está volviendo pobre en O<sub>2</sub>. De forma correspondiente, los operarios suponen, en el mejor de los casos, que el lodo se está volviendo pobre en O<sub>2</sub> al producirse un notable decrecimiento en la calidad del sub-producto de yeso 160, y los mismos aplicarán entonces sus mejores criterios para controlar la velocidad o la carga del soplador 150 y/o reducen la eficiencia de absorción del SO<sub>2</sub> para así equilibrar el O<sub>2</sub>, que está siendo forzado al interior del lodo, con el absorbido SO<sub>2</sub>, que ha de ser oxidado. De este modo, en los convencionales sub-sistemas de WFGD, el equilibrio entre el O<sub>2</sub>, que está siendo forzado hacia el interior del todo, y el SO<sub>2</sub>, necesario para ser absorbido del gas de escape, está basado, en el mejor de los casos, en el criterio de los operarios.

40 Como resumen, el control convencional de los grandes sub-sistemas de WFGD para las aplicaciones en las centrales de energía es efectuado normalmente dentro de un distribuido sistema de control (DCS) y el mismo consiste, por regla general, en una lógica de control de conexión/desconexión así como en los bucles de control de retroalimentación FF/PID. Los parámetros controlados están limitados al nivel pH del lodo, a la relación L/G así como al flujo del forzado aire de oxidación.

50 El valor pH debe ser mantenido dentro de una determinada gama para asegurar una elevada solubilidad del SO<sub>2</sub> (es decir, eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub>), un yeso de alta calidad (pureza) así como la prevención de formación de incrustaciones. La gama de trabajo del valor pH está en función del equipo y de las condiciones de operación. El valor pH es controlado por ajustarse el flujo de lodo de piedra caliza fresca 141 hacia el cristalizador 134. El ajuste de flujo del todo de piedra caliza está basado en el medido valor pH del lodo, el cual es detectado por un sensor. En una implementación típica, un regulador PID y, de forma opcional, un regulador FF, incluidos los mismos en el distribuido sistema de control, están dispuestos en cascada con respecto a un regulador del flujo de lodo de piedra caliza. El algoritmo PID estándar/defecto es empleado para la aplicación de control del valor pH.

55 La relación de líquido a gas (L/G) es la relación entre el lodo líquido 148, que fluye hacia la torre de absorción 132, y el flujo de gas de escape 114. Para un conjunto dado de variables del sub-sistema, se requiere una relación L/G mínima con el fin de conseguir la deseada absorción del SO<sub>2</sub>, la cual está basada en la solubilidad del SO<sub>2</sub> dentro del lodo líquido 148. La relación L/G varía o al cambiar el flujo del gas de escape 114 o al cambiar el flujo del lodo líquido 148, lo cual ocurre normalmente al estar las bombas de lodo 133 conectadas o desconectadas.

60 La oxidación del sulfito de calcio para formar el sulfato de calcio - es decir, el yeso - queda perfeccionada mediante una oxidación forzada, con un oxígeno adicional en el depósito de reacción del cristalizador 134. El oxígeno adicional es introducido por soplarse el aire al interior de la solución de lodo dentro del cristalizador 134. Con una oxidación insuficiente, se puede producir una obstrucción de sulfito/piedra caliza, la cual tiene por resultado un yeso de baja calidad, la potencialmente subsiguiente reducción en la eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub>, así como una más elevada demanda de oxígeno químico (COD = Chemical Oxygen Demand) para el agua residual.

## ES 2 311 234 T3

El esquema de control de un convencional proceso de la desulfuración WFGD está constituido por unos bloques de control estándar, con unos objetivos que si bien son independientes están sin embargo, integrados. Normalmente es así que el operario, una vez consultado al equipo de ingenieros, ha de intentar proporcionar un óptimo control del proceso en su conjunto. Para facilitar este control, el operario debe tener en cuenta los distintos objetivos y las limitaciones.

Costos reducidos al mínimo para la operación WFGD - Las plantas de energía funcionan únicamente por la razón de generar unos beneficios a los propietarios. Por consiguiente, resulta conveniente dejar funcionar el sub-sistema de WFGD al más apropiado y más reducido nivel de costo posible, respetando al mismo tiempo las limitaciones con respecto al proceso, a las regulaciones administrativas, a la calidad del sub-producto así como a los aspectos comerciales.

Máxima eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub> - Las regulaciones para un aire limpio establecen las condiciones para la eliminación del SO<sub>2</sub>. Los sub-sistemas de WFGD han de funcionar para eliminar el SO<sub>2</sub> de una manera tan eficiente como apropiada y con vistas a las limitaciones con respecto al proceso, a las regulaciones administrativas, a la calidad del sub-producto así como a los aspectos comerciales.

Cumplimiento de la especificación de calidad del yeso - La venta del yeso como sub-producto reduce los costos de operación de la desulfuración WFGD, pero la misma depende fuertemente de la pureza del sub-producto, que ha de satisfacer una determinada especificación. Los sub-sistemas de WFGD han de funcionar para generar un sub-producto de yeso de una calidad apropiada, teniendo en cuenta las limitaciones con respecto al proceso, a las regulaciones administrativas, a la calidad del sub-producto así como a los aspectos comerciales.

Prevención de obstrucción de piedra caliza - Las fluctuaciones en la carga así como unas variaciones en el contenido sulfúrico del combustible pueden originar desviaciones en el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape 114. Sin unos apropiados ajustes compensatorios, esto puede conducir a unas elevadas concentraciones de sulfito dentro del lodo lo cual produce, a su vez, unas obstrucciones de piedra caliza, una más reducida eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub> de la torre de absorción 132, una baja calidad del yeso así como una más elevada demanda de oxígeno químico para el agua residual. Los sub-sistemas de WFGD han de funcionar para impedir - a la vista de las limitaciones del proceso - la obstrucción de piedra caliza.

En una típica secuencia de funcionamiento, el operario del sub-sistema de WFGD determina unos puntos de ajuste para el proceso WFGD, con el fin de equilibrar estos objetivos entre si opuestos y las limitaciones sobre la base de unos convencionales procedimientos de operación y de sus conocimientos sobre el proceso de WFGD. Estos puntos de ajuste comprenden normalmente el valor pH así como el estado de funcionamiento de las bombas de lodo 133 y del soplador de aire de oxidación 150.

En el proceso de WFGD existen unas complejas interacciones y dinámicas; como consecuencia, el operario elige unos convencionales parámetros de operación de tal modo que el sub-sistema de WFGD esté en condiciones en alcanzar o sobrepasar las severas condiciones con respecto a la eliminación del SO<sub>2</sub> y a la pureza del yeso. Haciendo estas selecciones convencionales, el operario descuida muchas veces, si no siempre, el funcionamiento al costo mínimo.

A título de ejemplo, la Figura 4 muestra la eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub> y la pureza del yeso en función del valor pH. Conforme sea aumentado el valor pH, se incrementa la eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub>, pero se reduce la pureza del yeso. Como quiera que el operario tiene el interés de mejorar tanto la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub> como la pureza del yeso, el mismo ha de determinar un punto de ajuste para el valor pH, el cual constituya un compromiso entre estos objetivos, que son entre si opuestos.

Además, en la mayoría de los casos, se le exige al operario cumplir un garantizado nivel de pureza para el yeso como, por ejemplo, una pureza del 95%. Debido a la complejidad de las relaciones indicadas en la Figura 4, a la falta de una directa medición de la pureza del yeso on-line, debido a la dinámica de largo tiempo en la cristalización del yeso así como debido a unas variaciones al azar en las operaciones, el operario muchas veces elige introducir un punto de ajuste para el valor pH, el cual ha de asegurar que el nivel de pureza del yeso sea mayor que la limitación especificada, y esto bajo cualquier circunstancia. Desde luego, por asegurar la pureza del yeso, el operario sacrifica frecuentemente la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>. Por ejemplo, basado en el gráfico de la Figura 4, el operario puede elegir un valor pH de 5.4 para garantizar el 1% de cojín sobre la limitación de la pureza de yeso del 95%. Por elegir este punto de ajuste para el valor pH, el operario sacrifica, sin embargo, el 3% de la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>.

El operario se enfrenta a unos compromisos similares si la carga de SO<sub>2</sub> - es decir, el flujo de gas de escape 114 - se reduce desde la plena a la media carga. En algún momento durante esta transición puede ser conveniente cortar una o varias de las bombas de lodo 133 para ahorrar energía, habida cuenta de que un funcionamiento continuo de la bomba puede representar una eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>, la cual es, sin embargo, sólo ligeramente mejor. Desde luego, debido a que la relación existente entre los costos de energía y la eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub> no es bien comprendida por la mayoría de los operarios, éstos adoptarán normalmente una actitud conservadora o convencional. Al adoptar esta actitud, los operarios no pueden ajustar las bombas de lodo 133, conectadas en línea, aunque sería más beneficioso desconectar una o varias de las bombas de lodo 133.

## ES 2 311 234 T3

También es bien sabido que algunas regulaciones administrativas, relativas a las emisiones, permiten prever tanto unos límites para la emisión instantánea como también para alguna forma de emisiones medias rotativas. Este límite de emisión de tipo rotativo es el valor medio de las emisiones instantáneas por algunas ventanas de tiempo móvil o rotativo. La ventana de tiempo puede ser tan corta como una hora, al igual que de larga como un año. Algunas típicas  
5 ventanas de tiempo abarcan una hora, tres horas, ocho horas, 24 horas, un mes así como un año. Para permitir unas desviaciones dinámicas dentro del proceso, el límite de las emisiones instantáneas es normalmente más elevado que el límite de emisiones medias rotativas. Sin embargo, una operación continua al límite de emisiones instantáneas tendrá por resultado una violación del límite de las emisiones medias rotativas.

10 Convencionalmente, el regulador PID 180 regula el límite de emisiones instantáneas, lo cual es relativamente sencillo. A este efecto, la limitación de operación para el proceso - como, por ejemplo, el valor instantáneo - queda bien definida dentro del actual límite de regulación de emisiones por preverse, a este efecto, un margen de seguridad.

15 Por el otro lado, es más complejo el control de las emisiones respecto al límite de emisiones medias rotativas. La ventana de tiempo para el valor medio rotativo avanza de forma continua. Por consiguiente, en un momento dado están activas varias ventanas de tiempo, extendiéndose una ventana de tiempo desde el momento dado por un periodo de tiempo hacia atrás, mientras que otra ventana de tiempo se extiende desde el momento dado por un determinado periodo de tiempo hacia delante.

20 Convencionalmente, el operario intenta controlar las emisiones con respecto al límite del valor medio rotativo por simplemente mantener un suficiente margen entre la limitación de funcionamiento, establecida en el regulador PID 180 para el límite de emisiones instantáneas y el límite actual de las emisiones reglamentarias, o bien por aplicar el criterio del operario para fijar la limitación de funcionamiento a la vista del límite de las emisiones medias rotativas. En cualquier caso, no existe ningún control explícito de las emisiones medias rotativas y, por lo tanto, ninguna forma  
25 para asegurar un cumplimiento del límite del valor medio rotativo ni para impedir un costoso cumplimiento excesivo.

### *Sistema de selectiva reducción catalítica*

30 Al referirse brevemente a otro ejemplo de un proceso para el control de la contaminación del aire, es decir, al sistema de selectiva reducción catalítica (SCR) para la eliminación de Nox, podemos constatar unos retos similares para la operación. En la Figura 20 está representada una vista sinóptica del proceso SCR.

35 La sinopsis, relacionada a continuación para el proceso, procede del artículo "Control of Nitrogen Oxide Emissions: Selective Catalytic Reduction (SCR)" o Control de emisiones de óxido de nitrógeno: Selectiva reducción catalítica) Topical Report o Informe Temático Núm. 9 Clean Coal Technology o Tecnología de carbón limpia, Ministerio de Energía de los Estados Unidos, 1997.

### *Resumen del proceso*

40 El óxido de nitrógeno Nox - que consiste principalmente en NO así como en menos cantidades de NO<sub>2</sub> - es convertido al nitrógeno por la reacción con NH<sub>3</sub> sobre un catalizador y en la presencia del oxígeno. Una pequeña fracción de dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, producida dentro de la caldera por la oxidación del azufre dentro del carbón, es oxidada a trióxido de azufre SO<sub>3</sub> sobre el catalizador SCR. Además, unas reacciones laterales pueden generar unos indeseables sub-productos: El sulfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, así como el bisulfato de amonio NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>. Existen unas  
45 complejas relaciones que rigen la formación de estos sub-productos; sin embargo, las mismas pueden ser reducidas al mínimo por medio de un apropiado control de las condiciones del proceso.

### *Desplazamiento de amoníaco*

50 El NH<sub>3</sub> sin reaccionar dentro del gas de escape corriente abajo del reactor SCR es conocido como desplazamiento de NH<sub>3</sub>. Es esencial mantener el desplazamiento de NH<sub>3</sub> por debajo de 5 ppm, preferentemente por debajo de 2 hasta 3 ppm, para así reducir al mínimo la formación de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>, la que puede originar un atascamiento y la corrosión en el equipo corriente abajo. El problema es mayor en los carbones con un elevado contenido en azufre, originado por unos mayores niveles de SO<sub>3</sub>, resultantes tanto por los más altos niveles iniciales de SO<sub>3</sub> - debido al  
55 contenido de azufre en el combustible - como asimismo por la oxidación del SO<sub>2</sub> dentro del reactor SCR.

### *Temperatura de funcionamiento*

60 Los costos del catalizador representan un 15 hasta un 20% de los costos de inversión de una unidad de SCR; por consiguiente, es esencial operar a las más altas temperaturas posibles para aumentar al máximo la velocidad de espacio y, por consiguiente, reducir al mínimo el volumen del catalizador. Al mismo tiempo es necesario recurrir al mínimo la tasa de oxidación del SO<sub>2</sub> al SO<sub>3</sub>, la cual es más sensible a la temperatura que la reacción de SCR. La óptima temperatura de operación para el proceso de SCR, empleando como catalizadores el óxido de titanio y de vanadio, es de aproximadamente 650 hasta 750°F. La mayoría de las instalaciones emplean una desviación economizadora para  
65 pasar el gas de escape a los reactores, a la deseada temperatura y durante los periodos en los cuales son más bajas las temperaturas del gas de escape como, por ejemplo, durante la operación a una baja carga.

## ES 2 311 234 T3

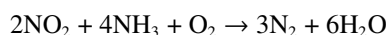
### *Catalizadores*

Los catalizadores para SCR están hechos de un material cerámico, que representa una mezcla de soporte (óxido de titanio) y de componentes activos (óxidos de vanadio y, en algunos casos, de tungsteno). Las dos formas más frecuentes de los catalizadores de SCR, empleados hoy en día, son las estructuras alveolares y las placas. La estructura alveolar constituye normalmente una cerámica con el catalizador o incorporado por toda la estructura (de forma homogénea) o aplicado como revestimiento sobre un sustrato. Según la geometría de placas, el material de soporte está normalmente revestido del catalizador. Al procesarse un gas de escape con contenido en polvo, los reactores son normalmente de forma vertical, con el flujo descendente del gas de escape. Por regla general, el catalizador está dispuesto en unas series de dos hasta cuatro lechos o capas. Para una mejor utilización del catalizador es frecuente emplear tres o cuatro capas, con la posibilidad de prever una capa adicional, que no es instalada inicialmente.

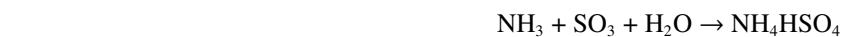
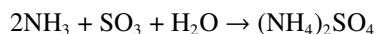
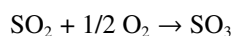
Conforme se va reduciendo la actividad del catalizador, se instala en los espacios disponibles dentro del reactor un catalizador adicional. Al continuar la desactivación del catalizador, el mismo es sustituido sobre una base rotatoria, cada vez una capa y comenzando con la parte superior. Esta estrategia asegura la máxima utilización del catalizador. El catalizador es sometido periódicamente a un soplado para eliminar las deposiciones de hollín, empleando para ello el vapor como agente depurador.

### 20 *Química*

La química del proceso de SCR queda establecida por lo siguiente:



30 Las reacciones laterales son como sigue:



### *Descripción del proceso*

Tal como indicado en la Figura 20, el gas de escape sucio 112 abandona el sistema de generación de energía 110. Este gas de escape puede ser tratado por otros sub-sistemas 122 para el control del aire contaminado (APC), previo a su entrada al sub-sistema de selectiva reducción catalítica (SCR) 2170. El gas de escape también puede ser tratado por otros sub-sistemas APC (no indicados aquí) después de salir de la SCR y antes de pasar por la chimenea 117 hacia fuera. El NOx en el gas de escape entrante es medido mediante uno o varios analizadores 2003. El gas de escape con NOx 2008 se hace pasar por la rejilla de inyección de amoníaco (NH<sub>3</sub>) 2050. El amoníaco 2061 es mezclado con aire diluyente 2081 por un mezclador de amoníaco/aire diluyente 2070. La mezcla 2071 es pasada de forma dosificada al interior del gas de escape por la rejilla de inyección 2050. Un soplador de aire diluyente 2080 aporta el aire ambiental 152 al mezclador 2070, mientras que un sub-sistema de almacenaje y de suministro de amoníaco 2060 aporta el amoníaco al mezclador 2070. El gas de escape, cargado del NOx, el amoníaco y el aire diluyente 2055 pasan al interior del reactor SCR 2002 y sobre el catalizador de SCR. El catalizador de SCR favorece la reducción del NOx con el amoníaco a nitrógeno y agua. El gas de escape 2008, que está libre del NOx, abandona el reactor SCR y sale de la planta a través de otros posibles sub-sistemas APC (no indicados aquí) así como por la chimenea 117.

Existen otros analizadores de NOx adicionales 2004 para la corriente 2008 del gas de escape, libre de NOx, la cual sale del reactor SCR 2002 o de la chimenea 117. El medido valor de salida del NOx 2111 es combinado con el medido valor de entrada del NOx 2112 para calcular la eficiencia de eliminación de NOx 2110. La eficiencia en la eliminación del NOx está definida como el porcentaje de la entrada del NOx, eliminado del gas de escape.

La calculada eficiencia de eliminación de NOx 2022 es introducida en el sistema de control reglamentario, que restablece el punto de ajuste de la velocidad de flujo de amoníaco 2021A con respecto al mezclador de amoníaco/aire diluyente 2070 y, finalmente, con respecto a la rejilla de inyección de amoníaco 2050.

## ES 2 311 234 T3

### *Controles en el proceso de SCR*

Un convencional sistema de control SCR está basado en el sistema de control en cascada, indicado en la Figura 20. El bucle de regulador interior PID 2010 es empleado para controlar el flujo de amoníaco 2014 al interior del mezclador 2070. El bucle de regulador exterior PID 2020 es usado para controlar las emisiones del NOx. El operario es responsable de introducir en el bucle exterior 2020 el punto de ajuste 2031 de la eficiencia de eliminación de emisión de NOx. Tal como indicado en la Figura 21, puede ser empleado un selector 2030 para poner una limitación superior 2032 en el punto de ajuste 2031, que ha sido introducido por el operario. Además, muchas veces es empleada una señal de avance de alimentación 2221 para la carga (no indicada en la Figura 21), de tal manera que el regulador pueda manejar adecuadamente las transiciones de carga. En estas implementaciones, un sensor de carga 2009 produce una carga medida 2809 del sistema de generación de energía 110. esta carga medida 2809 es transmitida hacia un regulador 2220, que genera la señal 2221. Esta señal 2221 es combinada con el punto de ajuste 2021A del flujo de amoníaco para formar un reajustado punto de ajuste 2021B del flujo de amoníaco, el cual es transmitido al regulador PID 2010. El regulador PID 2010 combina el punto de ajuste 2021B con un medido flujo de amoníaco 2012 para formar un punto de valor de salida VP de flujo de amoníaco 2011, que controla la cantidad de amoníaco, que es aportada al mezclador 2070.

Las ventajas de este regulador son las siguientes:

1. Regulador estándar: Es un sencillo diseño de regulador estándar, que es empleado para alcanzar los requisitos especificados por el fabricante de la unidad SCR así como por el vendedor del catalizador.

2. Regulador basado en el distribuido sistema de control (DCS): La estructura es relativamente sencilla; el mismo puede ser implementado en el sistema DCS de la unidad y representa la menos costosa opción para el control, que cumple los requisitos de funcionamiento del equipo y del catalizador.

### *Retos en cuanto al funcionamiento de la selectiva reducción catalítica SCR*

Hay una serie de parámetros, que afectan la operación de la SCR:

- Carga de NOx de entrada
- Relación molecular local de NOx: Amoniaco
- Temperatura del gas de escape; así como
- Calidad, disponibilidad y actividad del catalizador.

Los retos para el funcionamiento, relacionados con el esquema de control de la Figura 20, comprenden lo siguiente:

1. Medición del desplazamiento de amoníaco: Mantener el desplazamiento de amoníaco por debajo de una limitación específica es crítico para la operación de la SCR. No obstante, con mucha frecuencia no existe ningún cálculo ni una medición on-line del desplazamiento de amoníaco. Incluso al estar disponible una medición del desplazamiento de amoníaco, muchas veces no está la misma directamente incluida en el bucle de control. Por consiguiente, no es medida una de las variables más críticas para el funcionamiento de una SCR.

El objetivo de funcionamiento de la SCR consiste en conseguir el deseado nivel de la eliminación de NOx con un desplazamiento mínimo de amoníaco. Este “desplazamiento” del amoníaco queda definido como la cantidad de amoníaco que sin reaccionar está dentro de la corriente de gas de escape, libre del NOx. Si bien existe un costo económico relativamente reducido, que está asociado a la cantidad efectiva de amoníaco dentro del desplazamiento de amoníaco, hay, sin embargo, unos significativos impactos negativos que están relacionados con este desplazamiento:

- El amoníaco reacciona con el SO<sub>3</sub> dentro del gas de escape para formar una sal, que se deposita en las superficies de transmisión térmica del precalentador de aire. Esta sal no solamente reduce la transmisión térmica a través del precalentador de aire, sino la misma también atrae las cenizas, que reducen aún más la transmisión térmica. A un determinado punto, la transmisión térmica del precalentador de aire ha sido reducida hasta tal extremo, que el precalentador tenga que ser retirado del servicio a efectos de limpieza (lavado). El lavado del precalentador de aire supone, cuanto menos, una devaluación de la unidad.

- El amoníaco también es absorbido por el catalizador (el catalizador puede ser considerado como una esponja de amoníaco). Unas abruptas reducciones en la carga de gas de escape NOx puede tener por resultado un desplazamiento de amoníaco a un plano anormalmente corto. Se trata, concretamente, de una condición transitoria que está fuera del alcance de un típico sistema de control. Si bien es transitoria en su naturaleza, este desplazado amoníaco combina, sin embargo, todavía con el SO<sub>3</sub> y con la sal, depositada en el precalentador de aire, aunque sea por poco tiempo, y la dinámica momentánea puede formar de una manera significativa las capas de sal en el precalentador de aire (y favorecer así la atracción de cenizas volátiles).

## ES 2 311 234 T3

- El amoníaco está también definido como un contaminante del aire. Mientras que el desplazamiento del amoníaco es muy lento, el amoníaco es muy aromático, de tal modo que incluso unas cantidades de trazas pueden crear un problema de olores con las comunidades locales.

5 - El amoníaco es absorbido sobre las cenizas volátiles. Al hacerse demasiado grande la concentración de amoníaco sobre las cenizas volátiles, se puede producir un importante problema de costo, relacionado con el abandono de las cenizas volátiles.

2. Punto de ajuste de eficiencia en la eliminación del NOx: Sin una medición del desplazamiento de amoníaco, el punto de ajuste de eficiencia de la eliminación del NOx 2031 es muchas veces fijado de una manera conservadora por el operario/equipo de ingenieros para mantener el desplazamiento de amoníaco bien por debajo de la limitación del desplazamiento. Por elegir de forma conservadora un punto de ajuste para el NOx, el operario/ingeniero reduce la eficiencia de eliminación de la SCR en su conjunto. Este conservador punto de ajuste para la eficiencia de eliminación del NOx sí puede asegurar que no sea sobrepasada una limitación para el desplazamiento del amoníaco, pero el mismo también tiene por resultado que esta eficiencia sea más baja que como esto sería posible sí el sistema es operado en la cercanía de la limitación del desplazamiento de amoníaco.

3. Los efectos de la temperatura sobre la SCR: En un sistema de control de tipo estándar, no se produce ningún intento para controlar la temperatura del gas de entrada a la SCR. Por regla general, se encuentra dentro de unos límites aceptables algún método implementado para asegurar la temperatura del gas, impidiéndose normalmente la inyección de amoníaco al estar la temperatura por debajo de un límite mínimo. En la mayoría de los casos no se hace ningún intento para efectivamente controlar u optimizar la temperatura. Además, tampoco se efectúa ninguna variación en el punto de ajuste del NOx, la cual esté basada en la temperatura o en un perfil de la temperatura.

4. NOx y perfil de velocidad: Las operaciones de la caldera y de la tubería en su conjunto producen una distribución no-uniforme del NOx por la superficie de la SCR. Para conseguir un mínimo desplazamiento del amoníaco, la relación entre NOx y amoníaco tiene que ser controlada y, sin un mezclado uniforme, este control debe ser de tipo local para evitar puntos con un elevado desplazamiento de amoníaco. Lamentablemente, el perfil de la distribución del NOx está en función no solamente de la tubería, sino también de la operación de la caldera. De este modo, los cambios en el funcionamiento de la caldera tienen un impacto sobre la distribución del NOx. Los reguladores estándar no tienen en cuenta el hecho de que son raras veces uniformes o estáticos los perfiles de la velocidad y de la entrada del NOx a la SCR. Esto tiene por consecuencia una inyección excesiva del reactivo en algunas partes de la sección transversal de la tubería, con el fin de asegurar el adecuado reactivo en otras zonas. Con ello se produce un incrementado desplazamiento de amoníaco para una eficiencia de eliminación de NOx dada. También aquí es así, que el operario/equipo de ingenieros responden muchas veces a una mala distribución con bajar el punto de ajuste del NOx. Ha de tenerse en cuenta que los analizadores de entrada y salida del NOx, 2003 y 2004, pueden ser unos analizadores individuales o pueden constituir alguna forma de conjunto de analizadores colocados en alineación entre si. Aparte de la concentración media del NOx, una multitud de valores de análisis también podría proporcionar una información sobre el perfil de distribución del NOx. Para aprovechar la adicional información sobre la distribución del NOx, sería necesaria una multitud de reguladores 2010 del flujo del amoníaco, con alguna inteligencia para distribuir dinámicamente todo el flujo del amoníaco entre las distintas regiones de la rejilla de inyección, de tal modo que el flujo del amoníaco pueda coincidir más estrechamente con las concentraciones locales del NOx.

5. Control dinámico: El regulador estándar también falla en proporcionar un efectivo control dinámico. Esto quiere decir que, al cambiar las condiciones de entrada a la SCR - lo cual requiere una modulación de la velocidad de inyección del amoníaco - es improbable que el control de retroalimentación de la eficiencia de eliminación del NOx sea capaz de impedir unas importantes desviaciones en esta variable del proceso. Los rápidos cambios transitorios en la carga y los retrasos en el tiempo del proceso representan unos acontecimientos dinámicos, que pueden producir unas significativas desviaciones en el proceso.

6. Decaimiento del catalizador: El catalizador decae con el tiempo, reduciendo la eficiencia de eliminación de la SCR y aumentando el desplazamiento del amoníaco. El sistema de control tiene que tener en consideración esta degradación con el fin de incrementar al máximo la tasa de eliminación del NOx.

7. Emisiones medias rotativas: Muchas reglamentaciones sobre emisiones permiten prever tanto unos límites de emisiones instantáneas como asimismo los límites para alguna forma de las emisiones medias rotativas. Para permitir unas desviaciones dinámicas en el proceso, el límite de las emisiones instantáneas es más elevado que el límite para las emisiones medias rotativas; una operación continuada al límite de las emisiones instantáneas podría resultar en una violación del límite de las emisiones medias rotativas. El límite para las emisiones medias rotativas es el valor medio de las emisiones instantáneas dentro de una ventana de tiempo móvil o rotativa. Esta ventana de tiempo puede ser tan corta como una hora, al igual que de larga como un año. Algunas típicas ventanas de tiempo abarcan una hora, tres horas, 24 horas, un mes así como un año. En el regulador estándar no está contemplado, sin embargo, un control automático de los valores medios rotativos. La mayoría de los permisos de emisión de NOx se remontan a unos regionales límites de ocho horas para la concentración media rotativa de NOx en el aire ambiental.

Para la reducción SCR, los operarios fijan normalmente un deseado punto de ajuste 2031 para la eficiencia de eliminación del NOx, pero ellos efectúan unos ajustes de menor importancia basados en una poca frecuente información de muestras de las cenizas volátiles. Se realizan pocos esfuerzos para mejorar el control dinámico de la reducción

## ES 2 311 234 T3

SCR durante los cambios transitorios de la carga o para optimizar la operación de la SCR. Seleccionar los óptimos valores instantáneos y, al ser posible, la eficiencia de eliminación de NOx de tipo medio rotativo constituyen también un problema elusivo y cambiante en relación con el comercio, la reglamentación, los créditos de emisiones y con el proceso; problemas éstos que son similares a los problemas asociados a un funcionamiento óptimo de la desulfuración WFGD.

Otros procesos de control de contaminación de aire (APC) tienen problemas relacionados con:

- Controlar/optimizar la operación dinámica del proceso;
- Control de la calidad del sub-producto/producto adicional;
- Control de las emisiones de tipo medio rotativo; así como
- Optimización de las ventajas del control de contaminación de aire.

Estos problemas son, en los otros procesos, similares a los problemas detallados en la anteriormente relacionada descripción de la desulfuración WFGD y de la reducción SCR.

### 20 Breve resumen de la invención

De acuerdo con la presente invención, un regulador de varios niveles dirige la operación de un sistema - como, por ejemplo, un sistema de control de contaminación de aire (APC) o un sistema de otro tipo - para llevar a efecto un proceso. Este proceso comprende múltiples parámetros de proceso (MPPs), siendo por lo menos uno de los parámetros un parámetro de proceso controlable (CTPP) y siendo uno de estos parámetros un parámetro de proceso de referencia o de objetivo (TPP). Por ejemplo, los múltiples parámetros de proceso pueden comprender el valor pH de un lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a una torre de absorción; una cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportada a un cristizador; como asimismo pueden comprender una cantidad del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual está siendo extraído de un sistema de desulfuración de gases de escape húmedos (WFGD).

El proceso comprende, asimismo, un definido valor de referencia o de objetivo (DTV) que representa un primer límite, que puede constituir una limitación explícita o un objetivo o una referencia para un actual valor medio (AAV) del parámetro de proceso de referencia (TPP) por un definido periodo de tiempo con la duración  $T_{PL_{AAV2}}$ . Por ejemplo, el definido valor de referencia (DTV) puede ser una limitación reglamentaria del actual valor medio (AAV) de un parámetro de proceso de referencia (TPP), de tal modo que la cantidad del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape esté siendo extraída de un sistema WFGD por un definido periodo de tiempo como, por ejemplo, de doce horas, de 1 día, de 30 días, de 3 meses o de un año. El actual valor medio (AAV) es computado basado en unos valores actuales (AV) del parámetro de proceso de referencia (TPP) durante el definido periodo. Muchas veces, los valores actuales (AV) serán unos valores medidos con una definida frecuencia. En algunas implementaciones, sin embargo, puede ser preferible computar los valores medios del parámetro de proceso de referencia en base a otros datos medidos del proceso, por ejemplo. Por regla general, los actuales valores medios del parámetro de proceso de referencia serán computados - durante el definido periodo de tiempo - en base a unos valores medios por fuera del regulador de varios niveles.

Un primer regulador lógico - al que algunas veces se hace referencia como regulador superior o regulador de nivel 2 y el cual puede tener la forma de un ordenador personal (PC) o de otro tipo cualquiera de dispositivo computador - comprende una lógica, es decir, un software programable o bien otro tipo de lógica programada para pronosticar los futuros valores medios (FAVs) del parámetro de proceso de referencia (TPP) dentro de un primer periodo de tiempo futuro (FFTP), que por lo menos tiene una duración  $T_{PL_{AAV2}}$  y que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV2}$ . Al tiempo  $T_{AAV2}$  o antes del mismo, el proceso pasará a un estado estable. Los futuros valores medios (FAV) son pronosticados sobre la base de: (i) los actuales valores medios (AAV) del parámetro de proceso de referencia (TPP), es decir, los actuales valores medios del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual es extraído de un sistema de WFGD varias veces por un primer periodo de tiempo anterior (FFTP), que tiene una duración de por lo menos  $T_{PL_{AAV2}}$  y que se extiende desde un tiempo previo de  $T_{-AAV2}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) los valores actuales de los múltiples parámetros de proceso (MPP) como, por ejemplo, el actual valor pH del lodo de piedra caliza que está siendo aportado al absorbedor de la WFGD; la actual distribución del lodo de piedra caliza, que es aportado al absorbedor de WFGD, es decir, la actual alineación de las bombas del lodo; la cantidad actual del aire de oxidación, que está siendo aportado a un cristizador del sistema WFGD; y/o la cantidad actual del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual está siendo extraído mediante un sistema de WFGD; así como sobre la base de (iii) el definido valor de referencia (DTV), es decir, el límite reglamentario del actual valor medio (AAV) de la cantidad de SO<sub>2</sub> extraída durante  $T_{PL_{AAV2}}$ .

Por consiguiente, el primer regulador lógico retrocede a los previos valores actuales medios (AAV) del parámetro de proceso de referencia durante el primer periodo de tiempo anterior (FFTP), y el mismo emplea estos AAVs así como los valores actuales de los múltiples parámetros de proceso (MPP) para inicialmente pronosticar los futuros valores medios (FAV) del parámetro de proceso de referencia (TPP) para un primer periodo de tiempo futuro (FFTP). Por regla general, los pronosticados FAVs representan un camino pronosticado del parámetro de proceso de referencia (TPP) durante un primer periodo de tiempo futuro (FFTP). De una manera conveniente, los datos históricos, que representan los AAVs del TPP durante el tiempo FTPT, están guardados dentro de un medio de almacenamiento como puede ser,

## ES 2 311 234 T3

por ejemplo, un medio eléctrico, óptico o de cualquier otro tipo, con el fin de poder ser recuperados por el primer regulador lógico. De esta manera, los AAVs del TPP y por el tiempo FFTP pueden ser computados de los valores medios AVs, ubicados por fuera del regulador.

5 El primer regulador lógico trata los FAVs, inicialmente pronosticados, como unos parámetros controlables del proceso, y el mismo ajusta los inicialmente pronosticados FAVs sobre la base del definido valor de referencia (DTV). El valor ajustado puede ser considerado como los FAVs finalmente pronosticados. De forma preferente, los FAVs pronosticados para el primer periodo de tiempo futuro (FFTP) son ajustados de tal manera, que todos los FAVs para el tiempo FFTP puedan cumplir - conforme al pronóstico - con el definido valor de referencia (DTV). Con frecuencia son  
10 ajustados todos o la mayor parte de los FAVs pronosticados. En determinados casos puede ser ajustado, sin embargo, solamente un número limitado de los FAVs pronosticados. También ha de tenerse en cuenta que el primer regulador lógico puede ajustar los pronosticados FAVs de tal manera, que todos los FAVs ajustados o solamente algunos de los FAVs pronosticados cumplan con el DP/ o bien de tal manera, que solamente los pronosticados y ajustados FAV cumplan, al término de FFTP, con el definido valor de referencia (DTV).

15 Un segundo regulador lógico - al que algunas veces se hace referencia como regulador inferior o regulador de nivel 1 y el cual también puede tener la forma de un ordenador personal (PC) o de cualquier otro tipo de dispositivo computador - comprende una lógica para establecer un ulterior valor de referencia (FTV), que representa una segunda limitación para el actual valor medio (AAV) del parámetro de proceso de referencia (TPP), es decir, para el actual valor medio del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual es extraído del sistema de WFGD, para un segundo periodo de tiempo futuro (SFTP). Este periodo SFTP es de una duración igual a  $T_{PL_{AAV1}}$ , que es menor que la duración  $T_{PL_{AAV2}}$ , y el mismo se extiende del tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV1}$ . Quiere decir esto, que el periodo SFTP es más corto que el periodo FFTP. Ha de tenerse presente que el proceso podría alcanzar el estado estable al término o antes de terminar el periodo SFTP, es decir, dentro del mismo, si bien esto no es obligatorio.

25 El ulterior valor de referencia (FTV) queda establecido sobre la base de uno o de varios pronosticados FAVs ajustados del parámetro TPP durante el periodo FFTP. De forma preferente, el FTV es fijado en base a aquellos pronosticados y ajustados FAVs, los cuales corresponden a los tiempos que comienzan en el tiempo actual  $T_0$  y que finalizan en el tiempo futuro  $T_{AAV1}$ . Quiere decir esto, que el segundo regulador lógico preferentemente establece el  
30 FTV basado en los ajustados FAVs del parámetro TPP, los cuales han sido pronosticados por el primer regulador lógico para el segundo periodo de tiempo futuro (SFTP). Al ser deseado, sin embargo, el ajustado FAV pronosticado para el parámetro TPP y para el tiempo futuro  $T_{AAV1}$  - es decir, al final del acertado periodo de tiempo  $T_{PL_{AAV1}}$  o para cualquier otro tiempo discreto - podría ser empleado para establecer el ulterior valor de referencia (FTV).

35 El segundo regulador lógico también comprende una lógica para determinar un punto de ajuste de referencia para cada parámetro de proceso controlable (CTPP), es decir, el punto de ajuste de referencia para el nivel de pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de la desulfuración WFGD; para la distribución del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de la WFGD, y/o para la cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportada a un cristalizador de la WFGD, y esto sobre la base de: (i) Los actuales valores medios (AAV) del parámetro TPP, es decir, los AAVs del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual es extraído de un sistema de WFGD a distintos  
40 tiempos durante un segundo periodo de tiempo futuro (SFTP), que tiene la duración de  $T_{PL_{AAV1}}$  y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-AAV1}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) Los valores actuales de los múltiples parámetros de proceso (MPP) como, por ejemplo, el actual nivel pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de WFGD; la actual distribución del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de WFGD; la actual cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportado a un cristalizador de la WFGD; y/o la actual cantidad del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual está siendo extraído por un sistema de WFGD; así como (iii) El ulterior valor de referencia (FTV). Este segundo regulador lógico comprende, además, una lógica para dirigir el control de cada parámetro de proceso controlable (CTPP), en conformidad con el determinado punto de ajuste de referencia para este CTPP.

50 De una manera conveniente, el segundo regulador lógico comprende, asimismo, otra lógica para pronosticar los FAVs del parámetro TPP durante el periodo SFTP, y esto sobre la base de: (i) Los actuales valores de los múltiples parámetros de proceso (MPP) así como (ii) el ulterior valor de referencia (FTV). De este modo, el punto de ajuste de referencia para cada CTPP puede ser determinado sobre la base de los pronosticados FAVs del parámetro TPP y para el periodo SFTP, es decir, basado sobre el efecto, que el determinado punto de ajuste de referencia tendrá sobre los  
55 FAVs pronosticados.

Para el segundo regulador lógico también puede ser conveniente disponer de una lógica adicional para pronosticar los FAVs del parámetro TPP, es decir, los FAVs del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual es extraído de un sistema de WFGD, a distintos tiempos durante el segundo periodo de tiempo futuro (SFTP), y esto sobre la base de: (i) Los AAVs del parámetro TPP, es decir, de los AAVs del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual es extraído de un sistema de WFGD, a distintos tiempos durante el periodo (SFTP); (ii) Los valores actuales de los MPPs, es decir, el actual nivel pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de WFGD; la actual distribución del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor WFGD; la actual cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportada a un cristalizador de la WFGD; y/o la cantidad actual del SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape, el cual está  
65 siendo extraído por un sistema de WFGD; así como (iii) el determinado punto de ajuste de referencia para cada CTPP. Quiere decir esto, que el segundo regulador lógico también puede pronosticar el camino de los futuros valores medios del parámetro de referencia TPP, es decir, el SO<sub>2</sub> dentro del gas de escape despedido, en base al determinado punto de ajuste de referencia para cada CTPP.

## ES 2 311 234 T3

La presente invención es particularmente útil para las implementaciones en las que con el definido valor de referencia ha de cumplir una pluralidad de maniobras como, por ejemplo, los movimientos rotativos y los periodos de tiempo (MPTs), de los cuales cada uno tiene la misma duración, pero un distinto tiempo de comienzo así como un distinto tiempo de finalización, siendo el tiempo de finalización de cada MTP en el tiempo actual o después del mismo. En este caso, el primer regulador lógico ajustará, de una manera conveniente, los pronosticados FAVs para el periodo FFTP, mientras que el segundo regulador lógico determinará el punto de ajuste de referencia para cada CTPP, de tal modo que el AAV del TPP para cada uno de los MTPs podrá cumplir con el DTV.

De forma preferente, un dispositivo de introducción como, por ejemplo, un ratón, un teclado o una puerta de entrada pueden ser empleados para introducir - en el momento actual  $T_0$  o antes - un acontecimiento, que ha de tener lugar en el tiempo actual  $T_0$  o antes. Puede ser programado que un tal acontecimiento comience en un momento, que está dentro o fuera del periodo FFTP y/o del periodo SFTP. Este acontecimiento podría ser, por ejemplo, indicativo de una variación en por lo menos uno de los múltiples parámetros de proceso (MPP) como, por ejemplo, en una carga para el sistema como puede ser una variación en la cantidad del gas de escape húmedo, que está cargado del  $SO_2$  y que está siendo aportado a un sistema de WFGD, o en por lo menos un parámetro no directamente relacionado con el propio proceso (non-process parameter), pero asociado al funcionamiento del sistema para realizar el proceso como pueden ser, por ejemplo, el costo de la energía eléctrica, el valor de créditos de emisiones y/o el valor de un sub-producto del proceso, como, por ejemplo, el yeso producido por el proceso de la desulfuración WFGD. En este caso, el primer regulador lógico también dispondrá, de una manera conveniente, de otra lógica más para pronosticar los FAVs del parámetro TPP - como, por ejemplo, los FAVs del  $SO_2$  dentro del gas de escape, que será despedido por un sistema de WFGD - para el periodo FFTP y esto basado, asimismo, en el acontecimiento introducido. De un modo beneficioso, este segundo regulador lógico también tendrá otra lógica más para determinar, si procede, el punto de ajuste de referencia para cada CTPP, es decir, el punto de ajuste de referencia para el nivel de pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de la WFGD; para la distribución del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado a un absorbedor de WFGD; y/o para la cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportada a un cristizador de WFGD, todo ello también basado en el acontecimiento introducido.

De forma preferente, el regulador también puede comprender o un modelo de proceso de red neuronal o un modelo de proceso no-neuronal. En este caso, el primer regulador lógico - y, dado el caso, también el segundo regulador lógico - pronosticará los FAVs del parámetro de referencia TPP, mientras que el segundo regulador lógico determinará, de acuerdo con el modelo del proceso, el punto de ajuste de referencia para cada CTPP. Cualquiera que sea el modelo utilizado, el mismo representará la relación entre el parámetro TPP, es decir, la cantidad del  $SO_2$  en el gas de escape desulfurado y despedido por el sistema de WFGD - y por lo menos un CTPP como, por ejemplo, uno o varios de los parámetros correspondientes al valor pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado; un parámetro correspondiente a la distribución del lodo de piedra caliza, que está siendo aportado; así como un parámetro correspondiente a la cantidad de aire de oxidación, que está siendo aportada a un sistema de WFGD. Ha de tenerse en cuenta, asimismo, que el modelo empleado puede comprender un primer modelo de principio, un modelo híbrido o un modelo regresivo.

En términos de práctica, la presente invención está constituida por dos reguladores de proceso multi-variable por pronóstico (MPC), puestos en cascada entre sí. El regulador MPC de nivel inferior - o regulador de fase inferior (LTMPC) - controla el proceso e incluye un adicional parámetro múltiple de proceso (MPP) que para el parámetro de referencia TPP representa un actual valor medio (AAV) a corto plazo. En este regulador inferior, la ventana de tiempo rotativo o el periodo del AAV son más reducidos o bien son iguales al Tss del proceso, que está siendo controlado por el regulador inferior.

El regulador MPC de nivel superior - o regulador de fase superior (UTMPC) - tiene un Tss, que es mayor o igual al periodo de tiempo asociado a la ventana de valor medio rotativo del parámetro TPP. Si el definido valor de referencia (DTV) es, por ejemplo, un valor medio rotativo de 30 días, el Tss del regulador UTMPC sería mayor o igual a esta ventana de 30 días, asociado al parámetro TPP. El regulador UTMPC comprende un DTV para el parámetro TPP, el cual es computado por la ventana de tiempo del TPP,  $T_{\text{target(referencia)}}$ . En todos los casos, el Tss del regulador UTMPC será igual a la ventana de valor medio rotativo del TPP o estará basado en la misma, habida cuenta de que la finalidad principal del UTMPC consiste en controlar el valor medio rotativo a largo plazo; en este caso, "a largo plazo" es definido como el plazo más largo que el tiempo de respuesta del proceso en cuestión. Por consiguiente, disponemos de una aproximación de dos reguladores MPC de dos niveles así como del uso del nivel superior para facilitar un control explícito a largo plazo para un valor medio rotativo, combinado con una especificación para la regulación o el reglaje.

Además, el regulador UTMPC comprende un apropiado conjunto de múltiples parámetros de proceso (MPP), uno de los cuales será empleado como referencia u objetivo, por ejemplo, el FTV para el actual valor medido (AAV) del parámetro TPP por parte del regulador LTMPC. Los modelos del proceso y la lógica dentro del regulador UTMPC ponen el AAV/Tss del parámetro TPP en relación con el AAV/ $T_{\text{target}}$  del parámetro TPP. El regulador UTMPC controla el AAV/ $T_{\text{target}}$  del parámetro TPP por ajustar el AAV/Tss del parámetro TPP y por transmitir estos ajustes al regulador LTMPC como límites, es decir, como limitaciones para este regulador.

Ambos reguladores retroceden a por lo menos una completa ventana de tiempo de valores medios rotativos para pronosticar los futuros valores medios para los parámetros TPP durante los tiempos de estado estacionario de los reguladores; a corto plazo en el regulador LTMPC y a largo plazo en el regulador UTMPC. Los pronósticos consisten en un vector o en una multitud de valores futuros.

## ES 2 311 234 T3

Un control explícito de los AAVs es conseguido por enfocar los reguladores MPC para controlar la completa multitud de futuros valores como, por ejemplo, los FAVs para los TPPs, de tal manera que los valores sean menores o mayores que el deseado valor de referencia, DTV.

5 En su forma más sencilla, el regulador UTMPC ajusta los actuales límites/limitaciones en el TPP/AAV dentro del regulador LTMPC. Esta configuración proporcionará un apropiado control de valores medios rotativos. Algunos sistemas de reguladores de procesos multivariables (MPC) permiten la carga de vectores o de una multitud de futuros valores para establecer límites como, por ejemplo, unas limitaciones. En este caso, no solamente la actual maniobra para el regulador UTMPC, sino la parte completa del plan de maniobra, desde el tiempo actual  $T_0$  hasta el tiempo de proceso  $T_{\text{process}}$  ( $T_{ss}$  para el regulador LTMPC), incluyendo el valor actual y los futuros valores, son descargadas del regulador UTMPC al apropiado vector de límite futuro dentro del regulador LTMPC. Al estar prevista y utilizada esta funcionalidad en la herramienta MPC, la prestación del control quedará mejorada, habida cuenta de que el regulador LTMPC puede estar ahora en mejores condiciones para planificar las actuales y las futuras acciones de control.

### 15 Breve descripción de los planos

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques, que facilita la vista sinóptica de un convencional sub-sistema para la desulfuración de gases de escape húmedos (WFGD);

20 La Figura 2 indica más detalles de algunos aspectos del sub-sistema de WFGD, indicado en la Figura 1;

La Figura 3 muestra aún más detalles de otros aspectos del sub-sistema de WFGD, indicado en la Figura 1;

25 La Figura 4 representa un gráfico de la eficiencia de eliminación de  $\text{SO}_2$  en relación con la pureza de yeso como función del valor pH;

La Figura 5A indica una caja de limitación de WFGD, con la realización del proceso de la WFGD dentro de una zona confortable para ello;

30 La Figura 5B muestra la caja de limitación de WFGD de la Figura 5A, con una optimizada realización del proceso de WFGD, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 6 representa un diagrama de bloques funcionales de un ejemplo de la estructura de control MPC, de acuerdo con la presente invención;

35 La Figura 7 indica las partes componentes de un ejemplo de un regulador MPC así como un estimador, apropiado para su empleo en la estructura de la Figura 6;

40 La Figura 8 muestra detalles de la unidad de procesamiento y del disco de memoria del regulador MPC indicado en la Figura 7, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 9 representa un diagrama de bloques funcionales del estimador incorporado en el regulador MPC, detallado en la Figura 8;

45 La Figura 10 indica la estructura de un regulador MPCC de fases múltiples, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 11A muestra la pantalla de contacto hombre/máquina, que tiene un regulador de fases múltiples MPC para el usuario, de acuerdo con la presente invención;

50 La Figura 11B indica otra pantalla de contacto hombre/máquina, que tiene un regulador de fases múltiples MPC para el repaso, la modificación y/o la adición de paradas planificadas, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 12 representa una vista ampliada de la estructura del regulador de fases múltiples MPCC de la Figura 10, de acuerdo con la presente invención;

55 La Figura 13 muestra un diagrama de bloques funcionales del punto de contacto hombre/máquina de un regulador MPCC, que lleva incorporado un estimador y con el distribuido sistema de control (DCS) para el proceso de la WFGD, de acuerdo con la presente invención;

60 La Figura 14A indica una pantalla del DCS para monitorizar el control del MPCC, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 14B muestra otra pantalla del DCS para introducir datos de laboratorio y/u otros datos, de acuerdo con la presente invención;

65 La Figura 15A indica un sub-sistema de WFGD con el conjunto de las operaciones del sub-sistema, controladas por un regulador MPCC, de acuerdo con la presente invención;

## ES 2 311 234 T3

La Figura 15B muestra el regulador MPCC, que controla el sub-sistema de WFGD indicado en la Figura 15A y de acuerdo con la presente invención;

5 La Figura 16 indica más detalles de ciertos aspectos del sub-sistema de WFGD indicado en la Figura 15A, de acuerdo con la presente invención; detalles éstos que corresponden a los detalles indicados en la Figura 2;

La Figura 17 muestra aún más detalles de otros aspectos del sub-sistema de WFGD indicado en la Figura 15A, de acuerdo con la presente invención; detalles éstos que corresponden a los detalles indicados en la Figura 3;

10 La Figura 18 indica más detalles de todavía otros aspectos del sub-sistema de WFGD indicado en la Figura 15A y de acuerdo con la presente invención;

La Figura 19 muestra más detalles de aspectos del regulador MPCC indicado en la Figura 15B y de acuerdo con la presente invención;

15 La Figura 20 representa un diagrama de bloques, que indica la vista sinóptica de una típica unidad de selectiva reducción catalítica (SCR);

20 La Figura 21 indica un convencional esquema de control de procesos del sub-sistema de la reducción catalítica selectiva (SCR);

La Figura 22 muestra detalles de la unidad de procesamiento y del disco de memoria del regulador MPC, de acuerdo con la presente invención;

25 La Figura 23A indica un sub-sistema de SCR con el conjunto de las operaciones del sub-sistema, controlada por un regulador MPCC, de acuerdo con la presente invención;

La Figura 23B muestra detalles de otros aspectos del regulador MPCC, indicado en la Figura 23A y de acuerdo con la presente invención.

30

### **Descripción detallada de preferidas formas de realización de la invención**

35 Tal como se ha puesto de manifiesto, la efectiva y eficiente operación de la desulfuración WFGD y de similares sub-sistemas es ahora más compleja que nunca. Además, es probable que esta complejidad continúe para incrementar en los años venideros con adicionales presiones de competitividad y con una adicional regulación en materia de medioambiente. Las convencionales estrategias y técnicas del control de procesos no están en condiciones de manejar estas complejidades y, por consiguiente, las mismas son incapaces de conseguir un óptimo control de las operaciones de esta clase.

40 En un entorno comercial, que es cambiado dinámicamente en el transcurso de la vida operativa útil de un sub-sistema, es necesario aumentar al máximo, en cualquier momento dado, el valor comercial de las operaciones del sub-sistema. Esta ventajosa optimización puede estar basada en factores, que no están contemplados siquiera en una convencional estrategia del control de procesos. Por ejemplo, en un entorno comercial en el cual existe un mercado para negociar los créditos de emisiones, una eficiente operación del sub-sistema puede facilitar la concesión de adicionales créditos de emisiones para ser vendidos con el fin de aumentar así al máximo el valor del sub-sistema, y esto a pesar de los adicionales costos de operación, que se pueden presentar para conseguir estos créditos.

45 Por consiguiente, en lugar de una sencilla estrategia para aumentar al máximo la absorción del SO<sub>2</sub>, con el fin de reducir al mínimo los costos de operación y para cumplir las especificaciones de calidad del sub-producto, una estrategia más compleja puede ser empleada para optimizar las operaciones de un sub-sistema, sin tomar en consideración si la absorción del SO<sub>2</sub> es aumentar al máximo o no, si los costos de operación son reducidos al mínimo o si son cumplidas las especificaciones de calidad del sub-producto. Además, no solamente pueden ser proporcionadas unas herramientas para perfeccionar sustancialmente el control del sub-sistema para conseguir, por ejemplo, un mejorado control completamente automatizado del sub-sistema. De esta manera, las operaciones pueden ser automatizadas y optimizadas, no solamente en cuanto a los parámetros de funcionamiento y con respecto a las limitaciones, sino también en relación con los aspectos comerciales. El sub-sistema puede ser controlado automáticamente para trabajar muy estrechamente al nivel de los permisos administrativos o incluso exactamente al mismo nivel si el valor de mercado de los generados créditos de emisiones es inferior al adicional costo de operación del sub-sistema para generar estos créditos. Sin embargo, el sub-sistema también puede ser controlado automáticamente para regular las operaciones con el fin de trabajar por debajo del nivel de los permisos administrativos, y generar con ello unos créditos de emisiones adicionales, si el valor de mercado de los generados créditos es mayor que el adicional costo de operación del sub-sistema para generar estos créditos. En efecto, el control automatizado puede dirigir el sub-sistema a trabajar con el fin de eliminar tanto SO<sub>2</sub> como sea posible y hasta el valor marginal en dinero, es decir, hasta que el valor de los créditos de emisiones equilibre los costos del procesamiento para generar los créditos.

65 Como resumen, la optimizada operación de la desulfuración WFGD y de los sub-sistemas similares requiere unas consideraciones, no solamente sobre los complejos factores del proceso y de las regulaciones oficiales, sino también sobre factores complejos en cuanto a los aspectos comerciales, al igual que sobre los cambios dinámicos en estos

distintos tipos de factores. La optimización puede exigir tener en cuenta los factores comerciales que son de tipo local como, por ejemplo, si una de las múltiples unidades de procesamiento de WFGD es quitada del servicio y/o, a escala regional, al ser quitada del servicio la unidad de procesamiento de WFGD de otra compañía, que trabaja en la misma región, o esto incluso a escala mundial. En cuanto a la optimización de las operaciones, también necesitan ser tenidos  
5 en cuenta los precios de un mercado de una amplia y dinámica variación para, por ejemplo, los créditos de emisiones de SO<sub>2</sub>, a largo y a corto plazo.

Por consiguiente, los controles deberían preferentemente ser capaces de ajustar las operaciones para reducir al  
10 mínimo las emisiones de SO<sub>2</sub>, sujetas a los permisos administrativos, o para aumentar al máximo la eliminación del SO<sub>2</sub>. La capacidad de llevar a efecto estos ajustes le permitirán al propietario sacar ventaja de los cambios dinámicos en el valor de los créditos oficiales y obtener créditos con un sub-sistema, evitando así una operación de otro de sus sub-sistemas sin permiso o bien aprovechar la necesidad de otro propietario de un sub-sistema de tener que comprar los créditos de emisiones para evitar una operación de su sub-sistema sin permiso. Además, estos controles deberían preferentemente ser capaces de reajustar las operaciones, tan pronto que la generación de otros créditos de emisiones  
15 ya no resulte atractiva. Expresado de otra manera, el sistema de control debería optimizar constantemente la operación del ventajoso sistema de control de aire (APC), que se encuentra sometido a las limitaciones impuestas por el equipo, los procesos, las regulaciones administrativas y por los aspectos comerciales.

Cuando no exista ningún incentivo para sobrepasar el requerido nivel de pureza para el sub-producto del yeso, los  
20 controles deberían con preferencia facilitar una optimización de las operaciones para hacer coincidir la calidad del sub-producto del yeso con la especificación de calidad del yeso o con otras limitaciones para su venta. Un control optimizado debería facilitar, asimismo, impedir la obstrucción de la piedra caliza por anticipar y dirigir las acciones para regular el nivel de oxígeno O<sub>2</sub> de acuerdo con el deseado nivel de absorción del SO<sub>2</sub> y con las necesidades para la producción del yeso.

Tal como anteriormente mencionado, el control de las emisiones a un valor medio rotativo constituye un problema  
25 complejo. Esto es debido, por lo menos en parte, al hecho de que la ventana de tiempo para el valor medio rotativo avanza constantemente y de que en cualquier momento dado está activa una multitud de ventanas de tiempo. Normalmente, unas ventanas activas se extienden desde un tiempo dado hasta los tiempos del pasado, mientras que otras ventanas activas se extienden de un tiempo dado hasta los tiempos futuros.

El manejo de las emisiones de tipo medio rotativo requiere la integración de todas las emisiones durante la ventana  
30 de tiempo del valor medio rotativo. Por lo tanto, la optimización de las emisiones con respecto a un objetivo de valor medio rotativo, supone que sea fijado un objetivo de emisiones instantáneas, que tiene en consideración tanto las efectivas emisiones del pasado como asimismo las pronosticadas emisiones futuras o los planes de operación, y esto para todas las ventanas de tiempo "activas".

A título de ejemplo, la optimización de un valor medio rotativo de cuatro horas exige controlar una multitud de  
40 ventanas de tiempo, la primera de las cuales comienza 3 horas y 59 minutos en el pasado y finaliza en el tiempo actual, mientras que la última de las ventanas comienza en el tiempo actual y finaliza a las cuatro horas en el futuro. Ha de tenerse presente que, con una "resolución" de un minuto por cada ventana de tiempo, la optimización de este valor medio rotativo relativamente corto de 4 horas podría implicar establecer un objetivo para las emisiones instantáneas, el cual ha de satisfacer las limitaciones de 479 ventanas de tiempo.

La determinación del objetivo de emisiones de tipo medio rotativo para una individual ventana de tiempo integrada  
45 implica calcular, en primer lugar, el total de las emisiones del pasado dentro de la integrada ventana de tiempo y luego pronosticar, por ejemplo, la tasa de las futuras emisiones para el remanente de esta individual ventana de tiempo integrada, lo cual tendrá como resultado unas emisiones medias durante esta concreta ventana de tiempo integrada, las cuales están al límite del valor medio rotativo o están por debajo del mismo. Las emisiones futuras comienzan en el  
50 tiempo actual. Con el objeto de ser exacto, sin embargo, las futuras emisiones también han de incluir un pronóstico de las emisiones de operaciones, que se van a efectuar durante el tiempo remanente de la individual ventana de tiempo integrada.

Es evidente que, cuanto más larga sea la ventana de tiempo, tanto más difícil será pronosticar las emisiones futuras.  
55 Por ejemplo, las emisiones procedentes de operaciones durante las próximas horas pueden ser pronosticadas de una manera bastante exacta, pero es mucho más difícil pronosticar las emisiones procedentes de operaciones a efectuar durante los próximos once meses, habida cuenta de que tienen que ser tenidos en consideración ciertos factores como, por ejemplo, el cambio de la estación y las paradas programadas. Además, puede ser necesario añadir un margen de seguridad para las paradas no programadas o para las limitaciones de capacidad, impuestas al sub-sistema.

Por consiguiente, para optimizar el proceso de WFGD - como, por ejemplo, para reducir al mínimo los costos  
60 de operación y/o aumentar al máximo la eliminación del SO<sub>2</sub>, y mantener al mismo tiempo el proceso dentro de las limitaciones de las operaciones - los óptimos puntos de ajuste del proceso de WFGD han de ser determinados de una forma automática.

En las formas de realización de la presente invención, las cuales están detalladamente descritas a continuación, se  
65 ha empleado una aproximación del control multi-variable por pronóstico (MPC), la que está basada en un modelo para proporcionar un óptimo control del proceso de la WFGD. Por regla general, la tecnología de MPC facilita un control

## ES 2 311 234 T3

dinámico de los procesos, el cual es de unas entradas y salidas múltiples. Por las personas familiarizadas con este ramo técnico es sabido que la tecnología MPC había sido desarrollada primitivamente en la segunda mitad de los años 70. Hasta hoy en día, sin embargo, se siguen produciendo innovaciones técnicas en este campo. La tecnología MPC abarca toda una serie de técnicas o métodos de control, que se basan en modelos. Estos métodos le permiten al ingeniero de técnica de regulación resolver los dinámicos y complejos procesos de interacción con una mayor eficacia como esto era posible mediante los convencionales sistemas de control PID de retroalimentación. Las técnicas de control multi-variable por pronóstico (MPC) son capaces de controlar tanto los procesos lineares como los procesos no-lineares.

Todos los sistemas de MPC emplean explícitamente unos modelos dinámicos para pronosticar el comportamiento del proceso en el futuro. A este efecto, una específica acción de control es calculada para reducir al mínimo una función de objetivo o de referencia. Es implementado, finalmente, un horizonte de retroceso por lo que, con cada incremento del tiempo, el horizonte es desplazado por un incremento hacia el futuro. Asimismo, con cada incremento es llevada a efecto la aplicación de la primera señal de control, correspondiente a la acción de control de la secuencia, calculada en esta fase. Para el ingeniero de técnica de regulación están disponibles toda una serie de programas comercializados como, por ejemplo, el Generalized Predictive Control (GPC) o control general por pronóstico, El Dynamic Matrix Control (DMC) o control dinámico de matrices, y el Pegasus "Power Perfecter" o perfeccionador de energía Pegaso. Los autores Comancho y Bordons facilitan un excelente resumen sobre el tema del control MPC en su publicación "Model Predictive Control" (control por pronóstico y modelo), Editorial Springer-Verlag London Ltd., 1999, mientras que la publicación de Lennart Ljung "System Identification, Theory of the User" (Identificación de sistemas, teoría para el usuario), Editorial Prentice-Hall, Inc., Segunda Edición, 1999, representa el trabajo clásico acerca de los modelos dinámicos de un proceso, que es necesario para eficazmente implementar el control MPC.

La tecnología de MPC es aplicada muchas veces de una manera supervisora para realizar las operaciones que normalmente son efectuadas por el operario - en lugar de recurrir a un control básico, que oculta las disposiciones administrativas y que es implementado por un distribuido sistema de control (DCS). La tecnología MPC está en condiciones de equilibrar automáticamente los objetivos entre si enfrentados y las limitaciones del proceso, aplicando para ello unas técnicas matemáticas con el fin de proporcionar los óptimos puntos de ajuste para el proceso.

Por regla general, la tecnología MPC comprenderá unos aspectos como son:

**Modelos dinámicos:** Un modelo dinámico para el pronóstico como, por ejemplo, un modelo dinámico no-linear. Este modelo es desarrollado fácilmente por efectuar un ensayo paramétrico de la planta y de las fases del proceso. La alta calidad del modelo dinámico representa la clave de una excelente optimización y prestación de los controles.

**Identificación dinámica:** Las dinámicas del proceso - o como el proceso cambia en el tiempo - son identificadas por emplear unos ensayos de fases de la planta. Sobre la base de estos ensayos de fases es aplicado un algoritmo - que está basado en la optimización - para identificar las dinámicas de la planta.

**Optimización de estado estacionario:** El optimizador de estado estacionario es empleado para encontrar el punto óptimo para el proceso.

**Control dinámico:** El regulador dinámico es empleado para computar las maniobras de control óptimo, relacionadas con una solución de estado estacionario. Las maniobras de control son computadas empleando un optimizador. El optimizador es usado para reducir al mínimo una función de costo, especificada por el usuario, la cual se encuentra sometida a un conjunto de limitaciones. La función de costo es computada por aplicar el modelo dinámico del proceso. Sobre la base del modelo, de la función de costo y de las limitaciones pueden ser computadas las óptimas maniobras de control para el proceso.

**Retroalimentación dinámica:** El regulador MPC emplea una retroalimentación dinámica para actualizar los modelos. Por aplicar la retroalimentación pueden ser reducidos en gran medida los efectos de perturbaciones, las incongruencias entre los modelos y el ruido de los sensores.

**Aspectos de un reglaje avanzado:** El regulador MPC facilita un completo conjunto de posibilidades de reglaje. Para unas variables de manipulación puede fijar el usuario el valor y el coeficiente deseados; el factor de penalidad de movimiento; un límite inferior y un límite superior; la velocidad de cambio de las limitaciones así como unas severas limitaciones, tanto superiores como inferiores. El usuario también puede emplear la salida del optimizador de estado estacionario para ajustar el valor deseado en una variable de manipulación. Para las variables controladas puede el usuario fijar el valor y el coeficiente deseados; los errores en pesos; los límites así como las severas limitaciones priorizadas para la trayectoria por la chimenea.

**Simulación del entorno:** Una simulación off-line del entorno está proporcionada para la comprobación inicial y para el reglaje del regulador. La simulación del entorno permite investigar sobre una incongruencia entre los modelos y sobre las posibilidades de rechazo de perturbaciones.

**Sistema on-line:** El algoritmo de control del regulador MPC está implementado, de forma preferente, en un servidor de software normalizado, que puede funcionar con un sistema operativo normalmente comercializado. El servidor está en comunicación con un distribuido sistema de control (DCS) a través de un punto de contacto hombre/máquina

## ES 2 311 234 T3

normalizado. De una manera conveniente, los ingenieros y los operarios pueden observar los pronósticos en la salida del algoritmo del MPC, usando para ello un punto de contacto gráfico (GU) para el usuario.

5 Manipulación dura de errores: El usuario especifica la forma en la que el algoritmo del MPC ha de responder a los errores en las entradas y salidas. El regulador puede ser desconectado al presentarse los errores en unas variables críticas o bien el último conocido valor correcto anterior puede ser empleado para las variables, que no son críticas. Por manipularse de forma apropiada los errores puede ser aumentada al máximo la operación del regulador en tiempo útil.

10 Virtuales analizadores on-line: En los casos en los cuales no están disponibles las mediciones directas de una variable del proceso, el entorno proporciona la infraestructura para implementar un virtual analizador on-line (VAO), que se basa en un software. Usando esta herramienta del regulador MPC, puede ser desarrollado un modelo de la deseada variable del proceso, usando para ello los datos históricos de la planta incluyendo, dado el caso, los datos del laboratorio. El modelo puede luego ser pasado a las variables de proceso en tiempo real y pronosticar, también en  
15 tiempo real, la variable del proceso, la cual no está medida. Este pronóstico puede ser usado después en el regulador por pronóstico y modelo.

### *Optimización del proceso de desulfuración WFGD*

20 Tal como esto será detalladamente descrito más abajo, de acuerdo con la presente invención puede ser mejorada la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>. Esto quiere decir que la cantidad o tasa de eliminación del SO<sub>2</sub> de la unidad puede ser aumentada al máximo y/o ser optimizada siendo mantenidas, no obstante, las exigidas o las deseadas limitaciones como son la limitación de la pureza del yeso y el límite de las emisiones, tanto instantáneas como de tipo medio  
25 rotativo. También - o bien como alternativa - los costos de la operación pueden ser reducidos al mínimo y/o ser optimizados. Por ejemplo, las bombas del lodo pueden ser desconectadas automáticamente al ser reducida la carga del gas de escape, que pasa a la WFGD. Asimismo, el flujo del aire de oxidación y la eliminación del SO<sub>2</sub> también - o bien como alternativa - pueden ser ajustados de forma dinámica para prevenir las condiciones de una obstrucción de piedra caliza. Empleando el regulador MPC aquí descrito, el proceso de la WFGD puede ser manejado ateniéndose  
30 estrechamente a las limitaciones, y se consigue una prestación que está perfeccionada en comparación con los procesos de WFGD, que son controlados de la manera convencional.

Las Figuras 5A y 5B muestran unas cajas de "limitación", 500 y 550, para el proceso de la WFGD. Según lo indicado, por identificarse las limitaciones, 505 hasta 550, tanto para el proceso como para el equipo, y por aplicarse  
35 unas relaciones - de estado estacionario así como basadas en el proceso - entre las múltiples variables independientes (MV) y las identificadas limitaciones, es decir, las variables dependientes/variables controladas, existe la posibilidad de representar las limitaciones sobre un "espacio" común en los términos de las múltiples variables independientes (MV). Este espacio es, efectivamente, un espacio n-dimensional, en el que n es igual al número de grados de libertad o al número de las MVs en el problema. Sin embargo, a efectos de una más clara ilustración, suponemos que tengamos  
40 sólo dos grados de libertad, es decir, dos múltiples variables independientes, por lo cual es posible representar las limitaciones del sistema y las relaciones, usando para ello un gráfico bidimensional (X-Y).

De una manera conveniente, las limitaciones del proceso y del equipo marcan un espacio de solución no-cero, que está representado como las zonas de posibles operaciones 525. Cualquier solución dentro de este espacio cumplirá con  
45 las limitaciones del sub-sistema de la desulfuración WFGD.

Todos los sub-sistemas de WFGD tienen algún grado de variabilidad. Con referencia a la Figura 5A, se puede observar que la típica estrategia de operación convencional está prevista para colocar, de una manera confortable, la normal variabilidad del sub-sistema de WFGD dentro de una zona de confort 530 del espacio de posible operación  
50 525, lo cual proporcionará normalmente una operación segura. El hecho de mantener las operaciones dentro de esta zona de confort 530 aleja las operaciones de las zonas de imposible/indeseable operación, es decir, alejadas de zonas situadas fuera de la región 525 de posibles operaciones. Se ajustan, normalmente, las alarmas del sistema de distribuido control (DCS) en los límites o cerca de los límites de las limitaciones medibles, con el fin de alertar a los operarios acerca de problemas, que puedan surgir.

55 Si bien es verdad, que cualquier punto dentro del espacio de posible operación 525 respeta las limitaciones 505-520 del sistema, distintos puntos dentro del espacio de posible operación 525 no tienen, sin embargo, los mismos costos de operación como, por ejemplo, la eficiencia de absorción del SO<sub>2</sub> y la capacidad de producir el sub-producto del yeso. Para aumentar al máximo los beneficios o para reducir al mínimo los costos de la eficiencia en la absorción del SO<sub>2</sub> o de la producción/calidad del sub-producto, es necesario identificar el punto económicamente óptimo para la  
60 operación dentro del espacio de posibilidades 525.

De acuerdo con la presente invención, las variables del proceso y el costo o los beneficios de mantener o cambiar los valores de estas variables pueden ser empleados, por ejemplo, para proporcionar una función de objetivo, que  
65 representa beneficios y la que en algunos casos puede ser considerada como un costo negativo. Según lo indicado en la Figura 5B, por aplicar unas técnicas de solución de programación de forma linear, cuadrada o no-linear - tal como esto se describe detalladamente más abajo - es posible identificar el punto 555 de una óptima solución posible como, por ejemplo, el punto de solución del menor costo o del máximo beneficio dentro del ámbito de la posible operación 525.

## ES 2 311 234 T3

Como quiera que las limitaciones y/o los costos pueden variar en el tiempo, resulta conveniente volver a identificar el punto 555 de la óptima solución posible en tiempo real como, por ejemplo, cada vez que el regulador MPC actúe.

Por consiguiente, la presente invención facilita un automático re-enfoque de la operación del proceso, desde el punto de la operación convencional dentro de la zona de confort 530 hacia el punto de operación óptima 555, y desde el punto de operación óptima 555 hacia otro punto de operación óptima si se produce un cambio en las limitaciones de los costos. Una vez determinado este punto óptimo, son calculados los cambios necesarios en los valores de las múltiples variables independientes MV para pasar el proceso hacia el punto de operación óptima. Estos nuevos valores MV constituyen ahora los valores de objetivo. Los valores de objetivo son unos valores de estado estacionario, y los mismos no cuentan para las dinámicas del proceso. Con el fin de manejar de una manera segura el proceso, las dinámicas del proceso también necesitan ser controladas y manipuladas, lo cual nos lleva al siguiente punto.

Con el fin de pasar el proceso desde el antiguo punto de operación hacia el nuevo punto de operación óptima son aplicados unos modelos de proceso, la retroalimentación así como una ejecución de alta frecuencia. Empleando las técnicas de MPC, quedan pronosticados el camino dinámico o la trayectoria de las variables controladas (CV). Por aplicar este pronóstico y por manejar los ajustes de las MV manipuladas - no solamente en el tiempo actual, sino también en el futuro como, por ejemplo, en un futuro a corto plazo - existe la posibilidad de manejar el camino dinámico de las variables controladas CV. Ahora pueden ser calculados los nuevos valores de objetivo para las CVs. A continuación, los errores dinámicos a través del deseado horizonte de tiempo también pueden ser calculados como la diferencia entre el camino pronosticado para las CVs y los nuevos valores de objetivo de las CVs. Una vez más, por aplicarse una teoría de optimización, puede ser calculado un camino óptimo que reduce al mínimo los errores. Ha de tenerse en cuenta que, en la práctica y de forma preferente, al ingeniero le es permitido sopesar los errores de tal manera, que algunas variables CV sean controladas con más rigor que otras. El modelo de proceso por pronóstico permite, asimismo, controlar el camino o la trayectoria óptima desde un punto de operación hasta el siguiente; de este modo, pueden ser impedidos los problemas de la dinámica, mientras se esté pasando al nuevo punto de operación óptima.

Como resumen, la presente invención permite que las operaciones puedan ser controladas en virtualmente cualquier punto dentro de la zona de la operación posible 525, conforme pueda ser necesario para optimizar el proceso con el fin de obtener prácticamente cualquier resultado deseado. Esto quiere decir, que el proceso puede ser optimizado si el objetivo consiste en conseguir las más bajas emisiones posibles, la mayor cantidad o la más alta calidad del sub-producto, los más bajos costos de operación o cualquier otro resultado.

Con el fin de acercarse estrechamente al punto de máxima operación 555, el regulador MPC reduce, de forma preferente, la variabilidad dentro del proceso, de tal modo que unas pequeñas desviaciones no puedan representar ninguna violación de la limitación. Por ejemplo, por aplicarse los modelos de proceso por pronóstico, la retroalimentación y una ejecución de alta frecuencia, el regulador MPC puede reducir drásticamente la variabilidad del controlado proceso.

### *Modelos de estado estacionario y modelos dinámicos*

Tal como descrito en los párrafos anteriores, para el regulador MPC son empleados un modelo de estado estacionario y los modelos dinámicos. En este apartado se describen estos modelos con más detalles.

Modelos de estado estacionario: El estado estacionario de un proceso para un determinado conjunto de entradas es el estado, que queda descrito por el conjunto de los asociados valores del proceso y el cual conseguiría el proceso si todas las entradas tendrían que ser mantenidas de forma constante para un largo periodo de tiempo, de tal manera que los valores anteriores de las entradas ya no puedan afectar al estado. Para una desulfuración de WFGD - debido a la gran capacidad y a una reacción relativamente lenta del cristizador dentro de la unidad de procesamiento - el tiempo hasta llegar al estado estacionario es normalmente del orden de 48 horas. Un modelo de estado estacionario es usado para pronosticar los valores de proceso, asociados al estado estacionario para un conjunto de entradas del proceso.

Modelos de estado estacionario de primeros principios: Una aproximación para desarrollar un modelo de estado estacionario consiste en emplear un conjunto de ecuaciones, que son deducidas y se basan en los conocimientos de la ingeniería del proceso. Estas ecuaciones pueden representar unas conocidas relaciones fundamentadas entre las entradas y las salidas del proceso. Para deducir este conjunto de ecuaciones, pueden ser empleadas las conocidas ecuaciones físicas, químicas, eléctricas y de ingeniería. Teniendo en cuenta que estos modelos se basan en unos principios conocidos, los mismos son denominados modelos de primer principio.

La mayoría de los procesos están originalmente previstos para aplicar unas técnicas de primer principio y los modelos. Estos modelos tienen normalmente la necesaria exactitud para facilitar una operación segura dentro de una zona de confort, tal como la misma ha sido descrita anteriormente con referencia a la Figura 5A. Sin embargo, el proporcionar unos modelos muy exactos, y basados en primeros principios, resulta muchas veces caro y exige, además, mucho tiempo. Adicionalmente, unas desconocidas influencias pueden tener con frecuencia unos efectos importantes sobre la exactitud de los modelos de primeros principios. Por consiguiente, frecuentemente son empleadas unas aproximaciones alternativas para establecer los modelos de estado estacionario y de gran exactitud.

Modelos empíricos: Los modelos empíricos están basados en datos actuales, recogidos del proceso. El modelo empírico es establecido aplicando una técnica de regresión de datos para determinar la relación entre las entradas y

## ES 2 311 234 T3

las salidas del modelo. Muchas veces, los datos son recogidos de una serie de ensayos de la planta, en los que las individuales entradas son manipuladas para registrar sus efectos sobre las salidas. Estos ensayos de planta pueden durar de días hasta semanas, con el objeto de recoger suficientes datos para los modelos empíricos.

5 Modelos empíricos lineares: Los modelos empíricos lineares son formados por unir una línea - o un plano, a unas dimensiones más elevadas - con un conjunto de datos de entrada y de salida. Son generalmente disponibles los algoritmos para establecer estos modelos; Excel, por ejemplo, facilita un algoritmo de regresión para comunicar una línea con un conjunto de datos empíricos.

10 Modelos de red neuronal: Los modelos de red neuronal representan otra forma de modelos empíricos. Las redes neuronales permiten unas curvas más complejas que una línea, que ha de ser unida con un conjunto de datos empíricos. Están biológicamente inspirados la estructura y el algoritmo de entrenamiento para un modelo de red neuronal. Una red neuronal está compuesta por nudos, que imitan la funcionalidad básica de una neurona. Los nudos están conectados por pesos, que emulan las interacciones básicas entre las neuronas dentro del cerebro. Estos pesos son establecidos empleando un algoritmo de entrenamiento, que imita el aprendizaje del cerebro. Por emplearse unos modelos basados de redes neuronales puede ser desarrollado un modelo, que es mucho más rico y más complejo que el modelo que se consigue empleando los modelos empíricos lineares. Usando los modelos de redes neuronales pueden ser representadas las relaciones entre las entradas (Xs) y las salidas (Ys) de un proceso. Las referencias, que más debajo en este Documento se hacen a redes neuronales o a modelos de redes neuronales, deben ser interpretadas como referencias a  
20 modelos de procesos basados en redes neuronales.

Modelos híbridos: Los modelos híbridos implican una combinación de elementos entre primeros principios o relaciones conocidas y relaciones empíricas. Por ejemplo, puede ser conocida la forma de la relación entre las entradas Xs y la salida Y (elemento de primer principio). La relación o las ecuaciones comprenden una serie de constantes.  
25 Algunas de estas constantes pueden ser determinadas por aplicarse el conocimiento del primer principio. Sería muy difícil y/o costoso determinar, en base a los primeros principios, las otras constantes. Sin embargo, es relativamente fácil y poco costoso emplear los actuales datos del proceso para las entradas Xs y la salida Y, y aplicar el conocimiento del primer principio para construir un problema de regresión al objeto de determinar los valores para las constantes desconocidas. Dentro del modelo híbrido, estas desconocidas constantes representan el elemento empírico/regresivo.  
30 La regresión es mucho más pequeña que un modelo empírico, y la naturaleza empírica de un modelo híbrido es mucho menor, habida cuenta de que la forma del modelo y algunas de las constantes son fijados en base a los primeros principios, que establecen las relaciones físicas.

Modelos dinámicos: Los modelos dinámicos representan los efectos de cambios de las entradas sobre las salidas en el tiempo. Mientras que los modelos de estado estacionario son usados solamente para pronosticar el estado final remanente del proceso, los modelos dinámicos son empleados para pronosticar el camino que será tomado desde un estado estacionario hacia otro. Los modelos dinámicos pueden ser desarrollados por emplear los conocimientos de los primeros principios, los datos empíricos o una combinación de estos dos. En la mayoría de los casos, sin embargo, estos modelos son desarrollados usando los datos empíricos recogidos de una serie de ensayos escalonados de las variables importantes, que afectan el estado del proceso.  
40

Modelo "Pegasus Power Perfecter™": La mayor parte de los reguladores MPC solamente permiten el uso de modelos empíricos lineares, es decir, el modelo es compuesto de un modelo empírico lineal de estado estacionario y de un modelo empírico lineal dinámico. El Pegasus Power Perfecter (™) permite que los modelos lineares, no-lineares, empíricos y de primeros principios puedan ser combinados entre si para así constituir el modelo final, que es empleado dentro del regulador y es, por consiguiente, usado con preferencia para implementar el regulador MPC. En la Patente Núm. 5.933.345 de los Estados Unidos está descrito un algoritmo para combinar los distintos modelos entre si, con el fin de constituir un modelo final para su empleo en el Pegasus Power Perfecter (™).  
50

### 50 Estructura del sub-sistema de WFGD

La Figura 6 muestra el diagrama de bloques funcionales de la estructura de un sub-sistema de WFGD con un control por pronóstico mediante modelo. El regulador 610 comprende la lógica necesaria para computar en tiempo real los puntos de ajuste para las manipuladas MVs 615 como son, por ejemplo, el valor pH y el aire de oxidación del proceso WFGD 620. El regulador 610 basa estos cálculos en las observadas variables de proceso (OPV) 625 como pueden ser el estado de las MVs, las variables de perturbaciones (DV) y las controladas variables (CV). Además, un conjunto de valores de referencia (RV) 640 - que normalmente tienen asociados uno o varios parámetros de reglaje - será también empleado para computar los puntos de ajuste de las manipuladas MVs 615.  
55

Un estimador 630, que preferentemente es un virtual analizador on-line (VOA), lleva incorporada la lógica necesaria para generar los estimados variables de proceso (EPV) 635. Las EPVs son normalmente unas variables de proceso, que no pueden ser medidas de una forma exacta. El estimador 630 emplea la lógica para generar una estimación en tiempo real del estado de operación de las EPVs del proceso de WFGD sobre la base de los valores actuales y de los valores anteriores de las OPVs. Ha de tenerse en cuenta que las OPVs pueden comprender tanto las mediciones DCS del proceso, como asimismo las mediciones del laboratorio. Por ejemplo, y tal como mencionado más arriba, la pureza del yeso puede ser determinada en base a mediciones del laboratorio. De una manera conveniente, el estimador 630 puede dar unas alarmas para varios tipos de problemas en el proceso de WFGD.  
65

## ES 2 311 234 T3

Las lógicas del regulador 610 y del estimador 630 pueden estar implementadas en un software o de otra manera cualquiera. Debe tenerse presente que, al ser deseado, el regulador y el estimador podrían estar implementados fácilmente dentro de un solo proceso de ordenador, tal como esto lo saben las personas familiarizadas con este ramo técnico.

### 5 *Regulador de control por pronóstico mediante modelo (MPCC)*

10 El regulador 610 de la Figura 6 está implementado, de forma preferente, por emplear un regulador de control por pronóstico mediante modelo (MPCC). Este MPCC facilita - en tiempo real - un control del proceso de WFGD con una entrada múltiple y con una salida múltiple dinámica. El MPCC computa los puntos de ajuste para regular las MVs en base a los valores de las observadas y estimadas PVs, 625 y 635. Un MPCC de la WFGD puede emplear uno cualquiera de los valores o bien una combinación con cualquiera o con todos los valores, que son medidos a través de:

- 15 - Muestra del valor pH
- Sensores de densidad del lodo
- Sensores de temperatura
- 20 - Sensores de potencial de reducción de oxidación (ORP)
- Sensores de nivel de absorción
- Sensores de entrada y de salida del SO<sub>2</sub> por la chimenea
- 25 - Sensores de la velocidad de entrada de los gases de escape
- Química de los análisis del laboratorio del absorbedor (Cl, Mg, Fl)
- 30 - Análisis del laboratorio sobre la pureza del yeso
- Análisis del triturado y de la pureza de la piedra caliza

35 El regulador MPCC de la desulfuración WFGD también puede usar uno cualquiera de los puntos de ajuste computados - o una combinación con cualquiera o con todos los puntos de ajuste computados - para controlar lo siguiente:

- Alimentador de piedra caliza
- 40 - Pulverizadores de piedra caliza
- Flujo del lodo de piedra caliza
- Alimentadores/válvulas del aditivo químico/reactivo
- 45 - Válvulas de control o amortiguadores o sopladores del flujo de aire de oxidación
- Válvula o punto de ajuste del valor pH
- Bombas de reciclaje
- 50 - Válvulas bombas para añadir y eliminar agentes acondicionadores del agua
- Química del absorbedor(Cl, Mg, Fl)

55 De este modo, el regulador MPCC de la WFGD puede controlar una cualquiera o una combinación con cualquier CV o con todas las CVs:

- Eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>
- 60 - Pureza del yeso
- Valor pH
- Densidad del lodo
- 65 - Nivel del absorbedor
- Triturado y pureza de la piedra caliza

## ES 2 311 234 T3

- Costos de la operación

La aproximación del regulador MPC proporciona la flexibilidad para computar, de manera optimizada, todos los aspectos del proceso de WFGD dentro de un regulador único. Un primer reto en la operación de la WFGD consiste en elevar al máximo los beneficios de la operación y reducir al mínimo las pérdidas de la misma por equilibrar los siguientes objetivos, que están un tanto opuestos entre sí:

- Mantener la velocidad de la eliminación del SO<sub>2</sub> a un nivel apropiado en relación con el deseado límite de la limitación como, por ejemplo, los límites de los permisos administrativos o los límites que aumentan, dado el caso, al máximo los créditos para la eliminación del SO<sub>2</sub>.

- Mantener la pureza del yeso a un valor apropiado con respecto al deseado límite de la limitación, por ejemplo, al límite de las especificaciones sobre la pureza del yeso.

- Mantener los costos de la operación a un nivel apropiado en relación con el deseado límite de la limitación, por ejemplo, de los costos mínimos del consumo eléctrico.

La Figura 7 muestra, a título de ejemplo, un regulador MPCC 700 que comprende tanto un regulador como un estimador, similares a los que han sido descritos con referencia a la Figura 6. Tal como esto será descrito detalladamente más abajo, el regulador MPCC 700 es capaz de equilibrar los anteriormente descritos objetivos entre sí opuestos. Según una preferida forma de realización, el MPCC 700 comprende el "Pegasus Power Perfecter (TM)", la lógica MPC y unos modelos basados en una red neuronal; no obstante, al ser deseado también podrían ser empleados - según lo anteriormente indicado y tal como esto es conocido por las personas familiarizadas con este ramo técnico - en lugar de éstos otra lógica así como otros modelos, basados en unas redes no-neuronales.

Según lo indicado en la Figura 7, el regulador MPCC 700 comprende una apropiada unidad de procesamiento 705, con múltiples puertas de entrada/salida 715 así como una unidad de memoria de disco 710. La unidad de la memoria de disco 710 puede consistir en uno o en varios dispositivos de un tipo apropiado o de varios tipos apropiados, que pueden emplear medios electrónicos, medios magnéticos, medios ópticos o cualquier otra forma como medio de memoria. Ha de tenerse en cuenta también que, si bien aquí está indicado un número relativamente pequeño de puertas de entrada/salida, la unidad de procesamiento puede comprender tantas puertas de entrada/salida como sean apropiadas para cada particular implementación. Debe tenerse presente, asimismo, que los datos de proceso, procedentes del sistema DCS, y los puntos de ajuste, retroalimentados al DCS, pueden ser conjuntados para formar paquetes que son transmitidos como un solo mensaje, usando los protocolos estándar de comunicación entre ordenadores y siendo la funcionalidad de comunicación de datos, en la que esto está basado, fundamental para la operación del regulador MPCC; los detalles de la implementación están bien conocidos a las personas familiarizadas con este ramo técnico, y los mismos no son relevantes para la tarea de control de la que aquí se trata. La unidad de procesamiento 705 se comunica con la unidad de memoria de disco 710 para guardar y recuperar los datos a través de un enlace de comunicación 712.

El regulador MPCC 700 comprende igualmente uno o varios dispositivos de entrada para admitir las entradas del usuario como, por ejemplo, las del operario. Según lo indicado en la Figura 7, un teclado 720 y un ratón 725 facilitan la entrada manual de comandos o de datos a la unidad de procesamiento 705 a través de los enlaces de comunicación, 722 y 727, y de las puertas de entrada/salida 715. El MPCC 700 comprende también un visualizador 730 para presentar la información al usuario. La unidad de procesamiento 705 comunica la información, que ha de ser presentada al usuario, al visualizador 730 a través del enlace de comunicación 733. Adicionalmente a facilitar la comunicación de las entradas del usuario, las puertas de entrada/salida 715 también facilitan - a la unidad de procesamiento 705 y a través de los enlaces de comunicación, 732 y 734 - las entradas que no sean del usuario, como asimismo facilitan las puertas de entrada/salida la comunicación de directrices como, por ejemplo, las directrices de control generadas, desde la unidad de procesamiento 715 y a través de los enlaces de comunicación, 734 y 736.

### *Unidad de procesamiento, lógica y modelos dinámicos*

Tal como indicado en la Figura 8, la unidad de procesamiento 705 comprende un procesador 810, una memoria 820 y un punto de contacto hombre/máquina o interface 830 para facilitar la recepción así como la transmisión de señales de entrada/salida 805 a través de los enlaces de comunicación, 732 hasta 736, indicados en la Figura 7. La memoria 820 consiste normalmente en una memoria de acceso selectivo (RAM). El punto de contacto hombre/máquina 830 facilita las interacciones entre el procesador 810 y el usuario por medio de un teclado 720 y/o de un ratón 725, como asimismo las facilita entre el procesador 810 y otros dispositivos, tal como esto será descrito detalladamente más abajo.

También están indicados en la Figura 8 la lógica de estimación de almacenamiento 840 de la unidad de memoria de disco 710, la lógica de pronóstico 850, la lógica generadora de control 860, un modelo dinámico de control 870 así como un modelo dinámico de estimación 880. La lógica de almacenamiento es activada en conformidad con los modelos memorizados para controlar el sub-sistema de WFGD con el fin de optimizar las operaciones, tal como esto será descrito con mayor detalle más abajo. La unidad de memoria de disco 710 comprende también un registro de datos 850 para guardar los datos recibidos o computados así como una base de datos 890 para mantener un historial sobre las emisiones del SO<sub>2</sub>.

## ES 2 311 234 T3

En la siguiente Tabla 1 está indicada una matriz de control, que registra las entradas y salidas que son usadas por el MPCC 700 para equilibrar los objetivos anteriormente indicados.

TABLA 1

*Matriz de control*

5

10

15

20

25

30

35

40

45

	Eliminación de SO <sub>2</sub>	Pureza del yeso	Costos de operación
<b>Variables manipuladas</b>			
Valor pH	X	x	
Aire del soplador		x	X
Bomba de reciclaje	X		X
<b>Variables de perturbación</b>			
SO <sub>2</sub> de entrada			X
Velocidad del gas de escape			X
Cloruro	X	x	
Magnesio	X	x	
Fluoruro	X	x	
Pureza y triturado de la piedra caliza		x	X
Costo internos de energía			X
Costo de la piedra caliza			X
Precio del yeso			X

50

Según el ejemplo aquí descrito para una implementación, el regulador MPCC 700 es empleado para controlar las CVs, consistentes en la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub>, en la pureza del yeso así como en los costos de la operación. Los puntos de ajuste para los MVs - consistentes en el nivel del vapor pH, en la carga del soplador para el aire de oxidación y en la carga para las bombas de reciclaje - son manipulados para poder regular los CVs. El MPCC 700 también tiene en consideración cierta cantidad de DVs.

55

El MPCC 700 tiene que equilibrar los tres objetivos, entre si opuestos y asociados a las CVs, siendo respetado al mismo tiempo un conjunto de limitaciones. Los opuestos objetivos son formados para formar una función de objetivos, que es reducida al mínimo por aplicar una técnica no lineal de optimización de programación, codificada en la lógica del MPCC. Por introducirse - empleando, por ejemplo, el teclado 720 o el ratón 725 - unos factores de peso o importancia para cada uno de estos objetivos, el operario del sub-sistema de WFGD - u otro usuario - pueden especificar la importancia relativa de estos objetivos en función de las circunstancias del caso.

60

65

En ciertas circunstancias, la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub>, por ejemplo, puede ser de mayor peso que la pureza del yeso y los costos de la operación, y los costos de la operación pueden ser de un mayor peso que la pureza del yeso. En otras circunstancias, sin embargo, pueden los costos de la operación ser de un mayor peso que la pureza del yeso y que la tasa de eliminación del SO<sub>2</sub>, y la pureza del yeso puede ser considerada de mayor peso que la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub>. Todavía en otras circunstancias puede ser así, que la pureza del yeso es de mayor peso que la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub> y que los costos de la operación. Puede ser especificado cualquier número de combinaciones para juzgar el respectivo peso.

## ES 2 311 234 T3

El regulador MPCC 700 controlará las operaciones del sub-sistema de WFGD en base a los pesos especificados, de tal manera que el sub-sistema pueda trabajar al punto óptimo como, por ejemplo, al punto óptimo 555 indicado en la Figura 5B, siendo respetado, sin embargo, el conjunto de las limitaciones aplicables como, por ejemplo, las limitaciones 505 hasta 520, indicadas en la Figura 5B.

Para este particular ejemplo, las limitaciones son las que están relacionadas en la Tabla 2, indicada más abajo. Estas limitaciones son normalmente del tipo, que está asociado a las CVs y a las MVs anteriormente descritas.

TABLA 2

*Limitaciones variables, controladas y manipuladas*

<b>Variables controladas:</b>	<b>Limitación mínima</b>	<b>Limitación máxima</b>	<b>Valor deseado</b>
Eliminación del SO <sub>2</sub>	90%	100%	Máximo
Pureza del yeso	95%	100%	Mínimo
Costo de operación	Ninguno	Ninguno	Mínimo
<b>Variables manipuladas:</b>	<b>Limitación mínima</b>	<b>Limitación máxima</b>	
Valor pH	5.0	6.0	Computado
Aire del soplador	0%	100%	Computado
Bomba de reciclaje No. 1	Desconectada	Conectada	Computado
Bomba de reciclaje No. 2	Desconectada	Conectada	Computado
Bomba de reciclaje No. 3	Desconectada	Conectada	Computado
Bomba de reciclaje No. 4	Desconectada	Conectada	Computado

### *Modelo de control dinámico*

Tal como anteriormente mencionado, el MPCC 700 requiere un modelo de control dinámico 870, con la estructura de entrada/salida indicada en la matriz de control de la Tabla 1. Con el fin de desarrollar un modelo dinámico de esta clase, se han de desarrollar inicialmente un modelo de primeros principios y/o un modelo empírico, basados en los ensayos de planta del proceso de la WFGD. El modelo de primeros principios y/o el modelo empírico pueden ser desarrollados por aplicarse las técnicas anteriormente descritas.

En el caso del sub-sistema de WFGD, objeto del ejemplo en discusión, es desarrollado de forma preferente un modelo de estado estacionario (de primeros principios o de tipo empírico) del proceso de WFGD para la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub> y para la pureza del yeso. Aprovechando la aproximación del primer principio, un modelo de estado estacionario es desarrollado sobre la base de las conocidas relaciones fundamentales entre las entradas y las salidas del proceso de la WFGD. Empleando la aproximación de una red neuronal, un modelo del estado estacionario de la velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub> y de la pureza del yeso es desarrollado por ser recogidos los datos empíricos, procedentes del proceso actual en las distintas fases o estados de la operación. Un modelo - que está basado en una red neuronal y que puede captar una no-linealidad del proceso - es ensayado, en primer lugar, con estos datos empíricos. Debe hacerse constar, otra vez, que si bien un modelo, basado en una red neuronal, puede ser preferido en determinadas implementaciones, el uso de un tal modelo no es, sin embargo, obligatorio. En lugar del mismo puede ser empleado, al ser esto deseado, un modelo basado en una red no-neuronal, y éste incluso puede ser el modelo preferido para determinadas implementaciones.

Además, el modelo de estado estacionario para los costos de la operación es desarrollado en base a los primeros principios. Sencillamente, los factores de costo son empleados para desarrollar un modelo del costo total. Según la implementación del presente ejemplo, el costo de varias materias primas - como, por ejemplo, de la piedra caliza - y

## ES 2 311 234 T3

los costos de la energía eléctrica son multiplicados por sus respectivos importes de uso para así desarrollar el modelo del costo total. Un modelo de beneficios queda determinado por el precio del crédito de emisiones de la eliminación del SO<sub>2</sub>, multiplicado por las toneladas del SO<sub>2</sub> eliminado, mientras que el precio del yeso es multiplicado por las toneladas de yeso. Los beneficios (o pérdidas) de la operación pueden ser determinadas por restar los costos de los beneficios. En función del accionamiento de la bomba (velocidad fija frente a una velocidad variable), la optimización de la línea de bombas puede implicar unas decisiones binarias de tipo conectado/desconectado; esto puede requerir un segundo paso de optimización para evaluar por completo las distintas opciones en la alineación de las bombas.

Si bien pueden ser desarrollados unos modelos exactos de estado estacionario, que pueden ser apropiados para una solución basada en la optimización del estado estacionario, estos modelos no comprenden, sin embargo, las dinámicas del proceso, por lo que los mismos no son particularmente apropiados para su uso en el regulador MPCC 700. Por consiguiente, en el sub-sistema de WFGD son llevados a efectos unos ensayos escalonados para recoger datos actuales sobre la dinámica del proceso. A continuación, los datos de una respuesta a los ensayos escalonados son empleados para formar el modelo empírico de control dinámico 870 para el sub-sistema de WFGD; modelo éste que está guardado por el procesador 810 en la unidad de memoria de disco 710, tal como indicado en la Figura 8.

### *Modelo dinámico de estimación y analizador virtual on-line*

La Figura 6 indica la forma en la que un estimador - como, por ejemplo, el estimador que se encuentra incorporado en el regulador MPCC 700 - es usado en el avanzado control de conjunto del proceso de la WFGD. En el MPCC 700, este estimador tiene preferentemente la forma de un analizador virtual on-line (VOA). La Figura 9 indica más detalles del estimador, que está incorporado en el MPCC 700.

Según lo indicado en la Figura 9, las observadas MVs y DVs son introducidas en el modelo empírico de estimación dinámica 880 para el sub-sistema de WFGD, el cual es empleado para activar la lógica de estimación 840 sobre el procesador 810. Con respecto a ello, el procesador 810 activa la lógica de estimación 840 en conformidad con el modelo dinámico de estimación 880. En este caso, la lógica de estimación 840 computa los valores actuales de las CVs como, por ejemplo, los valores de la eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub>, de la pureza del yeso y de los costos de la operación.

La Tabla 3 muestra la estructura de un modelo dinámico de estimación 880. Aquí ha de tenerse en cuenta que son de la misma estructura la matriz de control y el modelo dinámico de estimación 800, empleados en el regulador MPCC 700.

TABLA 3

### *Modelo de proceso para el estimador*

	Eliminación del SO <sub>2</sub>	Pureza del yeso
<b>Variables manipuladas</b>		
Valor pH	X	x
Aire del soplador		x
Bomba de reciclaje	X	
<b>Variables de perturbación</b>		
SO <sub>2</sub> de entrada		
Velocidad del gas de escape		
Cloruro	x	x
Magnesio	X	x
Fluoruro	X	x
Pureza y triturado de la piedra caliza		x

## ES 2 311 234 T3

La salida de una ejecución de la lógica de estimación 840 son unos valores de bucle abierto para la eliminación del SO<sub>2</sub> y la pureza del yeso. El modelo dinámico de estimación 880 para el analizador VOA es desarrollado por aplicar la misma aproximación anteriormente descrita para desarrollar el modelo de control dinámico 870. Debe ser tenido en consideración que, si bien el modelo dinámico de estimación 880 y el modelo de control dinámico 870 son principalmente unos modelos idénticos, los mismos son empleados, sin embargo, para unas finalidades muy distintas. El modelo dinámico de estimación 880 es empleado por el procesador 810 para activar la lógica de estimación 840 con el fin de generar un exacto pronóstico de los valores actuales de las variables del proceso (PV) como, por ejemplo, las estimadas CVs 940. El modelo de control dinámico 870 es empleado por el procesador 810 para activar la lógica de pronóstico 850 para computar de manera óptima los manipulados puntos de ajuste de MV, indicados en la Figura 6.

Según lo indicado en la Figura 9, un bucle de retroalimentación 930 está previsto desde el bloque de estimación 920 que representa las estimadas CVs, generadas por el procesador 810 como resultado de la ejecución de la lógica de estimación 840. Por consiguiente, la mejor estimación de las CVs es retornada al modelo dinámico de estimación 880 a través del bucle de retroalimentación 930. La mejor estimación de las CVs de la iteración previa del estimador es usada como punto de partida para enganchar el modelo dinámico de estimación 880 para la iteración actual.

El bloque de validación 910 representa una validación de los valores observados CV950 - a través de, por ejemplo, las mediciones por sensor y de los análisis del laboratorio - por parte del procesador 810, empleando para ello los resultados de la ejecución de la lógica de estimación 840, en conformidad con el modelo dinámico de estimación 880 y con las observadas MVs y DVs 960. La validación, representada por el bloque 910, es también empleada para identificar las condiciones de una posible obstrucción de piedra caliza. Por ejemplo, al representar las observadas MVs un valor pH, medido por uno de los sensores pH, la validación 910 del medio valor pH - basado en un valor pH, estimado de acuerdo con el modelo dinámico de estimación 880 - puede indicar que esta fallando el sensor del valor pH. Si queda identificado que la observada eliminación del SO<sub>2</sub> o la observada pureza de yeso o el valor pH son erróneos, el procesador 810 no tomará el valor de la estimación 920. En lugar de ello será empleado un valor sustitutivo, de forma preferente la salida que resulta de la estimación, que está basada en el modelo dinámico de estimación. Adicionalmente, puede ser transmitida una alarma al sistema DCS.

Para computar la estimación 920, el procesador 810 combina el resultado de la ejecución de la lógica de estimación 840, basada en el modelo dinámico de estimación 880, con las observadas y validadas CVs. Con preferencia es aplicada la aproximación de un filtro Kalman para combinar el resultado de la estimación con los datos observados y validados. En este caso, la validada velocidad de eliminación del SO<sub>2</sub>, computada por los sensores de entrada y de salida del SO<sub>2</sub>, es combinada con el generado valor de velocidad de eliminación para así producir un valor estimado de la verdadera eliminación del SO<sub>2</sub>. Debido a la exactitud de los sensores del SO<sub>2</sub>, la lógica de estimación 840 puede establecer preferentemente un estrecho enlace entre la versión filtrada de los datos observados y el valor generado.

Como máximo, la pureza del yeso es medida solamente cada pocas horas. El procesador 810 también combinará nuevas observaciones de la pureza del yeso con el generado valor estimado de la pureza del yeso. Durante los periodos entre las mediciones de muestras del yeso, el procesador 810 recorrerá - en conformidad con el modelo dinámico de estimación 880 - las estimaciones actualizadas de bucle abierto para la pureza del yeso, las cuales están basadas en unas variaciones en las observadas MVs y DVs 960. De este modo, el procesador 810 implementa, asimismo, una estimación de la pureza del yeso en tiempo real.

Finalmente, el procesador 810 activa la lógica de estimación 840, en conformidad con el modelo dinámico de estimación 880, para computar los costos de la operación de WFGD. Teniendo en consideración que no existe ninguna directa medición on-line de los costos, el procesador 810 implementa necesariamente la estimación de tiempo real de los costos de la operación.

### 50 *Manejo de las emisiones*

Según lo indicado anteriormente, los permisos administrativos para la operación, los cuales son emitidos en los Estados Unidos, establecen normalmente unos límites, tanto para las emisiones instantáneas como para las emisiones de tipo medio rotativo de emisiones. Existen dos tipos de problemas relacionados con las emisiones de tipo rotativo, los cuales son resueltos de manera beneficiosa por el regulador MPCC 700 durante el control del sub-sistema de WFGD. El primer tipo de problema se presenta al ser la ventana de tiempo del valor medio rotativo de las emisiones más pequeña o igual al horizonte de tiempo de la lógica de pronóstico 850, activada por el procesador 810 del MPCC 700. El segundo tipo de problema se presenta al ser la ventana de tiempo del valor medio rotativo de las emisiones mayor que el horizonte de tiempo de la lógica de pronóstico 850.

### 60 *Estructura del regulador MPCC de una sola fase*

El primer tipo del problema, o sea, el de una ventana de tiempo corta, es resuelto por adaptar el diseño normal del MPCC 700 para integrar el valor medio rotativo de las emisiones como una variante CV adicional en el control implementado por el MPCC 700. Más concretamente, la lógica de pronóstico 850 y la lógica generadora de control 860 tratarán la condición del estado estacionario como una limitación del proceso, que ha de ser mantenida al límite del permiso o bien por debajo del mismo, en vez de considerarla como una limitación económica, y estas lógicas también imponen un camino de control dinámico, que mantiene los valores actuales y los valores futuros al promedio

## ES 2 311 234 T3

rotativo dentro de la aplicable ventana de tiempo o por debajo del límite del permiso. De esta manera, el MPCC 700 está provista de una configuración de reglaje para el valor medio rotativo de las emisiones.

### *Consideración de las variables de perturbación*

Además, las DVs para factores de unos programados acontecimientos de operación - como, por ejemplo, las variaciones en la carga, las que tienen un impacto sobre las emisiones dentro de un horizonte aplicable - son tenidos en consideración en la lógica de pronóstico 850 y, por consiguiente, en el control del regulador MPCC 700 para el proceso de WFGD. En la práctica, las actuales variables de perturbación (DV) - que dentro de la unidad de memoria de disco 710 están guardadas como parte de los datos 885 variarán en base al tipo del sub-sistema de WFGD así como en función de la particular filosofía de operación, adaptada para el sub-sistema; por ejemplo, carga básica frente a desviaciones. Las DVs pueden ser ajustadas de vez en cuando por el operario por medio de entradas, efectuadas por usar el teclado 720 y el ratón 725, o por la propia lógica generadora de control 860 o bien por un sistema de programación externo (no indicado aquí) a través del punto de contacto hombre/máquina 830.

Sin embargo, las variables DVs no están normalmente en una forma, que pueda ser ajustada fácilmente por operarios u otros usuarios. Por consiguiente, una herramienta de punto de contacto hombre/máquina para el plan operativo está prevista preferentemente como una parte de la lógica de pronóstico 850 para ayudarle al operario o a otro usuario en ajustar las DVs y en mantener las mismas.

Las Figuras 11A y 11B indican el punto de contacto hombre/máquina o el interface, previsto en el visualizador 730 para introducir una parada programada. Según lo indicado en la Figura 11A, está prevista una pantalla 1100, que visualiza para el operario o para otro usuario el proyectado factor del proceso del sistema de generación de energía así como el proyectado factor del proceso del sub-sistema de WFGD. También están visualizados los botones, que le permiten al usuario introducir una o más paradas programadas nuevas y visualizar previamente las ya introducidas paradas programadas, a efectos de su revisión o modificación.

Al ser seleccionado - empleando el ratón 725 - el botón, que le permite al usuario introducir una programada parada, al usuario se le presenta la pantalla 1110, indicada en la Figura 11B. Entonces, el usuario puede introducir - empleando el teclado 720 - varios detalles en relación con la nueva parada programada, tal como indicada. Por apretar el previsto botón para añadir paradas, la nueva parada programada es añadida como una DV y es tenida en consideración por la lógica de pronóstico 850. La lógica, que implementa este interface, ajusta las apropiadas DVs de tal manera, que el plan de futuras operaciones sea comunicado a la unidad del procesamiento 705 del regulador MPCC.

Cualquiera que sea el tipo de las actuales DVs, la función de las DVs será siempre la misma, y ella consiste en acomodar el impacto de los programados acontecimientos de operación en la lógica de pronóstico 850, que luego puede ser activada por el procesador del MPCC para pronosticar las futuras condiciones dinámicas y de estado estacionario de las CVs respecto a las emisiones de tipo medio rotativo. A este efecto, el MPCC 700 activa la lógica de pronóstico 850 para computar el pronosticado valor medio rotativo de las emisiones. El pronosticado valor medio rotativo de las emisiones es, a su vez, empleado como una entrada para la lógica generadora de control 860, que es activada por el procesador 810 del MPCC para tener en consideración los programados acontecimientos de operación en el esquema de control. De esta manera, el MPCC 700 está provisto de una configuración de reglaje para el valor medio rotativo de emisiones a la vista de los programados acontecimientos de operación y el mismo tiene, por consiguiente, la capacidad de controlar la operación de la desulfuración WFGD dentro de los límites del permiso de las emisiones medias rotativas, a pesar de Los acontecimientos programados para la operación.

### *Estructura del regulador MPCC de dos fases*

El segundo tipo de problema, o sea, el de una ventana de tiempo larga, es resuelto de una manera conveniente por aplicar una aproximación del regulador MPCC de dos fases. Para esta aproximación, el regulador MPCC 700 comprende una multitud - preferentemente dos - procesadores de control, puestos en cascada.

Haciendo ahora referencia a la Figura 10, se observa que una unidad de procesamiento de control (CPU) 705A de una sola fase trabaja para resolver - en la manera descrita anteriormente con referencia al regulador de estructura de una sola fase - el problema de una ventana de tiempo corta. Según lo indicado en la Figura 10, la CPU 705A comprende un procesador 810A. El procesador 810A activa la lógica de pronóstico 850A, que está guardada en la unidad de memoria de disco 710A, para proporcionar un ajuste dinámico del promedio rotativo de las emisiones dentro de una ventana de tiempo para igualarlo al plazo corto del horizonte de tiempo aplicable. Una variable CV - que representa el objetivo de las emisiones medias rotativas a corto plazo o en el aplicable horizonte de control - está guardada, como parte de Los datos 885A, dentro de la unidad de memoria 710A de la CPU 705A.

La CPU 705A comprende también la memoria 820A y el interface 830A, similares a la memoria 820 y al interface 830 anteriormente descritos con referencia a la Figura 8. El interface 830A recibe un sub-conjunto de las señales de entrada/salida del MPCC 700, es decir, las señales de entrada/salida 805A. La unidad de memoria de disco 710A también guarda la lógica de estimación 840A y el modelo dinámico de estimación 880A, la lógica generadora de control 860A y el modelo dinámico de control 870A así como la base de datos 890A del histórico de emisiones de SO<sub>2</sub>, todos ellos ya descritos anteriormente con referencia a la Figura 8. La CPU 705A comprende, asimismo, un

## ES 2 311 234 T3

temporizador 1010, normalmente un reloj de procesador. La función del temporizador será descrita de forma detallada más abajo.

5 La unidad de procesamiento de control CPU 705B de dos fases actúa para resolver el problema de un plazo largo o de una ventana de tiempo larga. Según lo indicado en la Figura 10, la CPU 705B comprende el procesador 810B. El procesador 810B activa la lógica de pronóstico 850B para también proporcionar el manejo dinámico del promedio rotativo de las emisiones. Sin embargo, la lógica de pronóstico 850B es activada para manejar las dinámicas emisiones medias rotativas a la vista de la completa ventana de tiempo futuro de la limitación de las emisiones medias rotativas así como para determinar el óptimo objetivo de las emisiones medias rotativas a corto plazo o el aplicable horizonte de tiempo, es decir, el límite máximo para la CPU 705A de una sola fase. De forma correspondiente, la CPU 705B sirve como un optimizador de las emisiones medias rotativas a largo plazo, y la misma pronostica el valor medio rotativo de las emisiones por el aplicable horizonte de tiempo a los efectos de controlar el promedio de las emisiones rotativas por la completa ventana de tiempo futuro.

15 La variable controlada (CV), que representa la limitación de las emisiones medias rotativas según el horizonte de tiempo a largo plazo, es guardada - como parte de los datos 885B - dentro de la unidad de memoria de disco 710B. La CPU 705B comprende también la memoria 820B y el interface 830B, que son similares a la memoria 820 y al interface 830 anteriormente descritos. El interface 830 recibe un sub-conjunto de las señales entrada/salida del MPCC 700, es decir, las señales entrada/salida 805B.

20 Aunque la estructura de dos fases, indicada en la Figura 10, comprende una multitud de CPUs ha de tenerse en cuenta que la lógica de pronóstico de varias fases puede estar implementada también de otra manera, sí esto es deseado. Según lo indicado en la Figura 10, por ejemplo, la fase una del MPCC 700 está representada por la CPU 705A, mientras que la fase dos del MPCC 700 está representada por la CPU 705B. No obstante, una sola CPU - como, por ejemplo, la CPU 705 de la Figura 8 - podría ser empleada también para activar tanto la lógica de pronóstico 850A como la lógica de pronóstico 850B y para determinar, de este modo, el óptimo objetivo de las emisiones medias rotativas a corto plazo o el aplicable horizonte de tiempo, y esto a la vista del pronosticado óptimo de las emisiones medias rotativas a largo plazo, para así resolver el problema del largo plazo o de la ventana de tiempo larga así como para optimizar las emisiones medias rotativas a corto plazo o el aplicable horizonte de tiempo, todo ello en consideración al objetivo determinado.

30 Tal como anteriormente indicado, la CPU 705B busca un horizonte de tiempo a largo plazo, algunas veces referido como horizonte de control y correspondiente a la ventana de tiempo del promedio rotativo. De una manera conveniente, la CPU 705B maneja las dinámicas emisiones medias rotativas a la vista de la completa ventana de tiempo futuro de las emisiones medias rotativas, y la misma determina el óptimo límite de las emisiones medias rotativas a corto plazo. La CPU 705B se activa a una frecuencia lo suficientemente rápida para permitir que la misma pueda captar los cambios en el plano de operaciones con unos periodos relativamente cortos.

40 La CPU 705B utiliza el objetivo de las emisiones medias rotativas a corto plazo o al plazo aplicable - el cual es considerado como una variable controlada (CV) por la CPU 705A - como una variable múltiple (MV), y la misma toma como una CV también el promedio rotativo de las emisiones a largo plazo. Por consiguiente, el valor medio rotativo de las emisiones a largo plazo es guardado - como una parte de los datos 885B - en la unidad de memoria de disco 710B. La lógica de pronóstico 850B tratará la condición de estado estacionario como una limitación del proceso - la cual ha de ser mantenida al límite del permiso o por debajo del mismo - en lugar de tratarla como una limitación económica, y esta lógica también impondrá un camino de control dinámico, que mantiene los actuales y los futuros valores del promedio rotativo dentro de la aplicable ventana de tiempo o por debajo del límite del permiso. De esta manera, el MPCC 700 está provisto de una configuración de reglaje para el valor medio rotativo de las emisiones.

50 Además, las DVs de factores de unos programados acontecimientos de operación - por ejemplo, de unas variaciones en la carga, las cuales tendrán un impacto sobre las emisiones dentro de un horizonte aplicable - son tenidas en consideración por la lógica de pronóstico 850B y, por consiguiente, en el control del regulador MPCC 700 para el proceso de WFGD. Tal como mencionado anteriormente, en la práctica es así que las actuales DVs, que como una parte de los datos 885B están guardadas dentro del disco de memoria 710B, variarán en función del tipo de sub-sistema de WFGD así como de la particular filosofía de operación, adoptada para el sub-sistema, y las mismas pueden ser ajustadas por el operario o por la CPU 705B, activando la lógica generadora de control 860B, o bien por un sistema de programación externo (no indicado aquí) a través del interface 830B. Sin embargo, y tal como indicado arriba, las DVs no están normalmente en una forma, que pueda ser fácilmente ajustada por los operarios o por otros usuarios y, por consiguiente, una herramienta de punto de contacto hombre/máquina para el plan operativo - tal como la misma está indicada en las Figuras 11A y 11B - está prevista con preferencia como una parte de la lógica de pronóstico 850A y/o 850B para ayudarle al operario o a otro usuario en ajustar las DVs y en mantener las mismas.

65 Sin embargo, también aquí es así que cualquiera que sea el tipo de las DVs, la función de las DVs será siempre la misma, y ella consiste en acomodar el impacto de los programados acontecimientos de operación en la lógica de pronóstico 850B, que luego puede ser activada por el procesador 810B del MPCC para pronosticar las futuras condiciones dinámicas y de estado estacionario de las CVs respecto a las emisiones de tipo medio rotativo.

A este efecto, la CPU 705B activa la lógica de pronóstico 850B para determinar - a la vista de Los programados acontecimientos en la operación - el óptimo límite de las emisiones medias rotativas a largo plazo aplicable. Este

## ES 2 311 234 T3

límite óptimo de las emisiones medias rotativas a corto plazo o al plazo aplicable es transmitido, a través del enlace de comunicación 1000, a la CPU 705A. De esta manera, el regulador MPCC 700 está provisto de una configuración de reglaje para optimizar el promedio rotativo de las emisiones a la vista de los programados acontecimientos de operación y, por consiguiente, con la capacidad de optimizar el control de la WFGD dentro del límite del permiso de las emisiones medias rotativas, y esto a pesar de unos acontecimientos programados en la operación.

La Figura 12 muestra - a escala de aumento - la vista de la estructura del MPCC de fases múltiples. Según lo indicado, un operario u otro usuario emplea un terminal de control remoto 1220 para comunicarse con la base de datos 1210 del histórico del proceso, así como con el MPCC 700 a través de los enlaces de comunicación, 1225 y 1215. Este MPCC comprende la CPU 705A y la CPU 705B de la Figura 10, las cuales están comunicadas entre si mediante el enlace de comunicación 1000. Los datos, relacionados con el proceso de WFGD, son transmitidos - a través del enlace de comunicación 1230 - a la base de datos 1210 del histórico del proceso, la cual guarda estos datos como unos datos históricos de procesos. Tal como esto será descrito detalladamente más abajo, los necesarios datos almacenados son recuperados de la base de datos 1210 por medio del enlace de comunicación 1215, y los mismos son procesados por la CPU 705B. También son transmitidos - por medio del enlace de comunicación 1235 - a la CPU 705A los datos necesarios, relacionados con el proceso de WFGD, para ser procesados por la misma.

Tal como indicado anteriormente, la CPU 705A recibe de la CPU 705B - a través del enlace de comunicación 1000 - las CV del objetivo de la operación y correspondientes al actualmente deseado objetivo del promedio rotativo a largo plazo. Este comunicado objetivo del promedio rotativo constituye el objetivo optimizado para el promedio rotativo a largo plazo, el cual es generado por la CPU 705B activando la lógica de pronóstico 850B. Las comunicaciones entre la CPU 705A y la CPU 705B son tratadas de la misma manera como las comunicaciones entre un regulador MPC y un optimizador de tiempo real.

La CPU 705A y la CPU 705B se benefician de un protocolo, acordado entre ellas, el cual asegura que si la CPU 705B para de enviar a la CPU 705A los objetivos optimizados para el promedio rotativo a largo plazo, la CPU 705A volverá a una inteligente y conservadora estrategia de operación en cuanto a la limitación del promedio rotativo a largo plazo. La lógica de pronóstico 850A puede incluir una herramienta para establecer un tal protocolo, con lo cual quedan asegurados el necesario acuerdo y el archivo. Sin embargo, al no incluir la lógica de pronóstico 850A una tal herramienta, los aspectos típicos y la funcionalidad del distribuido sistema de control (DCS) pueden ser adaptados - de una manera que es conocida por las personas familiarizadas con este ramo técnico - para implementar el necesario acuerdo y el archivo.

El problema crítico consiste en asegurar, que la CPU 705A esté empleando de forma constante un objetivo oportuno - es decir, actual y no caducado - del promedio rotativo. Cada vez que la CPU 705B activa la lógica de pronóstico 850B, la misma calculará un actualizado nuevo objetivo del promedio rotativo. La CPU 705A recibe el nuevo objetivo de la CPU 705B a través del enlace de comunicación 1000. En base a la recepción del nuevo objetivo, la CPU 705A activa la lógica de pronóstico 850A para reajustar el temporizador 1010. Si la CPU 705A falla en recibir de la CPU 705B a tiempo - a través del enlace de comunicación 1000 - un nuevo objetivo, el temporizador 1010 deja de contar o expira. En base a la expiración del temporizador 1010, la CPU 705A considera - en conformidad con la lógica de pronóstico - que el actual objetivo del promedio rotativo a largo plazo está caducado, y la misma vuelve a una estrategia de operación segura hasta que reciba de la CPU 705B un nuevo objetivo actualizado del promedio rotativo a largo plazo.

De forma preferente, el ajuste mínimo del temporizador es un poco más largo que la frecuencia de activación de la CPU 705B, con el fin de resolver problemas de carga/programa del ordenador. Debido a la operación no-programada de muchos optimizadores de tiempo real, es una práctica convencional común ajustar los temporizadores de comunicación de la mitad hasta dos veces el tiempo de estado estacionario de un regulador. Sin embargo, dado que la activación de la lógica de pronóstico queda programada por la CPU 705B, la recomendada directriz para ajustar el temporizador 1010 no es la de un enlace de optimización de estado estacionario, pero tampoco debería ser, por ejemplo, más del doble de la frecuencia de activación del regulador, trabajando éste en la CVPU 705B, más aproximadamente 3 hasta 5 minutos.

Si la CPU 705A determina que el actual objetivo del promedio rotativo a largo plazo está caducado, tiene que ser reajustada la limitación del medio rotativo a largo plazo. Al no proporcionar la CPU 705B un nuevo actualizado objetivo del promedio rotativo a largo plazo, la CPU 705A tampoco dispone de una directriz o de un objetivo a largo plazo. Por lo tanto, la CPU 705A incrementa, en este caso, el margen de seguridad para las operaciones del proceso.

Por ejemplo, si el periodo del promedio rotativo es relativamente corto, de cuatro a ocho horas, y al estar trabajando el sub-sistema a unas condiciones por debajo de la carga básica, la CPU 705A puede incrementar el caducado objetivo de eliminación media rotativa en un tres hasta un cinco por ciento de peso, de acuerdo con la lógica de pronóstico 850A. En estas circunstancias, un incremento de este tipo podría establecer un suficiente margen de seguridad para unas operaciones continuadas. En relación con la entrada por parte del operario, la cual es necesaria para implementar el incremento, lo único que hace falta es introducir a la lógica de pronóstico un solo valor, por ejemplo, un 3 por ciento de peso.

Por el otro lado, al ser relativamente largo el periodo del promedio rotativo, por ejemplo, de 24 o más horas, y/o al estar el sub-sistema trabajando bajo una carga inconstante, la CPU 705A puede retornar al objetivo conservador, de acuerdo con la lógica de pronóstico 850A. Una manera en la que esto puede ser efectuado consiste en que la CPU

## ES 2 311 234 T3

705A, emplea una presumida operación constante a la programada carga del sub-sistema, o por encima de la misma, durante todo el periodo de la ventana de tiempo del promedio rotativo. En este caso, la CPU 705A puede calcular, en base a esta operación constante, un constante objetivo de emisión y añadir un pequeño margen de seguridad o factor de tranquilidad, que pueden ser determinados por la dirección de la planta. Para implementar esta solución en la CPU 705A, la lógica de pronóstico 850A tiene que incluir la observada funcionalidad. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que, al ser deseado, la funcionalidad para fijar este objetivo conservador podría ser implementada en el sistema DCS, en vez de en la CPU 705A. También podría ser posible implementar este conservador objetivo como una constante CV secundaria en el regulador 705A de una sola fase y capacitar esta CV solamente al estar caducado el objetivo 1000 del promedio rotativo a corto plazo.

Por consiguiente, si el periodo del promedio rotativo es relativamente corto o largo y/o si el sub-sistema está trabajando a una carga constante o a una carga inconstante, la lógica de pronóstico 850A comprende, de forma preferente, unos límites para el archivo, por lo cual no es necesaria una acción del operario. No obstante, también podrían ser aplicadas otras técnicas para fijar un tal límite de archivo, siempre que estas técnicas establezcan una operación segura y conservadora en relación con la limitación del promedio rotativo durante los periodos, en los que la CPU 705B no esté proporcionando unos nuevos objetivos actualizados del promedio rotativo a largo plazo.

Ha de tenerse en cuenta, que las actuales emisiones del SO<sub>2</sub> quedan registradas por parte del MPCC 700 en la base de datos 1210 de históricos del proceso, estando la CPU 705B funcionando o no de forma apropiada y aportando o no a la CPU 705A unos nuevos objetivos actualizados sobre el promedio rotativo a largo plazo. Por consiguiente, las emisiones memorizadas pueden ser empleadas por la CPU 705B para buscar los rastros y tener en consideración aquellas emisiones del SO<sub>2</sub>, las que tienen lugar, incluso al no estar la CPU 705B trabajando o comunicando de forma apropiada con la CPU 705A. Desde luego, una vez que la CPU 705B esté operando de nuevo y sea capaz de una comunicación apropiada, la misma volverá a optimizar - en conformidad con la lógica de pronóstico 850B - las emisiones medias rotativas e incrementará o reducirá el actual objetivo de las emisiones medias rotativas, el cual está siendo empleado por la CPU 705A, con el fin de regular las emisiones actuales, que se producían durante la parada, así como para transmitir - a través del enlace de comunicación 100 - a la CPU 705A el nuevo y actualizado objetivo del promedio rotativo a largo plazo.

### *Implementación on-line*

La Figura 13 muestra un diagrama de bloques funcionales del interface entre un regulador MPCC 1300 y el sistema de control DCS 1320 para el proceso 620 de la WFGD. El MPCC 1300 lleva incorporado tanto un regulador 1305 - que puede ser similar al regulador 610 de la Figura 6 - como asimismo un estimador 1310, que puede ser similar al estimador 630 de la Figura 6. Al ser deseado, el MPCC 1300 podría ser el MPCC, indicado en las Figuras 7 y 8. También el MPCC 1300 puede estar configurado para emplear una estructura de fases múltiples como, por ejemplo, la que está representada en las Figuras 10 y 12.

Tal como indicado, el regulador 1305 y el estimador 1310 están conectados al sistema DCS 1320 a través del interface 1315, que puede ser parte del interface 830 de la Figura 8. En esta preferida implementación, el interface de datos 1315 está implementado empleando un módulo de software de interface de datos (PD) Pegasus (™). Esto, sin embargo, no es obligatorio, y el interface de datos 1315 también puede estar implementado usando cualquier otra lógica de interface. El interface de datos 1315 envía los puntos de ajuste para las MVs manipuladas, y el mismo lee las PVs. Estos puntos de ajuste pueden ser enviados como las señales de entrada/salida 805 de la Figura 8.

Según esta preferida implementación, el regulador 1305 está implementado empleando el Pegasus (™) Power Perfecter (PPP), que se constituye de tres componentes de software, es decir, del componente de servidor de datos, del componente de regulador y del componente de interface gráfico de usuario (GUI). El componente de servidor de datos es empleado para comunicar con PDI los datos locales, relacionados con la aplicación del control. El componente de regulador activa la lógica de pronóstico 850 para efectuar los cálculos algorítmicos del modelo de control de pronóstico a la vista del modelo de control dinámico. El componente de interface GUI visualiza por ejemplo, en el visualizador 730 - los resultados de estos cálculos, y el mismo constituye un punto de contacto hombre-máquina para ajustar el regulador. Igualmente en este caso es así, que el uso del Pegasus (™) Power Perfecter no es obligatorio, y el regulador 1305 también podría estar implementado usando cualquier otra lógica de control.

En esta preferida implementación, el estimador 1310 es implementado usando un módulo de software Pegasus (™) motor de aplicación de tiempo de funcionamiento o "Run Time Application Engine" (RAE). Este módulo de RAE está en comunicación directa con el interface PDI y con el PPP. Se tiene en consideración que el RAE puede proporcionar una serie de aspectos, que lo convierten en un entorno muy efectivo - en cuanto a los costos - para el virtual analizador on-line (VOA). En el módulo RAE se encuentran implementados, de una manera conveniente, la funcionalidad de la lógica de comprobación de errores; el control del latido; la capacidad de comunicación y de vigilancia para el proceso del ordenador; así como los aspectos de una alarma. Sin embargo, tampoco aquí es obligatorio el empleo del módulo Pegasus (™) RAE, y el estimador 1315 puede estar implementado usando cualquier otra lógica de estimación. Tal como esto lo saben las personas familiarizadas con este ramo técnico, también existe la posibilidad de implementar en el sistema DCS para la WFGD 620 un analizador VOA funcionalmente equivalente al ser esto deseado.

## ES 2 311 234 T3

El regulador 1305, el estimador 1310 y el interface PDI 1315 trabajan preferentemente con un procesador como, por ejemplo, el procesador 810 de la Figura 8 o el procesador 810A de la Figura 10, que están conectados a una red de control - incluido el sistema DCS 1320 para el proceso de la WFGD 620 - empleando una conexión tipo Ethernet. Actualmente es normal que el sistema operativo del procesador esté basado en el sistema Microsoft Windows™, si bien esto no es obligatorio. El procesador también puede formar parte de un centro de procesamiento de datos de mayor capacidad o de otro tipo de ordenador como, por ejemplo, el que está indicado en la Figura 7. En cualquier caso, el procesador y su memoria correspondiente han de tener la suficiente capacidad de procesamiento y de almacenamiento de datos, con el fin de poder ejecutar la lógica necesaria para llevar a efecto el avanzado control de la desulfuración WFGD, tal como anteriormente descrito.

### 10 *Modificaciones en el distribuido sistema de control (DCS)*

Tal como anteriormente descrito con referencia a la Figura 13, el procesador del regulador, el cual activa la lógica de pronóstico 850, se comunica con el DCS 1320 - a efectos del proceso WFGD 620 - por medio del interface 1315. Para facilitar un apropiado punto de contacto entre el regulador 1305 y el sistema DCS 1320, un DCS convencional requiere normalmente algunas modificaciones. Por consiguiente, el DCS 1320 es, de un modo conveniente, un DCS convencional, que ha sido modificado en una manera bien conocida en el ramo, por lo que este sistema tiene las características descritas más abajo.

20 El sistema DCS está convenientemente adaptado, es decir, programado con la lógica necesaria, que normalmente emplea el software para poner al operario o a otro usuario en condiciones de realizar - desde la pantalla del interface del DCS - las funciones siguientes:

- 25 - Cambio del modo de control PPP (Pegasus Power Perfecter) entre automático y manual;
- Observación del estado del regulador;
- Observación del temporizador de vigilancia (“latido de corazón”);
- 30 - Observación de los atributos de las MVs para estado, valor mínimo, valor máximo y valor actual;
- Hacer posible que cada MV pueda cambiar a cualquier otra MV para ser quitada;
- Observación de los atributos de las CVs para valor mínimo, valor máximo y valor actual;
- 35 - Introducir los valores del laboratorio referentes a pureza del yeso, a química de absorción y a las características de la piedra caliza.

40 Como ayuda para el acceso del usuario a esta funcionalidad, el sistema DCS 1320 está adaptado para exhibir dos nuevas pantallas, tal como indicadas en las Figuras 14A y 14B. La pantalla 1400 de la Figura 14A es usada por el operario o por otro usuario para controlar el trabajo del regulador MPCC, mientras que la pantalla 1450 de la Figura 14B es empleada por el operario o por otro usuario para introducir los valores del laboratorio y/u otros valores, que puedan ser convenientes.

45 Para conveniencia así como con el fin de evitar una innecesaria complejidad en la comprensión de la presente invención, de la matriz de control han sido excluidas algunas posiciones - como, por ejemplo, la del costo de la operación - al propósito de la siguiente descripción. Se ha de entender, sin embargo, que los costos de la operación pueden estar fácilmente incorporados en la matriz del control, lo cual puede ser incluso preferido en muchos casos. Además, también por conveniencia así como para simplificar la descripción, las bombas de reciclaje son consideradas como variables DVs, en lugar de variables MVs. Otra vez es así, que las personas familiarizadas con este ramo técnico comprenderán que, en muchos casos, puede ser preferible considerar las bombas de reciclaje como unas MVs. Finalmente, ha de tenerse en cuenta que la siguiente descripción está basada en el supuesto de que el sub-sistema de WFGD comprenda dos torres de absorción y dos asociados reguladores MPCC (un ejemplo del MPCC para cada absorbedor dentro del sub-sistema WFGD).

### 55 *Pantallas de control avanzado del DCS*

Haciendo ahora referencia a la Figura 14A, se puede apreciar que la indicada pantalla 1400 comprende un modo de control (Controller Mode), que representa un recuadro que por el operario/usuario es seleccionado para estar en automático o en manual. Estando en AUTO, el regulador 1305 activa la lógica de pronóstico 850 como, por ejemplo, de que el Pegasus Power Perfecter (™) computa los movimientos de las MVs y activa la lógica generadora de control 860 para dirigir al DCS las señales de control con el fin de llevar a efecto estos movimientos. El regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850, no calculará las maniobras de las MVs mientras que no esté capacitada la variable, es decir, designado el modo AUTO.

65 El regulador 1305 - que activa la lógica de pronóstico 850 como, por ejemplo, el Pegasus Power Perfecter (™) - comprende un temporizador de vigilancia o la función de “latido de corazón”, que controla la integridad de la comunicación del interface 1315 dentro del sistema DCS 1320. Un indicador de alarma (no indicado aquí) aparecerá en la

## ES 2 311 234 T3

pantalla al fallar el interface 1315 de comunicación. El regulador 1305 reconocerá, al activar la lógica de pronóstico 850, un estado de alarma y el mismo, basado en el estado de alarma, iniciará la colocación de todas las selecciones capacitadas, es decir, activas, a un nivel inferior de la configuración del DCS.

5 La pantalla 1400 también incluye un estado perfeccionador o PERFECTER STATUS, que indica que la lógica de pronóstico 850 ha sido activada, con éxito o sin éxito, por el regulador 1305. Para que el regulador 1305 pueda permanecer en funcionamiento, es necesario un estado de GOOD o bueno (aquí indicado). Al reconocer el controlador 1305, activando la lógica de pronóstico 850, un estado BAD o malo, como respuesta a este estado BAD cortará el regulador todas las conexiones activas y devolverá el control al sistema DCS 1320.

10

Según lo indicado, las MVs están visualizadas con los siguientes títulos de información:

- ENABLED o capacitado - Este campo puede ser ajustado por el operario u otro usuario mediante una entrada al regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850, para capacitar o incapacitar cada MV. Incapacitar una MV  
15 corresponde a volver a la MV a la fase de estar quitada.

- SP - Indica el punto de ajuste de la lógica de pronóstico 850.

- MODE o modo - Indica que la lógica de pronóstico 850 reconoce que la MV aplicable está en la operación, está  
20 esperando o está completamente quitada.

- MIN LMT - Visualiza el límite mínimo, que por la lógica de pronóstico 850 está siendo aplicado para la MV. Ha de tenerse en cuenta que, con preferencia, estos valores no pueden ser cambiados por el operario ni por otro usuario.

25 - MAX LMT - Visualiza el límite máximo, que por la lógica de pronóstico 850 está siendo aplicado para la MV. También aquí es así, que estos valores preferentemente no pueden ser cambiados.

- PV - Indica el último valor o el valor actual de cada MV, tal como ésta es reconocida por la lógica de pronóstico 850.

30

La pantalla 1400 comprende, además, los siguientes detalles de los indicadores del campo de estado de la MV:

Al activar la lógica de pronóstico 850, el regulador 1305 solamente ajustará una MV particular si su modo está en ON o conectado. Para que esto ocurra, han de ser cumplidas cuatro condiciones. En primer lugar, el recuadro de  
35 capacitación tiene que estar seleccionado por el operario u otro usuario. El sistema DCS tiene que encontrarse en el modo AUTO. Han de ser falsas las condiciones de guardar o archivar, tal como computadas por el regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850. Finalmente, deben ser falsas las condiciones de espera, tal como computadas por el regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850.

40 El regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850, cambiará y visualizará el estado de modo de la MV a HOLD o espera al existir unas condiciones, que no permiten que el regulador 1305 ajuste esta particular MV. Al encontrarse en el estado de espera o HOLD, el regulador 1305 mantendrá - en conformidad con la lógica de pronóstico 850 - el valor actual de la MV, hasta que el mismo esté en condiciones de aclarar esta condición de espera. Para que la MV pueda permanecer en el estado de HOLD, tienen que ser cumplidas cuatro condiciones. En primer lugar,  
45 el recuadro de capacitación tiene que estar seleccionado por el operario u otro usuario. El sistema DCS tiene que encontrarse en el modo AUTO. Han de ser falsas las condiciones de guardar, tal como computadas por el regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850. Finalmente, deben ser verdaderas las condiciones de espera o HOLD, tal como computadas por el regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico.

50 El controlador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850, cambiará y visualizará el estado de modo de la MV a OFF o desconectado al existir unas condiciones, que no permiten que el regulador 1305 ajuste esta particular MV, y esto en base a una de las condiciones siguientes. En primer lugar, el recuadro de capacitación tiene que estar quitado de la selección, por parte del operario u otro usuario. El modo del sistema DCS no se encuentran en AUTO, es decir,  
55 está en manual. Debe ser verdadera cualquier condición de guardar, tal como computada por el regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850.

El regulador 1305, que activa la lógica de pronóstico 850, reconocerá varias condiciones de guardar, incluido el fallo del estimador 1310 de actuar y el fallo de introducir los valores del laboratorio durante un previamente establecido periodo de adelanto como, por ejemplo, en las últimas doce horas. Al determinar el regulador 1305, que activa la lógica  
60 de pronóstico 850, que es verdadera una de las condiciones arriba mencionadas para guardar, el mismo devolverá el control de la MV al sistema 1320.

Tal como esto está indicado también en la Figura 14A, las variables CV están visualizadas con los siguientes títulos de información:

65

- PV - Indica el último valor medido de la CV y recibido por el regulador 1403.

## ES 2 311 234 T3

- LAB - Indica el último valor de ensayo del laboratorio, conjuntamente con el tiempo de la muestra, recibido por el regulador 1305.

5 - ESTIMATE - Indica el actual o el más reciente valor estimado de la CV, el cual es generado por el estimador 1310 que activa la lógica de estimación 840 en base al modelo de estimación dinámico.

- MIN - Visualiza el límite mínimo para la CV.

10 - MAX - Visualiza el límite máximo para la CV.

Además, la pantalla 1400 visualiza para los estimados valores de las CVs unos trazados de tendencia para unos previamente determinados periodos de operación pasados como, por ejemplo, para las últimas 24 horas de la operación.

### 15 *Forma de entrada de muestras de laboratorio*

Haciendo ahora referencia a la Figura 14B, en la misma se indica para el operario u otro usuario la pantalla 1450 de prototipo para la forma de entrada de muestras del laboratorio al DCS. Esta pantalla puede ser usada por el operario u otro usuario para introducir los valores de los ensayos del laboratorio, los cuales serán procesados por el estimador 1310 de la Figura 13, en conformidad con la lógica de estimación 840 y el modelo de estimación dinámico 880, tal como anteriormente descrito con referencia a la Figura 8.

Según lo indicado en la Figura 14B, los valores siguientes son introducidos, conjuntamente con un asociado sello de tiempo, generado por el estimador 1310:

25 Valores de muestras de laboratorio para la Unidad 1:

- Pureza del yeso

30 - Cloruro

- Magnesio

- Fluoruro

35 Valores de muestras de laboratorio para la Unidad 2:

- Pureza del yeso

40 - Cloruro

- Magnesio

- Fluoruro

45 Valores de muestras de laboratorio para las Unidades 1 y 2 en conjunto:

- Pureza del yeso

50 - Pureza de la piedra caliza

- Triturado de la piedra caliza

55 El operario u otro usuario introducen los valores de los ensayos del laboratorio, conjuntamente con el asociado sello de tiempo, empleando para ello el teclado 720, que está indicado en la Figura 7. Una vez introducidos estos valores, el operario activará el botón de actualización usando para ello, por ejemplo, el ratón 725, indicado en la Figura 7. La activación del botón de actualización causa que el estimador 1310 actualizará los valores de estos parámetros durante la próxima activación de la lógica de estimación 840. Ha de tenerse en cuenta que, al no ser esto deseado, estos valores de ensayos del laboratorio también podrían - como alternativa - ser pasados automáticamente al regulador MPCC 1300 desde el laboratorio correspondiente, en forma digitalizada y a través del interface de la unidad de procesamiento del MPCC como, por ejemplo, el interface 830, indicado en la Figura 8. Además, la lógica del MPCC podría ser fácilmente adaptada - es decir, programada - para activar automáticamente la función de actualización, representada por el botón de actualización, como respuesta a la recepción de los valores de ensayos, en forma digitalizada y desde el laboratorio o los laboratorios correspondientes.

65 Con el fin de asegurar un apropiado control del proceso de desulfuración WFGD, los valores de ensayos del laboratorio sobre la pureza del yeso deben ser actualizados cada ocho hasta doce horas. Por consiguiente, al no estar

## ES 2 311 234 T3

actualizada la pureza en este periodo de tiempo, el regulador MPCC 1300 quedará, de forma preferente, configurado o programado con la lógica necesaria para guardar o archivar el control y emitir una alarma.

Adicionalmente, los valores de la química del absorbedor así como los valores característicos de la piedra caliza deben ser actualizados por lo menos una vez a la semana. También aquí es así que, al no ser actualizados a tiempo estos valores, el MPCC 1300 está preferentemente configurado para emitir una alarma.

En la lógica de estimación 840, que es activada por el estimador 1310, está incluida una lógica de validación para validar los valores introducidos por el operario. Al ser estos valores introducidos de forma incorrecta, el estimador 1310 pasará - en conformidad con la lógica de estimación 840 - a los valores anteriores, que seguirán siendo visualizados, tal como indicado en la Figura 14B, y no será actualizado el modelo de estimación dinámico.

### *Control del conjunto de las operaciones de la WFGD*

El control del conjunto de las operaciones de un sub-sistema de WFGD por medio de un regulador MPCC - de uno cualquiera de los tipos anteriormente descritos - será descrito a continuación y con referencias a las Figuras 15A, 15B, 16, 17, 18 y 19.

La Figura 15A, representa un sistema de generación de energía (PGS) 110 y el sistema de control de contaminación de aire (APC) 120, similar al sistema descrito con referencia a la Figura 1, con idénticos números de referencia para indicar los mismos elementos del sistema, algunos de los cuales ya no están descritos aquí para evitar una innecesaria duplicación.

Según lo indicado, el sub-sistema de WFGD 130' comprende un control multi-variable que, según este ejemplo de implementación, está realizado por el regulador MPCC 1500, que puede ser similar al MPCC 700 o al MPCC 1300 anteriormente descrito y el que, al ser deseado, puede ser de una estructura de fases múltiples del tipo descrito con referencia a las Figuras 10 hasta 12.

El gas de escape 114 con el SO<sub>2</sub> es dirigido desde otro sub-sistema de APC 122 hasta la torre de absorción 132. El aire de ambiente 152 es comprimido por un soplador 150 para ser pasado - como aire comprimido de oxidación 154' - al cristizador 134. Un sensor 1518 detecta el nivel de las condiciones de ambiente 1520. Las medidas condiciones de ambiente 1520 pueden incluir, por ejemplo, la temperatura, la humedad y la presión barométrica. El soplador o ventilador 150 comprende un control de carga de soplador 1501, que está capacitado para facilitar el valor actual 1520 de la carga del soplador y para modificar esta actual carga del soplador en base a un recibido punto de ajuste SP 1503 para la carga del soplador.

También según lo indicado, el lodo de piedra caliza 148' es bombeado, por las bombas de lodo 133, desde el cristizador 134 hasta la torre de absorción 132. Cada una de las bombas de lodo 133 comprende un control de estado de bomba 1511 así como un control de carga de bomba 1514. El control de estado de bomba 1511 puede proporcionar el valor actual del estado de bomba 1512 como, por ejemplo, indicar el estado de conectado/desconectado de la bomba así como el cambio en el estado actual de la bomba en base a un recibido punto de ajuste EP 1513 del estado de la bomba. El control de la carga de bomba 1514 puede facilitar un actual valor de carga de bomba 1515 y una variación en la carga actual de la bomba, basada en un punto de ajuste SP 1516 para la carga de la bomba. El flujo de lodo de piedra caliza fresco 141' desde el mezclador/depósito 140 hasta el cristizador 134 es controlado por una válvula de control de flujo 199 en base a un SP 196' para el flujo del lodo. Este punto de ajuste SP 196' del flujo de lodo está basado en una señal de control 181 del regulador PID, la cual es determinada en base a un punto de ajuste SP 186' del valor pH, tal como esto será descrito más abajo con mayor detalle. El lodo fresco 141', que fluye hacia el cristizador 134, sirve para regular el valor pH del lodo, que es empleado en el proceso de WFGD, y el mismo sirve, por consiguiente, para controlar la eliminación del SO<sub>2</sub> del gas de escape 114, que está cargado de SO<sub>2</sub> y que entra en la torre de absorción 132.

Tal como esto ha sido comentado anteriormente, el gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, entra en la parte inferior de la torre de absorción 132. Dentro de la torre de absorción 132, el SO<sub>2</sub> es eliminado del gas de escape 114. El gas de escape limpio 116', que preferentemente está exento del SO<sub>2</sub>, es dirigido desde la torre de absorción 132 hacia, por ejemplo, la chimenea 117. Un analizador de SO<sub>2</sub> 1504 - que, según lo indicado, está dispuesto por la salida de la torre de absorción 132, pero que también podría estar ubicado en la chimenea 117 o en otro punto situado corriente debajo de la torre de absorción 132 - detecta el nivel de salida de SO<sub>2</sub> 1505.

Por el lado del control del sub-sistema 130', el regulador de proceso multi-variable para la desulfuración WFGD, es decir, el MPCC 1500, indicado en la Figura 15B, recibe distintas entradas. Estas entradas del MPCC 1500 pueden comprender el medido valor pH de lodo 183; el medido SO<sub>2</sub> de entrada 189; el valor de la carga de soplador 1SO<sub>2</sub>; el medido SO<sub>2</sub> de salida 1505, el valor de pureza de yeso 1506, según ensayo de laboratorio; la medida carga del PGS 1509; los valores de estado de bombas de lodo 1512; los valores de carga de bombas de lodo 1515; así como los valores medidos de condiciones ambientales 1520. Tal como esto será descrito más abajo con mayor detalle, estas entradas de los parámetros del proceso son empleados - en conjunto con otras entradas, incluidas las entradas 1550 no directamente relacionadas con el proceso y las entradas de limitaciones 1555 así como las computadas entradas estimadas de parámetros 1560 - por el MPCC 1500 para generar unos controlados puntos de ajuste de parámetros (SP) 1530.

## ES 2 311 234 T3

Durante el funcionamiento, el analizador de SO<sub>2</sub> 188 - situado en la torre de absorción 132 de la WFGD o corriente arriba de la torre - detecta dentro del gas de escape 114 un nivel de SO<sub>2</sub> de entrada. El medido valor 189 del SO<sub>2</sub> de entrada. El medido valor 189 del SO<sub>2</sub> de entrada es aportado a la unidad de avance de alimentación 190 y al MPCC 1500. La carga del sistema de generación de energía (PGS) 100 también es detectada por un sensor de carga PGS 1508 para ser comunicada - como una medida carga PGS 1509 - al MPCC 1500. Adicionalmente, un analizador de SO<sub>2</sub> 1504 detecta el nivel del SO<sub>2</sub> de salida dentro del gas de escape, que abandona la torre de absorción 132. También es aportado al MPCC 1500 el valor medido 1505 del SO<sub>2</sub> de salida.

### *Estimación de la calidad del yeso*

Refiriéndonos ahora también a la Figura 19, en la misma se puede apreciar que las entradas de parámetros al regulador MPCC 1500 comprenden unos parámetros que representan las condiciones actuales dentro de la torre de absorción 132. Los parámetros de este tipo pueden ser empleados por el MPCC 1500 para generar y actualizar un modelo de estimación dinámica para la calidad del yeso. El modelo de estimación dinámico para la calidad del yeso podría, por ejemplo, formar parte del modelo de estimación dinámico 880.

Como quiera que en la práctica no existe ninguna forma para una directa medición on-line de la pureza del yeso, puede ser usado el modelo de estimación dinámico para el yeso, conjuntamente con una lógica de estimación, activada por el estimador 1500B del MPCC 1500 como, por ejemplo, la lógica de estimación 840, para computar una estimación de la calidad del yeso, indicada como la calculada pureza de yeso 1932. El estimador 1500B es preferentemente un virtual analizador on-line (VOA). Si bien el controlador 1500A y el estimador 1500B están aquí indicados como alojados dentro de una misma unidad, es evidente que, si es deseado, el controlador 1500A y el estimador 1500B también podrían estar alojados de manera distanciada entre si y ser formados por componentes separados, siempre que el controlador 1500A y el estimador 1500B estén conectados de forma apropiada entre si para facilitar las necesarias comunicaciones. La computada estimación de la calidad de yeso 1932 también puede reflejar los ajustes por parte de la lógica de estimación, basados en unas mediciones de la calidad del yeso por el laboratorio, indicadas como el valor de pureza de yeso 1506 e introducidas en el MPCC 1500.

A continuación, la estimada calidad de yeso 1932 es pasada por el estimador 15006 al controlador 1500A del regulador MPCC 1500. El controlador 1500A emplea la estimada calidad de yeso 1932 para actualizar un modelo de control dinámico como, por ejemplo, el modelo de control dinámico 870. La lógica de pronóstico, como es la lógica de pronóstico 850, es activada por el controlador 1500A - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 - para comparar la estimada calidad de yeso 1932 con una limitación de la calidad del yeso, la cual representa la deseada calidad de yeso. Por regla general, la deseada calidad de yeso queda establecida por una especificación del contrato de venta del yeso. Según lo indicado, la limitación de la calidad del yeso es introducida en el regulador MPCC 1500 como el requisito de pureza de yeso 1924, y la misma está memorizada en los datos 885.

Al activarse la lógica de pronóstico, el controlador 1500A determina - en base a los resultados de la comparación - el ajuste, que es necesario en la operación del sub-sistema de WFGD 130'. En este caso, la diferencia determinada entre la estimada calidad de yeso 1932 y la limitación de calidad de yeso 1924 es empleada por la lógica de pronóstico, que está siendo activada por el controlador 1500A, para fijar los necesarios ajustes a efectuar en la operación del sub-sistema de WFGD para colocar la calidad del yeso 160' dentro de la limitación o de requisitos 1924 para la calidad del yeso.

### *Mantener el cumplimiento de los requisitos de la calidad del yeso*

Con el fin de poner la calidad del yeso 160' en conformidad con la limitación de calidad de yeso 1924, los necesarios ajustes para las operaciones de la WFGD, según han sido determinados por la lógica de pronóstico, son pasados a la lógica generadora de control como, por ejemplo, la lógica generadora de control 860, que también es activada por el controlador 1500A. El controlador 1500A activa la lógica generadora de control para producir unas señales de control, que corresponden al deseado incremento o decrecimiento de la calidad del yeso 160'.

Estas señales de control pueden originar, por ejemplo, unos ajustes en la operación de una o de varias válvulas 199, de las bombas de todo 133 y del soplador 150, indicados en la Figura 15A, de tal manera que los parámetros del proceso del sub-sistema de WFGD - como, por ejemplo, el medio valor pH del lodo 148', que fluye del cristizador 134 hasta la torre de absorción 132, el cual está representado por el medio valor de pH de todo 183 y es detectado por el sensor 182 en la Figura 15A - puedan corresponder a un deseado punto de ajuste (SP), por ejemplo, del deseado valor pH. Un ajuste en el valor pH 183 del lodo 148' tendrá por resultado, a su vez, un cambio en la calidad del sub-producto de yeso 160', que actualmente está siendo producido por el sub-sistema de WFGD 130', así como en la estimada calidad de yeso 1932, computada por el estimador 1500B, para así corresponder mejor a los requisitos 1924 de la calidad del yeso.

Nos referimos ahora también a la Figura 16, que indica más detalles de la estructura y del funcionamiento de la fuente de agua limpia 164, del mezclador/depósito 140 y de la unidad de deshidratación 136. Según lo indicado, la fuente de agua limpia 164 comprende un depósito de agua 164A, desde el cual un agua de enjuague ME 200 es bombeado por la bomba 164B hacia la torre de absorción 132, mientras que el agua limpia de la fuente de agua limpia 162 es bombeada por la bomba 164C hacia el depósito mezclador 140A.

## ES 2 311 234 T3

La operación y el control de la unidad de deshidratación 136 no son afectados por la adición del regulador MPCC1500.

5 Tampoco quedan afectados por la adición del MPCC 1500 la operación y el control de la zona de preparación del lodo de piedra caliza, incluyendo aquí el triturador 170 y el mezclador/depósito 140.

Haciendo ahora referencia a las Figuras 15A, 15B y 16, se puede apreciar que el controlador 1500A puede activar, por ejemplo, la lógica generadora de control para introducir un cambio en el flujo del lodo de piedra caliza 141' hacia el cristizador 134. El volumen del lodo 141', que fluye hacia el cristizador 134, es controlado por la apertura y el  
10 cierre de la válvula 199. La apertura y el cierre de la válvula 199 son controlados por el PID 180. La operación del PID 180 para controlar el funcionamiento de la válvula 199 está basada en un punto de ajuste del valor pH del lodo de entrada.

Por consiguiente, para poder controlar de forma apropiada el flujo del lodo 141' hacia el cristizador 134, el  
15 controlador 1500A determina el punto de ajuste del valor pH del lodo, el cual establecerá la calidad del yeso 161' en conformidad con los requisitos de calidad 1924 para el yeso. Según indican las Figuras 15A y 16, el determinado punto de ajuste del valor pH del lodo, el cual está indicado aquí como "pH SP 186", es transmitido al PID 180. El PID 180 controla después el funcionamiento de la válvula 199 para modificar el flujo de lodo 141' para hacerlo coincidir con el recibido SP 186' del valor pH.

Para controlar el funcionamiento de la válvula 199, el PID 180 produce una señal de control PID 181', que está  
20 basada en el recibido punto de ajuste SP 186' del valor pH del lodo así como en el recibido valor pH 183 del lodo 141', el cual es medido por el sensor 182 del valor pH. La señal de control 181' del PID es combinada con la señal de control 191 del avance de alimentación (FF), la cual es generada por la unidad FF 190. Tal como esto es conocido en este ramo técnico, la señal de control 191 del FF está basada en el valor medido del SO<sub>2</sub> de entrada 189 del gas de escape 114, el cual es recibido de un analizador de SO<sub>2</sub> 188, ubicado corriente arriba de la torre de absorción 132. La señal de control 181' del PID y la señal de control (FF) 191 están combinadas entre si dentro de un bloque de adición 192, que normalmente está incluido - como un aspecto fijo - en el bloque de salida del sistema DCS, el cual se  
25 comunica con la válvula 199. Las entre si combinadas señales de control, que salen del bloque de adición 192, están representadas por el punto de ajuste SP 196' del flujo de lodo.

El punto de ajuste de flujo de lodo 196' es transmitido hacia la válvula 199. La válvula 199 comprende normalmente otro PID (no indicado aquí), que dirige la apertura y el cierre actuales de la válvula 199 en base al recibido punto de  
35 ajuste de flujo de lodo 196' para modificar el flujo del lodo 141' a través de la válvula. En cualquier caso, en base al recibido punto de ajuste de flujo de lodo 196', la válvula 199 es abierta o cerrada para aumentar o reducir del volumen del lodo 141' y, por consiguiente, el volumen de lodo 240', que está fluyendo hacia el cristizador 134, lo cual modifica, a su vez, el valor pH del lodo dentro del cristizador 134 así como la calidad del yeso 160', que está siendo producido en el sub-sistema de WFGD 130'.

Pueden ser programados - aplicando unas conocidas técnicas, introducidas en el MPCC 1500 y/o en el PID 180,  
40 según proceda - los factores, que han de ser tenidos en consideración al determinar cuando el MPCC 1500 ha de reajustar o de actualizar el punto de ajuste del valor pH en el PID 180 y/o cuando el PID 180 ha de reajustar o actualizar en la válvula 199 el punto de ajuste del flujo del lodo de piedra caliza. Tal como esto es conocido por las personas familiarizadas con este ramo técnico, para una determinación de esta clase son tenidos en consideración,  
45 normalmente, unos factores como son la capacidad del PID 180 y la exactitud del sensor de valor pH 182.

El controlador 1500A genera el punto de ajuste SP 186' para el valor pH por procesar el medido valor pH del lodo  
50 148', que está fluyendo desde el cristizador 134 hacia la torre de absorción 132; valor éste que es recibido del sensor de pH 182 y está representado por el valor pH de lodo 183; procesamiento éste que es efectuado en conformidad con un algoritmo de control de calidad del yeso o con una tabla informativa dentro del modelo de control dinámico 870. Este algoritmo o la tabla informativa representan la establecida relación entre la calidad del yeso 160' y el medido valor pH 183.

El PID 180 genera la señal de control PID 181' por procesar la diferencia entre el punto de ajuste de pH SP186,  
55 recibido del controlador 1500A, y el medido valor de pH del lodo 148', recibido del sensor de valor pH 182 y representado por el valor pH de lodo 183; procesamiento éste que es efectuado en conformidad con un algoritmo de control del flujo de piedra caliza o con una tabla informativa. Este algoritmo o la tabla informativa representan la establecida relación entre la magnitud de variación en el volumen del lodo 141', que fluye desde el mezclador/depósito 140, y la magnitud de variación en el medido valor pH 183 del lodo 148', que esta fluyendo desde el cristizador 134 hacia  
60 la torre de absorción 132. Quizás sea oportuno mencionar aquí que, si bien en el ejemplo de la forma de realización, indicada en la Figura 16, la cantidad de piedra caliza triturada 174, que fluye del triturador 170 hasta el depósito mezclador 140A, está siendo manejada por un controlador separado (no indicado aquí), esta cantidad también podría ser controlada, si fuera necesario, por el MPCC 1500. Igualmente, el MPCC 1500 asimismo podría, en el caso de necesidad, controlar la entrega de unos aditivos al lodo dentro del depósito mezclador 140A, aunque esto no ha sido  
65 indicado aquí. Por consiguiente, en base al SP de pH 186', recibido del controlador 1500A en el MPCC 1500, el PID 180 genera una señal que hace que la válvula 199 se abre o se cierra, con lo cual se aumenta o se reduce el flujo de lodo de piedra caliza nuevo hacia el interior del cristizador 134. El PID sigue con el control del ajuste de la válvula hasta que el volumen del lodo de piedra caliza 141', que atraviesa la válvula 199, coincide con el punto de ajuste MVSP,

## ES 2 311 234 T3

representado por el punto de ajuste 196' del flujo de lodo de piedra caliza. Es evidente que esta coincidencia sea efectuada, de forma preferente, por un PID (no indicado aquí), que forma parte de la válvula 199. Como alternativa, esta coincidencia también podría ser efectuada, sin embargo, por el PID 180 sobre la base de los datos del volumen de flujo, determinados y transmitidos en retorno desde la válvula.

5

*Mantener el cumplimiento de los requisitos de la eliminación del SO<sub>2</sub>*

Por controlar el valor pH del lodo 148', el MPCC 1500 puede controlar la eliminación del SO<sub>2</sub> del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, y esto conjuntamente con la calidad del sub-producto del yeso 160', que es producido en el sub-sistema de WFGD. Aumentar el valor pH del lodo 148' por incrementar el lodo de piedra caliza nuevo 141', que pasa por la válvula 199, tendrá por resultado un aumento en la cantidad de SO<sub>2</sub>, eliminada por la torre de absorción 132 del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>. Por el otro lado, una reducción en el flujo de lodo de piedra caliza 141', que pasa por la válvula 199, produce, asimismo, una reducción en el valor pH del lodo 148'. También una reducción en la cantidad del SO<sub>2</sub> absorbido - que, ahora en la forma de sulfito, pasa hacia el cristalizador 134 - tendrá por resultado un mayor porcentaje de sulfito de calcio, que dentro del cristalizador 134 está siendo oxidado en sulfato de calcio, con lo cual se consigue una mayor calidad del yeso.

15

Por consiguiente, existe cierta tensión o contradicción entre dos objetivos primarios del control; el primer objetivo consiste en eliminar el SO<sub>2</sub> del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>, mientras que el segundo objetivo consiste en producir un sub-producto de yeso 160', que sea de la deseada calidad. Esto quiere decir que puede existir un conflicto de control entre cumplir, por una parte, los requisitos de la eliminación del SO<sub>2</sub> y cumplir las especificaciones del yeso, por la otra parte.

20

Nos referimos ahora también a la Figura 17, que indica más detalles sobre la estructura y el funcionamiento de las bombas de lodo 133 y de la torre de absorción 132. Según lo indicado, las bombas de lodo 133 comprenden una multitud de bombas separadas, indicadas en la forma de realización de este ejemplo como las bombas de lodo 133A, 133B y 133C, que bombean el lodo 148', procedente del cristalizador 134, hacia la torre de absorción 132. Tal como anteriormente mencionado en relación con la Figura 3, cada una de las bombas, 133A hasta 133C, dirige el lodo hacia un nivel distinto de una multitud de niveles de toberas de nivel de lodo 306A, 306B y 306C dentro de la torre de absorción. Cada una de las toberas de nivel de lodo, 306A hasta 306C, dirige el lodo hacia un distinto pulverizador de lodo, 308A, 308B y 308C, de estos múltiples niveles. Los pulverizadores de lodo, 308A hasta 308C, pulverizan el lodo - en este caso se trata del lodo 148' - al interior del gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub> y que entra en la torre de absorción 132 por la abertura de entrada 310 para que sea absorbido el SO<sub>2</sub>. A continuación, el gas depurado 116' es despedido de la torre de absorción 132 por la abertura de salida 312 de la misma. Tal como anteriormente descrito, un enjuague pulverizado ME 200 es dirigido hacia el interior de la torre de absorción 132. Ha de tenerse en cuenta que, si bien aquí están indicados tres niveles distintos de toberas y de pulverizadores de lodo así como tres bombas diferentes, el número de niveles de toberas y de pulverizadores así como la cantidad de bombas podrían, con toda probabilidad, variar en función de la particularidades de una implementación.

25

30

35

Según lo indicado en la Figura 15A, los valores del estado de bombas 1512 son retroalimentados desde los controles del estado de bombas 1511, como son los interruptores de conectado/desconectado, mientras que los valores de carga de bombas 1515 son retroalimentados desde los controles de carga de bombas 1514 - como puede ser, por ejemplo, un motor - al MPCC 1500 para su introducción en el modelo de control dinámico. Tal como aquí indicado, los puntos de ajuste 1513 del estado de bombas - como, por ejemplo, las instrucciones de conectar o de desconectar las mismas - son pasados hacia los controles del estado de bombas 1511, y los puntos de ajuste 1516 para la carga de bombas son pasados hacia los controles de la carga de bombas 1514 por parte del MPCC y con el fin de controlar el estado de las bombas, 133A hasta 133C - como, por ejemplo, conectadas o desconectadas - y controlar, de este modo, hacia cual de los niveles de toberas está siendo bombeado el lodo 148' así como la cantidad de lodo 148', que está siendo bombeada a cada uno de los niveles de toberas. Se comprenderá que, en la mayoría de las aplicaciones normales de la WFGD, las bombas de lodo 133 no incluyen la capacidad de variar la carga (sino ellas son solamente de conexión/desconexión); en este caso, los puntos de ajuste 1516 para la carga de la bomba y los controles de carga 1514 no estarían disponibles para el uso o el ajuste por parte del MPCC 1500.

40

45

50

Tal como detallado en el ejemplo de implementación, indicado en la Figura 17, los controles del estado de bombas 1511 comprenden un control del estado individual de cada bomba, identificados por llevar las referencias 1511A, 1511B y 1511C. Del mismo modo comprenden los controles de carga de bombas 1514 un control de carga individual de cada bomba, identificados por llevar las referencias 1514A, 1514B y 1514C. Los individuales valores del estado de bomba 1512A, 1512B y 1512C son transmitidos desde los controles del estado de bomba 1511A, 1511B y 1511C, respectivamente, al MPCC 1500 para indicar el estado actual de la bomba de lodo correspondiente. De forma análoga, los individuales valores de carga de bombas 1515A, 1515B y 1515C son transmitidos al MPCC 1500 desde los controles de carga de bombas 1514A, 1514B y 1514C, respectivamente, para indicar el estado actual de la bomba de lodo correspondiente. Sobre la base de los valores de estado de bombas 1512A, 1512B y 1512C, el MPCC 1500 activa la lógica de pronóstico 850 para determinar el estado actual de cada una de las bombas 133A, 133B y 133C y, por lo tanto, también determina lo que, por regla general, es conocido como la alineación entre las bombas, y esto en cualquier momento dado.

55

60

65

Tal como anteriormente mencionado, la relación entre la velocidad de flujo del todo líquido 148', que entra en la torre de absorción 132, y la velocidad de flujo del gas de escape 114, que también entra en la torre de absorción

## ES 2 311 234 T3

132, está caracterizada normalmente por el ratio LG. LG constituye unos de los parámetros clave en el diseño de los sub-sistemas de WFGD. Teniendo en cuenta que la velocidad de flujo del gas de escape 114, designado como G, es fijada corriente arriba de la unidad de procesamiento 130' de WFGD, normalmente por la operación del sistema de generación de energía 110, esta velocidad no está controlada, ni lo puede ser. Sin embargo, la velocidad de flujo del lodo líquido 148', designada como L, sí que puede ser controlada por el MPCC 1500 en base al valor de G.

Una manera en la que esto puede ser llevado a efecto, consiste en controlar el funcionamiento de las bombas de lodo 133A, 133B y 133C. Cada una de las bombas es controlada por el MPCC 1500 por emitir unos puntos de ajuste del estado de bombas 1513A, 1513B y 1513C hacia los controles de estado de bombas 1511A de la bomba 133A, 1511B de la bomba 133B y 1511C de la bomba 133C, respectivamente, para conseguir la deseada alineación entre las bombas y, por consiguiente, los niveles a los cuales entrará el lodo 148' en la torre de absorción 132. Al estar disponibles en el sub-sistema de WFGD, el MPCC 1500 también podría emitir unos puntos de ajuste de control de carga de bomba 1516A, 1516B y 1516C hacia los controles de carga de bombas 1514A de la bomba 133A, 1515B de la bomba 133B y 1514C de la bomba 133C, respectivamente, para conseguir el deseado volumen de flujo del lodo 148' hacia el interior de la torre de absorción 132 y a cada nivel de tobera activa. De esta manera, el MPCC 1500 regula la velocidad del flujo, o sea L, del lodo líquido 148' hacia la torre de absorción 132 por controlar hacia cual de los niveles de toberas, 306A hasta 306C, es bombeado el lodo 148' así como la cantidad de lodo 148', que es bombeada hacia cada nivel de toberas. Es evidente que, cuanto mayor sea el número de bombas y de niveles de toberas, tanto mayor será la precisión de este tipo de control.

Bompear el lodo 148' hacia las toberas del nivel superior 306A hará que el lodo, que es pulverizado desde los pulverizadores de lodo 308A, tenga un periodo de contacto relativamente largo con el gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>. Esto, en cambio, tendrá por resultado en la absorción una cantidad relativamente mayor del SO<sub>2</sub>, procedente del gas de escape 114, en este lodo y en comparación con el lodo, que entra en la torre de absorción a unos niveles de pulverización inferiores. Por el otro lado, bompear el lodo hacia las toberas de un nivel inferior - como, por ejemplo, el nivel de las toberas 306C - hará que el lodo 148', que es pulverizado desde los pulverizadores de lodo 308C, tenga un periodo de contacto relativamente más corto con el gas de escape 114, que está cargado del SO<sub>2</sub>. En la absorción, esto tendrá por resultado una cantidad relativamente más pequeña del SO<sub>2</sub>, procedente del gas de escape 114, en el lodo. Por consiguiente, la cantidad del SO<sub>2</sub> eliminado del gas de escape 114 será - con la misma cantidad y con la misma composición del lodo 148' - mayor o menor en función del nivel hacia el cual sea bombeado el lodo.

Sin embargo, el bombeo del lodo líquido 148' hacia toberas de un nivel más elevado - como, por ejemplo, hacia las toberas 306A - requiere más energía y, por lo tanto, unos mayores costos de operación en comparación con la energía y los costos, que son necesarios para bompear el lodo líquido 148' hacia las toberas de un nivel inferior como, por ejemplo, hacia las toberas 306C. De este modo, por bompear más lodo líquido hacia las toberas de un nivel más elevado - con el fin de incrementar la absorción y, por consiguiente, la eliminación de azufre del gas de escape 114 - quedan incrementados los costos de la operación del sub-sistema de WFGD.

Las bombas, 133A hasta 133C, constituyen un equipo rotatorio extremadamente grande. Estas bombas pueden ser puestas en marcha y paradas de automáticamente por el MPCC 1500 por emitir éste unos puntos de ajuste SPs del estado de bomba o de forma automática por el operario o por el usuario del sub-sistema. Al ser modificada la velocidad de flujo del gas de escape 114 - que entra en la torre de absorción 132 - a causa de un cambio en la operación del sistema de generación de energía 110, el MPCC 1500 ajustará, por activar la lógica de pronóstico 850 de acuerdo con el modelo de control dinámico 870 así como la lógica generadora de control 860, el funcionamiento de una o de varias de las bombas de lodo, 133A hasta 133C. Por ejemplo, si la velocidad de flujo del gas de escape cayera el 50% de la carga prevista, el MPCC podría emitir uno o más puntos de ajuste del estado de bombas para parar - es decir, desconectar - una o varias bombas que actualmente estén bombeando el lodo 148' hacia las toberas de la torre de absorción a uno o a varios niveles de pulverización, y/o emitir uno o varios puntos de ajuste de control de carga de las bombas para reducir la carga de una o de varias de las bombas, que actualmente estén bombeando el lodo hacia las toberas de la torre de absorción a uno o a varios niveles de pulverización.

Además, al estar previsto un distribuidor (no indicado aquí) para el ácido orgánico - u otra sustancia similar - como parte integrante del mezclador/bomba 140 o como un sub-sistema separado, que aporta el ácido orgánico directamente al proceso, el MPCC 1500 puede emitir - también o como alternativa - unas señales de control del punto de ajuste SP (no indicado aquí) para reducir la cantidad de ácido orgánico, o del otro aditivo similar que está siendo aportado al lodo, para reducir la capacidad de absorción del todo y, por lo tanto, para eliminar el SO<sub>2</sub> del gas de escape. Ha de ser admitido, que estos aditivos suelen ser bastante caros, por lo cual el uso de los mismos es ahora relativamente limitado, por lo menos en los Estados Unidos. Otra vez, existe un conflicto entre la eliminación del SO<sub>2</sub> y los costos de operación, los aditivos son caros, pero ellos pueden mejorar significativamente la eliminación del SO<sub>2</sub> con poco o con ningún impacto sobre la pureza del yeso. Al incluir el sub-sistema de WFGD un sub-sistema para la inyección de aditivos, el mismo podría, por consiguiente, estar en condiciones de permitir al MPCC 1500 controlar la inyección de aditivos de una manera concertada con las otras variables del proceso de WFGD, de tal modo que el MPCC 1500 pueda hacer funcionar el proceso WFGD a los más reducidos costos de operación, estando todavía dentro de las limitaciones impuestas por el equipo, por el proceso así como por las autorizaciones administrativas. Por introducir los costos de estos aditivos al MPCC 1500, este factor de costos puede quedar incluido en el modelo de control dinámico y ser tenido en consideración por la lógica de pronóstico, siendo la misma activada para dirigir el control del proceso de WFGD.

## ES 2 311 234 T3

### *Evitación de la obstrucción de piedra caliza*

Tal como anteriormente mencionado, con el fin de oxidar el absorbido  $\text{SO}_2$  para formar el yeso, por el interior de la torre de absorción 12 ha de tener lugar una reacción química entre el  $\text{SO}_2$  y la piedra caliza dentro del lodo. Durante esta reacción química, el oxígeno es consumido para constituir el sulfato de calcio. El gas de escape 114, que entra en la torre de absorción 132, es pobre en  $\text{O}_2$ , por lo cual es añadido normalmente un oxígeno adicional al lodo líquido, que fluye hacia la torre de absorción 132.

Nos referimos ahora también a la Figura 18 que muestra un soplador 50, que está caracterizado normalmente por ser un ventilador, que comprime el aire 152. El resultante aire comprimido de oxidación 154' es dirigido hacia el cristalizador 134 para aquí ser aplicado sobre el lodo dentro del cristalizador 134, el cual será bombeado hacia el absorbedor 132, tal como anteriormente descrito en relación con la Figura 17. La aportación del aire comprimido de oxidación 154' al lodo dentro del cristalizador 134 tiene por resultado un lodo reciclado 148', que fluye desde el cristalizador 134 hacia el absorbedor 132 y que tienen un mejorado contenido en oxígeno, lo cual facilitará la oxidación y, por consiguiente, la formación de sulfato de calcio.

De forma preferente, existe un exceso de oxígeno dentro del lodo 148', aunque tenga que ser reconocido que hay un límite superior para la cantidad de oxígeno, que puede ser absorbida del lodo o ser mantenida en el mismo. Para facilitar la oxidación, es conveniente dejar operar la WFGD con una significativa cantidad de exceso de  $\text{O}_2$  dentro del lodo.

También debe ser tenido en cuenta que, al hacerse excesivamente baja la concentración del  $\text{O}_2$  dentro del lodo, se reducirá también la reacción química entre el  $\text{SO}_2$  dentro del gas de escape 114 y la piedra caliza dentro del lodo 148' y, dado el caso, esta reacción puede pararse. Al producirse esto, se habla normalmente de una obstrucción de piedra caliza.

No constituye un parámetro medible la cantidad del  $\text{O}_2$ , que está disuelto dentro del lodo reciclable por el interior del cristalizador 134. Por consiguiente, el modelo de estimación dinámico 880 comprende preferentemente un modelo del  $\text{O}_2$  disuelto dentro del lodo. La lógica de estimación - como, por ejemplo, la lógica de estimación 840, que es activada por el estimador 1500B del MPCC 1500 en conformidad con el modelo de estimación dinámico 880 - computa un valor estimado del  $\text{O}_2$  disuelto dentro del lodo reciclable y dentro del cristalizador 134. Este estimado valor computado es pasado al controlador 1500A del MPCC 1500, el cual emplea este computado valor estimado para actualizar el modelo de control dinámico, es decir, el modelo de control dinámico 870. El controlador 1500A activa después la lógica de pronóstico - como, por ejemplo, la lógica de pronóstico 850 - que compara el estimado valor de  $\text{O}_2$  disuelto en el lodo con una limitación del valor del  $\text{O}_2$  disuelto en el todo, la cual había sido introducida en el MPCC 1500. La limitación del valor del  $\text{O}_2$  disuelto en el lodo representa una de las limitaciones 1555 que están indicadas en la Figura 15B, y la misma está representada con más detalles en la Figura 19 como el requisito 1926 para el  $\text{O}_2$  disuelto dentro del lodo.

En base al resultado de la comparación, el controlador 1500A - que todavía está activando la lógica de pronóstico - determina si en el funcionamiento del sub-sistema 130' de la WFGD es necesario algún ajuste, con el fin de asegurar que el lodo 148', que está siendo bombeado hacia la torre de absorción 132, no se vuelva pobre en  $\text{O}_2$ . Ha de ser tenido en consideración, que el hecho de asegurar que el lodo 148' tenga una cantidad suficiente de  $\text{O}_2$  disuelto en el mismo ayuda también en asegurar, que las emisiones del  $\text{SO}_2$  y la calidad del sub-producto del yeso sigan cumpliendo con las limitaciones en cuanto a las emisiones y la necesaria calidad.

Según lo indicado en las Figuras 15A y 18, el soplador 150 comprende un mecanismo controlador de carga 1501, que también es denominado mecanismo controlador de velocidad del soplador, y el mismo puede ajustar el flujo del aire de oxidación hacia el cristalizador 134. Este mecanismo controlador de carga 1501 puede ser empleado para regular la carga del soplador 150 y, por lo tanto, controlar la cantidad de aire comprimido de oxidación 154', que entra en el cristalizador 134, y facilitar, de este modo, cualquier ajuste necesario en las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD a la vista del resultado de la comparación. De forma preferente, el funcionamiento del mecanismo controlador de carga 1501 es controlado directamente por el controlador 1500A. No obstante, al ser esto deseado, el mecanismo controlador de carga 1501 también puede ser controlado manualmente por un operario del sub-sistema, y esto en base a una salida del controlador 1500A, la cual instruye al operario a efectuar el apropiado control manual de este mecanismo controlador de carga. En cualquiera de los dos casos, y basado en el resultado de la comparación, el controlador 1500A activa la lógica de pronóstico 850 - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 - para determinar si es necesario efectuar un ajuste en la cantidad del aire comprimido de oxidación 154', la que entra en el cristalizador 134, con el fin de asegurar que el lodo 148', que está siendo bombeado hacia la torre de absorción 132, no se pueda volver pobre en  $\text{O}_2$  y, en este supuesto, efectuar el ajuste en la cantidad. A continuación, el controlador 1500A activa - a la vista del valor de carga  $\text{ISO}_2$ , recibido por el MPCC 1500 desde el mecanismo controlador de carga 1501 - la lógica generadora de control como, por ejemplo, la lógica generadora de control 860, para generar unas señales de control a los efectos de dirigir el mecanismo controlador de carga 1501 para modificar la carga del soplador 150 con el fin de ajustar la cantidad del aire comprimido de oxidación 154', que entra en el cristalizador 134, a una cantidad deseada que pueda asegurar que no se vuelva pobre en  $\text{O}_2$  el lodo 148', que está siendo bombeado hacia la torre de absorción 132.

## ES 2 311 234 T3

Como ya ha sido indicado anteriormente, el empobrecimiento en  $O_2$  es de especial preocupación en los meses del verano, al reducir el calor la cantidad de aire comprimido de oxidación 154', que por el soplador 150 ha de ser forzada hacia el interior del cristalizador 134. La lógica de pronóstico 850, activada por el controlador 1500A, puede determinar, por ejemplo, si la velocidad o la carga del soplador 150 - la cual es introducida al MPCC 1500 como el valor de carga  $ISO_2$  del soplador - debe ser ajustada para incrementar, por una cantidad dada, el volumen del aire comprimido de oxidación 154', que está entrando en el cristalizador 134. La lógica generadora de control, siendo activada por el controlador 1500A, determina después la carga de soplador 1503, que tendrá como resultado el deseado aumento en el volumen del aire comprimido de oxidación 154'. De forma preferente, la carga de soplador 1503 es transmitida por el MPCC 1500 al mecanismo controlador de carga 1501, que dirige un incremento en la carga del soplador 150, el cual corresponde a la carga de soplador 1503, con lo cual queda impedida una obstrucción de piedra caliza y que, además, tanto las emisiones de  $SO_2$  como la calidad del sub-producto yeso se encuentren dentro de las limitaciones aplicables.

Es evidente, que la velocidad o la carga del soplador 150 también incrementarán el consumo de energía del soplador y, por consiguiente, el conjunto de los costos de operación del sub-sistema de WFGD 130'. Este incremento en los costos también es controlado, de forma preferente, por el MPCC 1500 al monitorizar éste las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD, proporcionando al mismo tiempo un incentivo económico por controlar el soplador 150 para dirigir la necesaria cantidad de aire comprimido de oxidación 154' hacia el interior del cristalizador 134.

Según lo indicado en la Figura 19, la relación entre costos efectivos/unidad de energía, representada como costo de unidad de energía 1906, es preferentemente introducida en el MPCC 1500 como una de las entradas 1550, no directamente relacionadas con el proceso e indicadas en la Figura 15B, y la misma está incluida en el modelo de control dinámico 870. Por usar esta información, el controlador 1500A del MPCC 1500 puede también computar y visualizar al operario del sub-sistema o a otros usuarios una modificación en los costos de la operación, la cual está basada en el flujo del aire comprimido de oxidación 154' hacia el cristalizador 134.

Por consiguiente, y suponiendo que haya un exceso en la capacidad del soplador 150, el controlador 1500A controlará normalmente el flujo del aire comprimido de oxidación 154' hacia el cristalizador 134 para así asegurar, que este flujo sea suficiente para impedir una obstrucción de piedra caliza. Sin embargo, al estar el soplador 150 trabajando a plena carga y al ser todavía insuficiente, para evitar la obstrucción, la cantidad de aire comprimido de oxidación 154', que fluye hacia el cristalizador 134 - es decir, es necesaria la adición de aire (oxígeno) para la oxidación de todo el  $SO_2$ , que está siendo absorbido dentro de la torre de absorción 12 - el controlador 1500A tendrá que implementar una estrategia alternativa de control. En relación con ello, una vez que el  $SO_2$  haya sido absorbido hacia el interior del lodo, el mismo tiene que ser oxidado para formar el yeso; sin embargo, al no disponerse del oxígeno adicional para oxidar el  $SO_2$  restante, lo mejor es no absorber el  $SO_2$ , habida cuenta de que el  $SO_2$  absorbido no puede ser oxidado, y eventualmente puede producirse la obstrucción de piedra caliza.

En estas circunstancias, el controlador 1500A tiene otra opción para que no pueda producirse la obstrucción, la cual puede ser aplicada al controlarse el funcionamiento del sub-sistema de WFGD 130'. Más concretamente, el controlador 1500A - por activar la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control dinámico 870, así como la lógica generadora de control 860 - puede controlar el PID 180 para regular el nivel pH del lodo 141', que fluye hacia el cristalizador 134, y controlar, de este modo, también el nivel pH del lodo 148', que está siendo bombeado hacia la torre de absorción 132. Por gestionar un incremento del valor pH del lodo 148', que está siendo bombeado hacia la torre de absorción 132, será reducida la absorción del adicional  $SO_2$  restante y quedará impedida la obstrucción.

Todavía otra estrategia alternativa, que puede ser implementada por el controlador 1500A, consiste en operar por fuera de las limitaciones 1555, indicadas en la Figura 15B. Concretamente, el controlador 1500A podría implementar una estrategia de control, bajo la cual no es oxidada la máxima cantidad posible del  $SO_2$  en el lodo 148' dentro del cristalizador 134. De forma correspondiente, se reducirá la cantidad del  $O_2$ , la que es necesaria dentro del cristalizador 134. Esta acción mermará, sin embargo, la pureza del sub-producto de yeso 160', generado por el sub-sistema de WFGD 130'. Aplicando esta estrategia, el controlador 1500A sobrepasará - durante el control del funcionamiento del sub-sistema de WFGD 130' - una o varias de las limitaciones 1555. El controlador mantiene, de forma preferente, las severas limitaciones para la emisión del  $SO_2$  dentro del gas de escape 116', la cual está indicada en la Figura 19 como el requisito 1922 del permiso de emisión de  $SO_2$  pero el mismo no llegará a cumplir la especificada pureza del sub-producto de yeso 160' - bajándola, efectivamente - la cual está representada en la Figura 18 como el requisito de pureza de yeso 1924.

Por consiguiente, una vez alcanzado el límite de la máxima capacidad del soplador, el controlador 1500A puede controlar el funcionamiento del sub-sistema 130' de la WFGD para reducir el valor pH del lodo 148', que entra en la torre de absorción 132, y con ello reducir la absorción del  $SO_2$  hasta el límite de emisión, es decir, hasta el requisito de permiso de salida de  $SO_2$ , 1922. Sin embargo, si se presenta cualquier otra reducción en la absorción del  $SO_2$  y produce una violación del requisito de permiso de salida de  $SO_2$  1922, así como al existir una insuficiente capacidad del soplador para proporcionar la cantidad de aire (oxígeno) necesaria para oxidar todo el absorbido  $SO_2$ , que ha de ser eliminado, el equipo físico - por ejemplo, el soplador 150 y/o el cristalizador 134 - queda infra-dimensionado, y no es posible casar el requisito de la eliminación del  $SO_2$  con el requisito de la pureza del yeso. Teniendo en cuenta que el MPCC 1500 no puede "crear el necesario oxígeno adicional", el mismo ha de tener en consideración una estrategia alternativa. Bajo esta estrategia alternativa, el controlador 1500A controlará el funcionamiento del sub-

## ES 2 311 234 T3

sistema de WFGD 130' para mantener el actual nivel de eliminación de SO<sub>2</sub>, es decir, para cumplir el requisito de permiso de salida de SO<sub>2</sub>, 1922, y para producir un yeso que cumple con una relajada limitación de pureza de yeso, es decir, cumplir un requisito de pureza de yeso, que es inferior al introducido requisito de pureza de yeso 1924. De una manera conveniente, el controlador 1500A reduce al mínimo la desviación entre el requisito de la reducida pureza de yeso y el deseado requisito de pureza de yeso 1924. Ha de tenerse en cuenta, que todavía otra alternativa más consiste para el controlador 1500A en el control del funcionamiento del sub-sistema de WFGD 130', concretamente de acuerdo con una estrategia híbrida, que implementa los aspectos de las dos alternativas anteriormente descritas. Todas estas alternativas de las estrategias de control pueden ser implementadas por establecer dentro del MPCC 1500 unos parámetros de reglaje estándar.

### Operaciones del controlador MPCC

Tal como anteriormente descrito, el MPCC 1500 tiene la capacidad de controlar grandes sub-sistemas de WFGD para su aplicación dentro del sector de la generación de energía, y aquí dentro de un distribuido sistema de control (DCS). Los parámetros, que pueden ser regulados por el MPCC 1500, son prácticamente ilimitados; sin embargo, los mismos comprenden, preferentemente, uno o varios de los parámetros siguientes. (1) El valor pH del lodo 148', que entra en la torre de absorción 132; (2) la alineación entre las bombas de todo, que suministran el todo líquido 148' a los distintos niveles de la torre de absorción 132; así como (3) la cantidad del aire comprimido de oxidación 154', la que entra en el cristizador 134. Es evidente que es el modelo de control dinámico 870, el que contiene las relaciones básicas del proceso, las que serán aplicadas por el MPCC 1500 para dirigir el control del proceso de la desulfuración WFGD. Por consiguiente, las relaciones establecidas dentro del modelo de control dinámico 870 son de importancia primordial para el MPCC 1500. Con respecto a ello, el modelo de control dinámico 870 pone en relación varios parámetros - como, por ejemplo, los niveles del valor pH y del aire de oxidación - con las respectivas limitaciones o requisitos, por ejemplo, los niveles de la pureza del yeso y de la eliminación de SO<sub>2</sub>, y son concretamente estas relaciones las que permiten un control dinámico y flexible del sub-sistema de WFGD 130', tal como esto se describe a continuación.

La Figura 19 muestra con más detalles los preferidos parámetros y las limitaciones o requisitos, que son introducidos para ser empujados por el controlador 1.500A del regulador MPCC 1500. Tal como esto será descrito detalladamente más abajo, el controlador 1500A activa una lógica de pronóstico - como, por ejemplo, la lógica de pronóstico 850 - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 así como en base a los parámetros y a las limitaciones o requisitos introducidos, para así pronosticar los estados futuros del proceso de WFGD y para dirigir el control del sub-sistema 130' de WFGD, con el objeto de optimizar este proceso de WFGD. El controlador 1500A activa después una lógica generadora de control - como, por ejemplo, la lógica generadora de control 860 - en conformidad con las directrices de control procedentes de la lógica de pronóstico, para generar y emitir unas señales de control con el fin de controlar unos elementos específicos del sub-sistema 130' de la WFGD.

Según lo anteriormente indicado en relación con la Figura 15B, los parámetros introducidos incluyen los parámetros medidos de proceso 1525; los parámetros 1550 no directamente relacionados con el proceso; las limitaciones 1555 del proceso WFGD; así como los parámetros estimados 1560, computados por el estimador 1500B del MPCC por activar una lógica de estimación - como, por ejemplo la lógica de estimación 840 - en conformidad con el modelo de estimación dinámico 880.

Según la preferida implementación, indicada en la Figura 19, los parámetros medidos de proceso 1525 comprenden las condiciones de ambiente 1520; la carga medida 1509 del sistema de generación (PGS); la medida entrada de SO<sub>2</sub> 189; el valor de carga de soplador 1SO<sub>2</sub>; el medido valor pH de lodo 183; la medida salida de SO<sub>2</sub> 1505; la pureza de yeso medida por laboratorio 1506; los valores de estado 1512 de las bombas del lodo; así como los valores de carga 1515 de las bombas del lodo. Las limitaciones 1555 del proceso de WFGD comprenden el requisito de permiso de emisión de SO<sub>2</sub> 1922; el requisito de pureza de yeso 1924; el requisito de O<sub>2</sub> disuelto en lodo 1926; y el requisito de valor pH del lodo 1928. Las entradas 1550, no directamente relacionadas con el proceso, comprenden los factores de reglaje 1902; el actual precio de crédito de emisiones SO<sub>2</sub> 1904; el actual costo de unidad de energía 1906; el actual costo de ácido orgánico 1908; el actual precio de venta de yeso 1910; y los futuros planes de operación 1950. Los estimados parámetros 1560, computados por el estimador 1500B, comprenden la calculada pureza de yeso 1932; el calculado O<sub>2</sub> disuelto en lodo 1934; así como el calculado valor pH de lodo 1936. Debido a la inclusión de entradas de unos parámetros no directamente relacionados con el proceso - como, por ejemplo, el actual costo de unidad de energía 1906 - el MPCC 1500 puede dirigir el control del sub-sistema 130' de la WFGD no solamente en base al estado momentáneo del proceso, sino también en base al estado de otros aspectos, que se producen fuera del proceso.

### Determinar la disponibilidad de la adicional capacidad de absorción del SO<sub>2</sub>

Tal como anteriormente mencionado haciendo referencia a la Figura 17, el MPCC 1500 puede regular el estado y la carga de las bombas, 133A hasta 133C, y puede con ello controlar el flujo de lodo 148' hasta los distintos niveles de la torre de absorción 132. El MPCC 1500 también puede computar el actual consumo de energía de las bombas 133A hasta 133C en base a los actuales valores de alineación y de carga de bombas, 1515A hasta 1515C, como asimismo puede computar el actual costo de operación para las bombas, basado en el computado consumo de energía y en el costo de unidad de energía 1906.

## ES 2 311 234 T3

El MPCC 1500 está preferentemente configurado para activar la lógica de pronóstico 850 - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 y en base a los actuales valores de estado de bombas, 1512A hasta 1512C, así como a los actuales valores de carga de bombas 1515A hasta 1515C - para determinar la disponibilidad de la capacidad adicional de las bombas, 133A hasta 133C. A continuación el MPCC 1500 fija - en base a la determinada magnitud de la disponible capacidad adicional - la cantidad adicional del SO<sub>2</sub>, que puede ser eliminado por ajustarse el funcionamiento de las bombas, por ejemplo, mediante un reglaje en una bomba para modificar la alineación entre las bombas o bien por incrementar la energía aportada a otra bomba.

### *Determinar la adicional cantidad de SO<sub>2</sub>, disponible para la eliminación*

Según lo indicado anteriormente, la carga 1509 del sistema de generación de energía (PGS) 110 es detectada - adicionalmente a la medida composición de SO<sub>2</sub> de entrada 189, que es detectada por el sensor 188 - de forma preferente a través de un sensor de carga 1508, y la misma es introducida en el MPCC 1500 como un parámetro medido. La carga PGS 1509 puede representar, por ejemplo, una medida de BTUs (Unidades Térmicas Británicas) del carbón, que está siendo consumido en el sistema de generación de energía 110, o puede representar la magnitud de energía que está siendo generada por este sistema. No obstante la carga PGS 1509 también podría representar otro parámetro del sistema de generación de energía 110 o bien del asociado proceso de generación de energía, siempre que la medición de un tal otro parámetro corresponda razonablemente a la carga de entrada de gas de escape como, por ejemplo, a algún parámetro del sistema o del proceso de generación de energía mediante la combustión de carbón, el cual refleje de manera razonable la cantidad de entrada de gas de escape, que pasa el sub-sistema de WFGD 130'.

El MPCC 1500 está configurado preferentemente para activar la lógica de pronóstico 850, en conformidad con el modelo de control 870, y para determinar la carga del gas de escape entrante, es decir, el volumen o la masa de la entrada del gas de escape 114 por la torre de absorción 132, la cual representa la carga PGS 1509. El MPCC 1500 puede, por ejemplo, computar la carga de gas de escape de entrada por la torre de absorción 132, la cual está basada en la carga PGS 1509. Como alternativa, la propia carga PGS 1509 podría servir como la carga de gas de escape de entrada, en cuyo caso no hace falta ninguna computación. En cualquiera de estos casos, el MPCC 1500 determinará entonces la cantidad adicional de SO<sub>2</sub> que está disponible para su eliminación del gas de escape 114, basada en la medida composición del SO<sub>2</sub> de entrada 189, en la carga de gas de escape de entrada y en la medida salida del SO<sub>2</sub>, 1505.

Ha de tenerse en cuenta, que la carga de gas de escape de entrada también podría ser medida directamente para ser introducida en el MPCC 1500, al ser esto deseado. Quiere decir esto, que la medición efectiva del volumen o de la masa del gas de escape de entrada 114, que está siendo dirigido hacia la torre de absorción 132, podría - como una opción - ser detectado por un sensor (no indicado aquí), que está situado corriente arriba de la torre de absorción 132 y corriente debajo de otro sub-sistema de control de contaminación de aire (APC) 122, para ser aportado al MPCC 1500. En este caso, no habría ninguna necesidad de que el MPCC 1500 determine la carga de gas de escape de entrada que corresponda a la carga PGS 1509.

### *Limitaciones de la eliminación del SO<sub>2</sub> en las emisiones instantáneas y en las emisiones de tipo medio rotativo*

Tal como mencionado en relación con la Figura 12, una base de datos 1210 sobre el histórico del proceso comprende una base de datos 890 del histórico de las emisiones del SO<sub>2</sub>, la cual ha sido descrita, por ejemplo, con referencia a la Figura 8. La base de datos 1210 del histórico del proceso está conectada al MPCC 1500. Ha de tenerse presente, que el MPCC 1500 podría ser, por ejemplo, del tipo indicado en la Figura 8 o bien podría ser un regulador de fases múltiples tal como, por ejemplo, el regulador de dos fases que está representado en la Figura 10.

La base de datos 890 del histórico de las emisiones de SO<sub>2</sub> guarda los datos que representan las emisiones de SO<sub>2</sub>, no solamente en términos de la composición del SO<sub>2</sub>, sino también en libras o peso del SO<sub>2</sub> emitido durante el último periodo medio rotativo. Por consiguiente, adicionalmente a tener un acceso a la información que representa las actuales emisiones de SO<sub>2</sub> a través de la introducida salida medida de SO<sub>2</sub> 1505 desde el analizador de SO<sub>2</sub> 1504, por el hecho de conectar el MPCC 1500 con esta base de datos 1210 del histórico del proceso, el mismo también tiene acceso a la información histórica que representa las emisiones del SO<sub>2</sub>, es decir, a la medida salida de SO<sub>2</sub> durante la última ventana de tiempo del valor medio rotativo por medio de la base de datos 890 del histórico de las emisiones del SO<sub>2</sub>. Ha de tenerse en cuenta que, si bien las actuales emisiones del SO<sub>2</sub> corresponden a un solo valor, las emisiones del SO<sub>2</sub> por la última ventana de tiempo del valor medio rotativo corresponden a un movimiento dinámico de las emisiones del SO<sub>2</sub> durante el periodo de tiempo aplicable.

### *Determinar la disponibilidad de una adicional capacidad de oxidación del SO<sub>2</sub>*

Según lo indicado en la Figura 19 y conforme a lo mencionado anteriormente, las entradas al MPCC 1500 son unos valores medidos de (1) la salida de SO<sub>2</sub> 1505; (2) la medida carga del soplador 1SO<sub>2</sub>, la que corresponde a la cantidad de aire de oxidación que entra en el cristalizador 134; (3) los valores de estado de bombas de todo 1512, es decir, la alineación de bombas, y los valores de carga de bombas de lodo 1515, que corresponden a la cantidad de lodo de piedra caliza, que fluye hacia la torre de absorción 132; y (4) el medido valor pH del lodo que fluye hacia la torre de absorción 132. Adicionalmente, las entradas al MPCC 1500 representan unos requisitos de limitación en cuanto a (1) la pureza 1924 del sub-producto de yeso 160'; (2) al O<sub>2</sub> disuelto 1926 en el lodo dentro del cristalizador 134, el cual corresponde a la cantidad de O<sub>2</sub> disuelto dentro del lodo, la que es necesaria para asegurar la suficiente oxidación y para impedir

## ES 2 311 234 T3

la obstrucción de la piedra caliza; así como (3) la salida de SO<sub>2</sub> 1922 dentro del gas de escape 116', que abandona el sub-sistema 130' de la WFGD. Actualmente, el requisito del permiso de salida de SO<sub>2</sub> 1922 comprende normalmente unas limitaciones, tanto para las emisiones instantáneas del SO<sub>2</sub> como para las emisiones medias rotativas del SO<sub>2</sub>. También son introducidas en el MPCC 1500 unas entradas, que no están directamente relacionadas con el proceso, como pueden ser (1) el costo de unidad de energía 1906 como, por ejemplo, el costo de una unidad de electricidad; y (2) el valor actual o el valor anticipado de un precio de crédito de emisiones de SO<sub>2</sub> 1904, que representa el precio al cual puede ser vendido un crédito administrativo de las emisiones. El MPCC 1500 computa, además, las estimación de (1) la actual pureza 1932 del sub-producto de yeso 160'; el O<sub>2</sub> disuelto 1934 en el lodo dentro del catalizador 134; y (3) el valor pH 1936 del lodo, que fluye hacia la torre de absorción 132.

El MPCC 1500 - que activa la lógica de pronóstico en conformidad con el modelo de lógica dinámico - procesa estos parámetros con el fin de determinar la cantidad de SO<sub>2</sub>, que se encuentra en reacción en el lodo dentro de la torre de absorción 132. Sobre la base de esta determinación, el MPCC 1500 puede determinar seguidamente la cantidad del O<sub>2</sub> no disuelto, la cual permanece disponible en el lodo dentro del cristizador 134 a efectos de la oxidación del sulfito de calcio en sulfato de calcio.

### *Determinar si ha de ser aplicada la adicional capacidad disponible*

Si el MPCC 1500 ha determinado, que está disponible una capacidad adicional para absorber el SO<sub>2</sub> y para someterlo a la oxidación y que está disponible, además, un adicional SO<sub>2</sub> para la eliminación, el MPCC 1500 está configurado, de forma preferente, para activar la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control dinámico 870 para determinar si se debe controlar o no controlar el sub-sistema de WFGD 130' con el fin de ajustar las operaciones a los efectos de eliminar del gas de escape 114 el SO<sub>2</sub> que está adicionalmente disponible. Para efectuar esta decisión, el MPCC 1500 puede, por ejemplo, determinar si la generación y la venta de estos créditos de emisión de SO<sub>2</sub> incrementarán el beneficio de las operaciones del sub-sistema de WFGD 130', habida cuenta de que puede resultar más beneficioso modificar las operaciones, en vez de eliminar el adicional SO<sub>2</sub> hasta más allá de los requisitos según el permiso de operaciones, concedido por la competente entidad administrativa, es decir, eliminarlo hasta más allá de lo impuesto por el requisito de permiso de salida de SO<sub>2</sub> 1922, y vender los resultantes créditos administrativos de emisiones, que podrán ser obtenidos.

En particular, el MPCC 1500, al activar la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control dinámico 870, determinará los cambios necesarios en el funcionamiento del sub-sistema 130' de la WFGD para incrementar la eliminación del SO<sub>2</sub>. En base a esta determinación, el MPCC 1500 también determinará el número de los resultantes créditos administrativos de emisiones, que podrán ser conseguidos. Sobre la base de los cambios determinados en las operaciones y en base al costo actual o costo anticipado de la electricidad - por ejemplo, el costo de unidad de energía 1906 - el MPCC 1500 determinará, además, el resultante costo adicional de la electricidad, necesaria para los cambios en el funcionamiento del sub-sistema 130' de WFGD, que han sido determinados como necesarios. Sobre la base de estas posteriores determinaciones así como en base al actual o al anticipado precio de estos créditos de emisión - por ejemplo, el precio de crédito de SO<sub>2</sub> 1904 - el MPCC 1500 fijará también si el costo para generar los adicionales créditos administrativos de emisión es mayor que el precio, al cual puede ser vendido un crédito de esta clase.

Si, por ejemplo, está bajo el precio del crédito, no pueden ser ventajosas la generación ni la venta de los créditos adicionales. En lugar de ello, la eliminación del SO<sub>2</sub> al mínimo nivel necesario para así cumplir con el permiso de operaciones, concedido por la competente entidad administrativa, reducirá al mínimo el costo y, por consiguiente, incrementará al máximo la rentabilidad de las operaciones del sub-sistema 130' de la WFGD, teniendo en cuenta que resulta más beneficioso eliminar solamente la cantidad del SO<sub>2</sub>, la cual es necesaria para cumplir de forma mínima con el requisito del permiso de salida de SO<sub>2</sub> 1922 según la autorización concedida por la competente entidad administrativa. Si los créditos de emisiones ya están siendo generados según las actuales operaciones del sub-sistema de WFGD, el MPCC 1500 puede incluso dirigir unos cambios directos en el funcionamiento del sub-sistema 130' de la WFGD, con el objeto de aumentar la eliminación del SO<sub>2</sub> y, por lo tanto, para cualquier generación adicional de los créditos de emisión de SO<sub>2</sub> y reducir, de este modo, los costos de electricidad y, por consiguiente, aumentar la rentabilidad de las operaciones.

### *Establecimiento de prioridades en las operaciones*

Según también está indicado en la Figura 19, el regulador MPCC 1500 asimismo está configurado, de forma preferente, para poder recibir unos factores de reglaje 1902 como otra de las entradas 1550, que no están directamente relacionadas con el proceso. El MPCC 1500 - al activar la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control dinámico 870 y con los factores de reglaje 1902 - puede establecer unas prioridades entre las variables de control empleando para ello, por ejemplo, unas respectivas ponderaciones para cada una de las variables de control.

En relación con ello, son preferentemente las limitaciones 1555 las que, en su caso, establecerán un ámbito necesario para cada requerido parámetro de limitación. De este modo, por ejemplo, el requisito del permiso de salida de SO<sub>2</sub> 1922, el requisito de la pureza de yeso 1924, el requisito del O<sub>2</sub> disuelto 1926 y el requisito del valor pH en el lodo 1928 tendrán cada uno sus límites superiores e inferiores, y el MPCC 1500 mantendrá las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD dentro del ámbito, que está basado en los factores de reglaje 1902.

## ES 2 311 234 T3

### *Evaluación del futuro proceso de desulfuración WFGD*

El MPCC 1500 - que activa la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control lógico 870 - evalúa, preferentemente en primer lugar, el estado actual de las operaciones del proceso, tal como mencionado anteriormente. Sin embargo, esta evaluación no tiene porque terminar aquí. El MPCC 1500 también está configurado, de forma preferente, para activar la lógica de pronóstico 850 - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 - para evaluar hacia donde irán las operaciones del proceso si no se realizan cambios en las operaciones del sub-sistema de WFGD 130'.

Más concretamente, el MPCC 1500 evalúa el estado futuro de las operaciones del proceso en base a las relaciones dentro del modelo de control dinámico 870 y dentro de los datos históricos del proceso, guardados en la base de datos 1210 del histórico de procesos. Los datos históricos del proceso incluyen los datos de la base de datos del histórico del SO<sub>2</sub>, al igual que otros datos, que representan lo que se había producido anteriormente dentro del proceso de WFGD durante un periodo de tiempo previamente definido. Como parte de esta evaluación, el MPCC 1500 determina el actual camino, en el cual está funcionando el sub-sistema 130' de WFGD y, por consiguiente, determina el futuro valor de distintos parámetros, asociados al proceso de WFGD, al no ser efectuado ningún cambio en las operaciones.

Tal como esto lo saben las personas familiarizadas con este ramo técnico, el MPCC 1500 determina - con preferencia en una manera similar a la que anteriormente se ha descrito - la disponibilidad de una adicional capacidad de eliminación del SO<sub>2</sub>, la adicional cantidad del SO<sub>2</sub>, la que está disponible para su eliminación; la disponibilidad de una capacidad adicional para la oxidación del SO<sub>2</sub>, así como si sobre la base de los determinados valores futuros de los parámetros se ha de aplicar o no unas adicionales capacidades disponibles.

### *Implementación de una estrategia de trabajo para las operaciones del sub-sistema de WFGD*

El MPCC 1500 puede ser empleado como una plataforma para implementar múltiples estrategias de operación, sin ejercer ningún impacto sobre el modelo de proceso, en el cual está basado, ni sobre las relaciones de control de procesos dentro del modelo del proceso. El MPCC 1500 emplea una función objetiva para determinar las finalidades o referencias de la operación. Esta función objetiva comprende una información sobre el proceso en términos de las relaciones dentro del modelo de proceso, pero también comprende los factores de reglaje y las ponderaciones. Son fijas las relaciones dentro del proceso, representadas por la función objetiva y a través del modelo de proceso. Los factores de reglaje pueden ser ajustados antes de cada actuación del regulador. Sujeto a los límites del proceso o a las limitaciones, el algoritmo del regulador puede aumentar al máximo o reducir al mínimo el valor de la función objetiva con el fin de determinar el valor óptimo de la función objetiva. Los objetivos de una operación óptima para los valores del proceso están disponibles dentro del regulador, desde la solución óptima hasta la función objetiva. Por ser ajustados los factores de reglaje o las ponderaciones, en la función objetiva se modifica el valor de la misma y, por consiguiente, también se modifica la solución óptima. Existe, asimismo, la posibilidad de implementar distintas estrategias de operación por usar el MPCC 1500 y por aplicar éste unos apropiados criterios o estrategias para fijar las constantes de un reglaje de la función objetiva. Alguna estrategia o bien varias estrategias de operación comunes pueden comprender:

- La optimización de beneficios (beneficio máximo/costos mínimos);
- La máxima eliminación de contaminantes;
- El movimiento mínimo de las variables manipuladas en la tarea del control.

### *Optimización de las operaciones del sub-sistema de WFGD*

Sobre la base de los deseados criterios de operación, de una función objetiva correctamente ajustada y de los factores de reglaje 1902, el MPCC 1500 activará la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control 870 así como en base a los parámetros apropiadamente introducidos o computados para establecer, en primer lugar, los objetivos de operación a largo plazo para el sub-sistema 130' de WFGD. A continuación, el MPCC 1500 trazará el curso óptimo como, por ejemplo, las trayectorias y caminos óptimos a partir del estado actual de las variables del proceso - tanto para las variables manipuladas como para las variables controladas - hacia los respectivos objetivos de operación a largo plazo para estas variables del proceso. Seguidamente, el MPCC 1500 genera unas directrices de control a efectos de modificar las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD en conformidad con tos establecidos objetivos de operación a largo plazo así como con el trazado del camino óptimo. Finalmente, el MPCC 1500, al activar la lógica generadora de control 860, genera - sobre la base de las directrices de control - unas señales de control y las comunica al sub-sistema 130' de WFGD.

Por consiguiente, el MPCC 1500 lleva a efecto - de acuerdo con el modelo de control dinámico 870 así como con los actuales datos de parámetros, medidos y computados - una primera optimización de las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD sobre la base de una seleccionada función objetiva como, por ejemplo, una función objetiva, elegida en base a los actuales costos de electricidad o del precio de créditos administrativos de emisiones, para así determinar un deseado objetivo de estado fijo. A continuación, el MPCC 1500 realiza - en conformidad con el modelo de control dinámico 870 y con los datos históricos del proceso - una segunda optimización de las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD para determinar un camino dinámico con el fin de pasar las variables del proceso desde el

## ES 2 311 234 T3

estado actual hasta el deseado objeto del estado fijo. De una manera conveniente, la lógica de pronóstico es activada por el MPCC 1500 para determinar un camino, que facilitará el control de las operaciones del sub-sistema 130' de WFGD por parte del MPCC 1500, con el objeto de pasar las variables del proceso lo más pronto posible al deseado objetivo de estado fijo de cada variable del proceso, reduciendo al mismo tiempo al mínimo el error o una desviación entre el deseado objetivo de estado fijo de cada variable del proceso y el estado actual de cada variable del proceso, y esto en cualquier punto a lo largo del camino dinámico.

De este modo, el MPCC 1500 resuelve las tareas del control, no solamente para el instante actual del tiempo ( $T_o$ ), sino también en todos los demás momentos durante el periodo en el cual las variables del proceso están pasando desde el estado actual en  $T_o$  hasta el objetivo del estado fijo en  $T_{ss}$ . Este movimiento de las variables del proceso permite que las mismas sean optimizadas al pasar a lo largo del camino, desde el estado actual hasta el estado fijo, que constituye el objetivo. Esto proporciona, a su vez, una estabilidad adicional en comparación con los movimientos de los parámetros del proceso al emplear para ello unos reguladores convencionales de WFGD como, por ejemplo, el PID anteriormente descrito en el capítulo de los fundamentos.

Un control optimizado del sub-sistema de WFGD es posible gracias al hecho de que las relaciones dentro del proceso están representadas por el modelo de control dinámico 870 así como debido a que el cambio de la función objetiva o de las entradas no directamente relacionadas con el proceso - como, por ejemplo, las entradas de carácter económico o un ajuste en el reglaje de las variables - no tiene ningún impacto sobre estas relaciones. Por consiguiente, es posible manipular o modificar la manera en la que el MPCC 1500 regula el sub-sistema 130' de WFGD - y, *por ende*, el proceso de la desulfuración WFGD - bajo diferentes condiciones, incluyendo distintas condiciones no directamente relacionadas con el proceso, y esto sin tener en consideración el nivel del proceso, una vez que haya sido validado el modelo de control dinámico.

Haciendo de nuevo referencia a las Figuras 15A y 19, se describen a continuación algunos ejemplos del control del sub-sistema 130' de WFGD para la función objetiva de aumentar al máximo los créditos administrativos de emisiones de  $SO_2$  así como para la función objetiva de aumentar al máximo los beneficios o de reducir al mínimo las pérdidas en las operaciones del sub-sistema de WFGD. Las personas familiarizadas con este ramo técnico saben que por proporcionar unos factores de reglaje para otros escenarios de operación, existe la posibilidad de aumentar al máximo o de reducir al mínimo otros parámetros controlables dentro del sub-sistema de WFGD.

### *Aumentar al máximo los créditos administrativos de emisión del $SO_2$*

Para elevar al máximo los créditos de emisión del  $SO_2$ , el MPCC 1500 activa la lógica de pronóstico 850 en conformidad con el modelo de control dinámico 870, que tiene la función objetiva con las constantes de reglaje, configuradas para aumentar al máximo los créditos de emisión del  $SO_2$ . Ha de tenerse presente que, desde el punto de vista del proceso de WFGD, el hecho de elevar al máximo los créditos de emisión del  $SO_2$  requiere, que también sea incrementada al máximo la recuperación del  $SO_2$ .

Las constantes de reglaje, que son introducidas en la función objetiva, permitirán que la función objetiva pueda equilibrar entre si los efectos del cambio en las manipuladas variables con respecto a las emisiones del  $SO_2$ .

El resultado neto de la optimización consiste en que el MPCC 1500 incrementará:

- La eliminación del  $SO_2$  por incrementar el punto de ajuste 186' del valor pH del lodo; y

- El aire de oxidación 154' del soplador como compensación del adicional  $SO_2$  que está siendo recuperado, estando este aumento sometido a la siguiente limitación: A límite inferior de la limitación 1924 para la pureza del yeso. Ha de tenerse en cuenta, que esto será normalmente un valor, que facilita un pequeño margen de seguridad por encima del límite inferior, permitido dentro del requisito de pureza de yeso 1924.

- El límite inferior del necesario aire de oxidación 145'; así como

- La máxima capacidad del soplador de aire de oxidación 150.

Además, al estar el MPCC 1500 previsto para ajustar la alineación de bombas 133, el mismo aumentará al máximo la circulación del todo así como la efectiva altura del todo, sujeta a las limitaciones de la alineación de bombas 133 y de la carga.

Dentro de este escenario de operaciones, el MPCC 1500 está completamente enfocado hacia el incremento de la eliminación del  $SO_2$  para generar los créditos de eliminación del  $SO_2$ . El MPCC 1500 tendrá en cuenta las limitaciones como, por ejemplo, la pureza de yeso 1924 y los requisitos respecto al aire de oxidación. Este escenario no proporciona, sin embargo, un equilibrio entre el costo/valor de la energía eléctrica frente al valor de los créditos de emisión del  $SO_2$ . Este escenario sería apropiado al exceder el valor de los créditos de emisión del  $SO_2$  por mucho del costo/valor de la energía eléctrica.

## ES 2 311 234 T3

### *Aumentar al máximo la rentabilidad o reducir al mínimo las pérdidas*

La función objetiva dentro del MPCC 1500 puede estar configurada de tal manera, que la misma aumentará al máximo la rentabilidad o reducirá al mínimo las pérdidas. Este escenario de operación podría ser llamado escenario de optimización de beneficios. También este escenario requiere una exacta y actualizada información sobre el costo/valor de energía eléctrica, sobre los créditos de emisión del SO<sub>2</sub>, sobre la piedra caliza, sobre el yeso y sobre cualquier aditivo como, por ejemplo, el ácido orgánico.

Son introducidos en la función objetiva los factores de costo/valor, asociados a cada una de las variables dentro del modelo controlador. En este caso, la función objetiva dentro del MPCC 1500 está dirigida para reducir al mínimo los costos y para aumentar al máximo los beneficios. Al estar el beneficio definido como un costo negativo, la relación costo/beneficio se hace una función continua de la función objetiva para reducir al mínimo los costos.

En este escenario, la función objetiva identificará los costos mínimos de la operación en el punto en el cual el valor marginal de la generación de un adicional crédito de emisión del SO<sub>2</sub> es igual al costo marginal para crear este crédito. Debe tenerse presente, que la función objetiva representa una optimización restringida, de tal manera que la solución de reducir al mínimo los costos estará sujeta a las limitaciones siguientes:

- Eliminación mínima del SO<sub>2</sub> (para cumplir con los permisos u objetivos de las emisiones);
- Pureza mínima del yeso;
- Requisito de oxidación mínima del aire;
- Carga máxima del soplador;
- Límites de alineación de bombas y de su carga;
- Límites de aditivos.

Este escenario de operación será sensible a los cambios, tanto en la relación valor/costo de la electricidad como en la relación valor/costo de los créditos de emisión del SO<sub>2</sub>. A efectos de un máximo beneficio, estos factores de costo deberían ser actualizados en tiempo real.

Suponiendo, por ejemplo, que los factores de costo sean actualizados previo a cada activación del controlador 1500A, y como quiera que la demanda de electricidad incrementa a diario, también aumenta el valor de mercado de la energía eléctrica, que está siendo generada. En la suposición de que sea posible para la Compañía Eléctrica vender la energía adicional a este valor de mercado y de que el valor de los créditos de emisión del SO<sub>2</sub> esté principalmente fijo en el momento actual, al existir la posibilidad de pasar energía desde las bombas 133 y desde el soplador 150 hacia la red de distribución de energía eléctrica, manteniéndose todavía la eliminación mínima del SO<sub>2</sub>, hay un importante incentivo económico para pasar la energía adicional a la red de distribución. El factor de costo/valor, asociado a la energía eléctrica en la función objetiva del MPCC 1500, cambiará tan pronto que cambie el valor de mercado de la electricidad, y la función objetiva alcanzará una nueva solución que cumpla con las limitaciones de operación, pero emplea menos energía eléctrica.

A la inversa, al incrementar el valor de mercado de un crédito de emisión del SO<sub>2</sub>, existe un mercado para los adicionales créditos de emisión del SO<sub>2</sub>, y al ser relativamente constante la relación costo/valor de la energía eléctrica, la función objetiva dentro del MPCC 1500 responderá a este cambio por incrementar la eliminación del SO<sub>2</sub>, la cual está sujeta a las limitaciones de la operación.

En ambos ejemplos de escenarios, el MPCC 1500 tendrá en consideración todas las limitaciones de operación y, en este caso, la función objetiva dentro del MPCC 1500 buscará el óptimo punto de operación, en el cual el valor marginal de un crédito de emisión del SO<sub>2</sub> es igual al costo marginal, necesario para generar este crédito.

### *Operación inviable*

A veces es posible, que el sub-sistema 130' de la WFGD esté confrontado con un conjunto de limitaciones 1555 y de condiciones de operación - es decir, de las condiciones medidas 1525 y de las condiciones estimadas 1560 - para las cuales no existe ninguna solución viable. La zona de posibles operaciones 525, tal como indicado en las Figuras 5A y 5B, representa, en este caso, un espacio nulo. Al ocurrir esto, no hay ninguna solución que pueda satisfacer todas las limitaciones 1555 dentro del sistema. Esta situación puede ser definida como una "operación inviable", habida cuenta de que es inviable cumplir con las limitaciones dentro del sistema.

La operación inviable puede ser el resultado de una operación más allá de la capacidad de la desulfuración WFGD, o sea, de un desarreglo en el proceso o dentro de la WFGD o corriente arriba de la WFGD. También puede ser el resultado de unas limitaciones 1555 excesivamente restrictivas, inapropiadas y/o incorrectas, tanto en la WFGD como en el sistema del MPCC 1500.

## ES 2 311 234 T3

Durante el periodo de una operación inviable, la función objetiva dentro del MPCC 1500 está enfocada hacia el objetivo de reducir al mínimo un error ponderado. En esta función objetiva aparece cada una de las limitaciones 1555. Un término de ponderación es aplicado a cada error o a cada violación del límite de la limitación o del requisito por parte del controlado u objetivado valor del proceso. Durante la preparación del controlador 1500A, el ingeniero de implementación seleccionará los valores apropiados para los términos de una ponderación de errores de tal modo que, durante los periodos de una operación inviable, la función objetiva pueda responder a unas limitaciones de menor importancia, con el fin de respetar las limitaciones más importantes.

Por ejemplo, dentro del sub-sistema 130' de WFGD existen unos límites de permiso administrativo, relacionados con la salida del SO<sub>2</sub> 1505, como asimismo existen unas especificaciones de venta, relacionadas con la pureza de yeso 1506. Una violación del permiso de emisión del SO<sub>2</sub> trae consigo multas y otras imposiciones severas. La violación de las especificaciones de la pureza del yeso requiere una clasificación del sub-producto de yeso a la baja o un mezclado del mismo. Clasificar el producto a la baja no es una opción deseable, pero la misma tiene un menor impacto sobre la viabilidad operativa de la central generadora que la violación del permiso de emisión del SO<sub>2</sub>. Por consiguiente, los factores de reglaje serán aplicados de tal modo, que la limitación con respecto a la emisión del SO<sub>2</sub> será de una mayor importancia que la limitación relacionada con la pureza del yeso. De esta manera, con los factores de reglaje y durante los periodos de una operación inviable, la función objetiva dentro del MPCC 1500 mantendrá preferentemente las emisiones del SO<sub>2</sub> al límite o por debajo del límite de emisiones para, esto sí, poder violar la limitación de la pureza del yeso; el MPCC 1500 reducirá al mínimo la violación de la limpieza de pureza del yeso y cambiará la inviabilidad a esta variable, con el fin de respetar el límite de las emisiones, lo cual es más importante.

### *Comunicar a los operarios las decisiones tomadas sobre el control*

De forma preferente, el MPCC 1500 también puede estar configurado para facilitar a los operarios la información sobre ciertas determinaciones, efectuadas en el MPCC 1500. Aquí pueden ser empleados, asimismo, la lógica de pronóstico 850, el modelo de control dinámico 870 u otro tipo de programación para configurar el MPCC 1500 con el fin de proporcionar estas informaciones. Por ejemplo, el MPCC 1500 puede funcionar para dirigir el sonido de alarmas o la presentación de textos o de imágenes en el visualizador, de tal manera que los operarios u otros usuarios estén informados de determinadas determinaciones, efectuadas en el MPCC 1500 como puede ser, por ejemplo, la determinación de que el mantenimiento de la calidad del yeso es de menor prioridad en un momento dado, a la vista de que los créditos de emisión del SO<sub>2</sub>, son ahora más valiosos.

### *Resumen de la desulfuración WFGD*

Como resumen, y tal como anteriormente mencionado con más detalles, se acaba de describir el control de un proceso de desulfuración de gases de escape húmedos (WFGD), el cual está basado en una optimización. Este control facilita la manipulación de los puntos de ajuste del proceso de WFGD en tiempo real y sobre la base de la optimización de un modelo de entradas múltiples y de salida múltiples, el cual es actualizado empleando los datos de retroalimentación del proceso. La optimización implica múltiples objetivos y limitaciones, que han de ser tenidos en cuenta para el proceso. Sin el control de esta clase, es el operario quien tendría que determinar los puntos de ajuste para la WFGD. Debido a la complejidad del proceso, el operario elige muchas veces - para equilibrar las múltiples y los distintos objetivos - unos puntos de ajuste, que son inferiores a los puntos de ajuste óptimos. Los puntos de ajuste y una operación, inferiores al estado óptimo, tienen por resultado una pérdida en la eficiencia de eliminación, unos más elevados costos de operación así como las violaciones de los requisitos de la calidad.

También ha sido descrito un virtual análisis on-line para la pureza del yeso. Este análisis se produce sobre una estimación on-line de la pureza del sub-producto del yeso, el cual es producido mediante el proceso de WFGD, aplicando unas medidas variables del proceso, los análisis del laboratorio y un modelo de estimación dinámico para la pureza del yeso. Como quiera que no están normalmente disponibles los sensores on-line para la pureza del yeso, producido durante el proceso de WFGD, se emplean normalmente los análisis de laboratorios exteriores para determinar la pureza del yeso. Sin embargo, teniendo en cuenta que la pureza del yeso es comprobada sólo ocasionalmente, y que la pureza tiene que ser mantenida por encima de una limitación, normalmente establecida en la especificación del yeso, los operarios del proceso eligen muchas veces unos puntos de ajuste para el proceso de WFGD, según los cuales la pureza del yeso está bien por encima de los requisitos. Esto, en cambio, tiene por resultado que la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub> es sacrificada y/o se produce un innecesario consumo de energía eléctrica en el sub-sistema de WFGD. Por ser la pureza del yeso estimada online, los puntos de ajuste del proceso de WFGD pueden ser controlados para asegurar que la pureza del yeso esté más cerca del requisito de la pureza facilitando, no obstante, una incrementada eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>.

Anteriormente, también ha sido descrito de forma detallada que el virtual análisis on-line de la pureza del yeso está previamente conformado en un bucle de control, con lo cual se permite que las estimaciones puedan estar incluidas en el control por retroalimentación de datos, siendo utilizado para ello el modelo de control por pronóstico (MPC) o el control PID. Por proporcionar la retroalimentación de datos a un bucle de control, puede ser incrementada la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub> al trabajar para producir un yeso con una pureza que esté más cerca de la aplicable limitación en cuanto a la pureza.

## ES 2 311 234 T3

Anteriormente se ha descrito, además, un virtual análisis on-line de los costos de operación. Este análisis emplea, tal como revelado, los datos del proceso de WFGD, al igual que los datos de precios actuales del mercado para computar on-line los costos de operación de un proceso de WFGD. Por regla general, los operarios no tienen en consideración el costo actual de la operación de un proceso de WFGD. Sin embargo, por el hecho de computar estos  
5 costos on-line, a los operarios se les da ahora la posibilidad de observar los efectos que unos cambios en el proceso - como, por ejemplo, las variaciones en los puntos de ajuste - tienen sobre los costos de la operación.

Más arriba está descrita también la prestación, que el virtual análisis on-line en un bucle de control tiene sobre los costos de operación, habida cuenta de que el mismo permite que las estimaciones puedan ser incluidas en el control de retroalimentación de datos, sin tener en cuenta que es empleado el control MPC o el control PID. De este modo, el control de la retroalimentación de datos puede ser aplicado al objeto de reducir al mínimo los costos de la  
10 operación.

También ha sido descrita anteriormente una técnica para aplicar el control MPC con el fin de optimizar la operación del proceso de WFGD en cuanto a la máxima eficiencia de eliminación del SO<sub>2</sub>, los costos mínimos de la operación y/o en cuanto a la deseada pureza del yeso, por encima de un requisito. Este tipo de control se puede aprovechar del análisis virtual de la pureza del yeso y/o de los costos de operación, que se encuentran dentro del bucle de retroalimentación de datos, tal como anteriormente mencionado, y este control tiene la capacidad de producir una optimización automática, por ejemplo, en la eficiencia de la eliminación del SO<sub>2</sub> y/o en los costos de operación de un proceso de  
15 WFGD.

En los parámetros anteriormente descritos hay tanto los parámetros necesarios como los parámetros opcionales. A través de los parámetros revelados, las personas familiarizadas con este ramo técnico pueden, de una manera rutinaria, aplicar unas conocidas técnicas para desarrollar un apropiado modelo del aplicable proceso de WFGD, el cual, a su vez, puede ser empleado - por ejemplo, por un regulador MPCC 1500, que controla el proceso de WFGD - para optimizar la operación del proceso WFGD. Los modelos pueden ser desarrollados para la pureza del yeso, para la eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub> y/o para los costos de operación, al igual para otros factores distintos. El control MPC convencional, u otra lógica, pueden ser activados en base a los modelos de proceso WFGD - desarrollados en conformidad con los principios, los sistemas y con los procesos aquí descritos - con el fin de optimizar el proceso de la WFGD. Por consiguiente, son eliminados los inconvenientes de un control convencional de los procesos de WFGD empleando, por ejemplo, los PIDs, que están limitados a las estructuras de unas entradas y de salidas individuales, y los mismos se basan estrictamente en la retroalimentación de datos del proceso, en vez de basarse en unos modelos del proceso. Por incluirse los modelos en el bucle de retroalimentación de datos, el control de proceso de WFGD puede ser perfeccionado aún más para, por ejemplo, mantener las operaciones más cerca de las limitaciones, y esto con una  
20 más reducida variabilidad, que hasta ahora no se ha conocido.

También está descrita - tanto en el contexto del control del proceso como en el virtual análisis on-line de un proceso de WFGD - la aplicación de unos modelos para un proceso de WFGD, los cuales están basados en una red neuronal. Tal como anteriormente descrito con más detalle, la relación entre la entrada y la salida de un proceso de WFGD representa una relación no-lineal, por lo cual resulta conveniente emplear un modelo no-lineal, toda vez que un modelo de este tipo representa mejor el carácter no-lineal del proceso. Además, se ha descrito también el desarrollo de otros modelos derivados, empleando para ello unos datos empíricos, procedentes del proceso de WFGD.  
40

Arriba está detalladamente descrita, además, la aplicación de un modelo combinado, que tiene en consideración tanto unos primeros principios como unos datos empíricos del proceso para el control y del análisis virtual de un proceso de WFGD. Mientras que algunos elementos del proceso de WFGD se entienden bien y pueden servir de modelo por aplicar los modelos de primeros principios, otros elementos, sin embargo, no se entienden tan bien y para formar un modelo de los mismos son empleados, de una manera conveniente, los datos empíricos del historial del proceso. Por emplear una combinación entre los primeros principios y los datos empíricos del proceso puede ser desarrollado rápidamente un modelo exacto, sin la necesidad de efectuar unos ensayos escalonados de todos los elementos del proceso.  
50

Arriba también ha sido descrita detalladamente una técnica para la validación de las mediciones de sensores, las que son empleadas en un proceso de WFGD. Tal como indicado, las mediciones no validadas pueden ser sustituidas, con lo cual se evita un control inapropiado, resultante de unas inexactas mediciones de los sensores del proceso de WFGD. Por validar y sustituir las mediciones incorrectas, el proceso puede ahora ser efectuado de manera continua por basarse en unos valores correctos para el mismo.  
55

Está descrito de forma detallada, asimismo, el control de las emisiones rotativas. Por lo tanto, a la vista de la presente revelación, el proceso de la WFGD puede ser regulado de tal manera, que para el proceso puedan ser mantenidos, de forma apropiada, uno o varios valores medios para las emisiones rotativas. El MPC puede ser implementado empleando un solo regulador o una multitud de reguladores, dispuestos en cascada para regular el proceso. Por aplicar la técnica aquí descrita, el proceso de WFGD puede ser controlado de tal manera, por ejemplo, que los múltiples valores medios rotativos de emisiones de este tipo sean mantenidos y tomados en consideración simultáneamente, mientras que al mismo tiempo sean reducidos al mínimo los costos.  
60  
65

## ES 2 311 234 T3

### *Estructura de la selectiva reducción catalítica (SCR) del sub-sistema*

Serán descritos, a continuación, los aspectos más importantes del empleo del MPCC para la SCR con el fin de poner de manifiesto la utilidad de la presente invención en relación con otros entornos y con otras implementaciones. Los principales objetivos del control de la SCR comprende:

- Eliminación del NO<sub>x</sub> - como objetivo del cumplimiento de las normas o como optimización de los beneficios;
- Control del desplazamiento de amoníaco; así como
- Operación al mínimo costo - manejo del catalizador de la SCR y empleo del amoníaco.

Puede ser aplicada, otra vez, una metodología de medición y de control, que es similar a la que había sido descrita en relación con la desulfuración WFGD.

Mediciones: Como anteriormente indicado, el desplazamiento del amoníaco constituye un importante parámetro de control, que con frecuencia no es medido. Al no existir una medición directa del desplazamiento del amoníaco, es posible calcular el desplazamiento del amoníaco en base a las mediciones de entrada y de salida de NO<sub>x</sub>, 2112 y 2111, así como del flujo del amoníaco hacia la SCR 2012. La exactitud de este cálculo es precaria, habida cuenta de que la misma exige unas mediciones tanto exactas como repetibles, como también implica la misma una evaluación de diferencias pequeñas entre unas cifras elevadas. Sin una medición directa del desplazamiento del amoníaco, son aplicadas las técnicas de un virtual analizador on-line, aparte de un cálculo directo del desplazamiento del amoníaco, con el fin de proporcionar una estimación de mayor fiabilidad de este desplazamiento del amoníaco.

El primer paso del virtual analizador on-line (VOA) consiste en estimar el potencial del catalizador (coeficiente de reacción) así como la variación en la correlación espacio/velocidad (SVCV) a través del catalizador de la SCR. Estos datos son computados por emplear el flujo del gas de escape; la temperatura; el tiempo total de uso del catalizador; así como las cantidades de entrada y de salida del NO<sub>x</sub>. Tanto el cálculo del potencial del catalizador como la correlación espacio/velocidad (SVCV) son promediados en cuanto a tiempo y por un determinado número de muestras. El potencial del catalizador cambia lentamente, por lo cual pueden ser empleados muchos aspectos de datos para computar este potencial, mientras que de las variaciones en la correlación SVCV son empleados con frecuencia unos aspectos de datos relativamente reducidos para computar la SVCV. Con los datos dados de un potencial del catalizador (coeficiente de reacción), de la variación en la correlación espacio/velocidad (SVCV) así como de la entrada del NO<sub>x</sub>, una estimación del desplazamiento del amoníaco puede ser computada por aplicarse la técnica indicada en la Figura 9.

Al estar disponible un equipo físico sensor del desplazamiento del amoníaco, un bucle de retroalimentación de datos - desde un tal sensor hasta el modelo del proceso - puede ser empleado para incorporar automáticamente el analizador VOA. Este VOA podría ser empleado para reducir, de una manera significativa, la anormalmente ruidosa señal de salida del equipo físico sensor.

Finalmente, habría de tenerse en cuenta que el virtual analizador on-line puede ser empleado también para los costos de operación de la SCR. Tal como subrayado en un apartado anterior, el modelo para los costos de la operación es desarrollado en base a los primeros principios. Los costos de operación pueden ser computados on-line, empleando un virtual analizador on-line; para el VOA es aplicada - también aquí - la técnica indicada en la Figura 9.

Control: El MPCC es empleado en la tarea del control de la SCR para conseguir unos objetivos de control. La Figura 22 muestra, de forma similar a lo indicado en la Figura 8, la estructura del MPCC para la combinación entre SCR y MPCC 2500. Debido a las similitudes con respecto a la Figura 8, no se considera aquí necesaria una detallada descripción de la Figura 22, teniendo en cuenta que el MPCC 2500 podrá ser comprendido en base a la descripción anteriormente indicada de la Figura 8. La Figura 23A representa la aplicación del MPCC 2500 en el sub-sistema SCR 2170'. La modificación más importante con respecto al esquema de control reglamentario del sub-sistema SCR 2179' consiste en el hecho de que la funcionalidad del controlador PID 2020 para la eliminación del NO<sub>x</sub> y del controlador de avance de alimentación de carga 2220 - cada uno de estos controladores está indicado en la Figura 20 - queda sustituida por el MPCC 2500. El MPCC 2500 calcula directamente el punto de ajuste 2021A' del flujo de amoníaco para que éste pueda ser empleado por el controlador de flujo de amoníaco (PID 2010).

El regulador MPCC 2500 puede regular uno o una multitud de flujos de amoníaco para controlar la eficiencia de eliminación del NO<sub>x</sub> así como el desplazamiento del amoníaco Suponiendo que existan suficientes valores de medición con los analizadores 2003 y 2004 de la entrada y de la salida del NO<sub>x</sub> así como de la medición del desplazamiento de amoníaco 2611 del analizador de amoníaco 2610 para establecer la eficiencia en la eliminación del NO<sub>x</sub> y para establecer un perfil de información sobre el amoníaco, el MPCC 2500 controlará la eficiencia media o bien la eficiencia de conjunto de la eliminación del NO<sub>x</sub>, al igual que el desplazamiento del amoníaco y los valores de un perfil. El control coordinado de una multitud de valores de la eficiencia de eliminación del NO<sub>x</sub> y del perfil del desplazamiento de amoníaco permite conseguir una importante reducción de la variabilidad con respecto a los valores medios del proceso. Una más reducida variabilidad es traducida en menos paradas "calientes" dentro del sistema. Este control del perfil requiere por lo menos alguna forma de medición y de control de perfil, es decir, más que una medición de la entrada del NO<sub>x</sub>, una medición de la salida del NO<sub>x</sub>, una medición del desplazamiento de amoníaco así como más de

## ES 2 311 234 T3

un flujo de amoníaco, que puede ser ajustado de forma dinámica. Ha de ser reconocido que, sin las necesarias entradas (mediciones) y las necesarias maniobras de control (flujos de amoníaco), el MPCC 2500 no estaría en condiciones de implementar un control del perfil, ni de recoger los beneficios resultantes.

5 Desde la perspectiva del MPCC 2500, los adicionales parámetros, que están relacionados con el control del perfil, incrementan el tamaño del regulador, y permanecen, sin embargo, invariados la metodología de control de conjunto, el esquema y los objetivos. Por consiguiente, una futura discusión tendrá en consideración el control del sub-sistema de la SCR sin un control del perfil.

10 La Figura 23B muestra una vista sinóptica del MPCC 2500.

### *Optimizar las operaciones del sub-sistema SCR*

15 En base a los deseados criterios de operación, a la función objetiva, regulada de forma apropiada, así como en base a los factores de reglaje 2902, el MPCC 2500 activará la lógica de pronóstico 2850 - en conformidad con el modelo de control dinámico 2870 y sobre la base de unos apropiados parámetros introducidos o bien computados - para establecer, en primer lugar, unas referencias u objetivos de operación a largo plazo para el sub-sistema de SCR 2170'. A continuación, el MPCC 2500 determinará un recorrido óptimo - como, por ejemplo, unas trayectorias o caminos óptimos - desde el estado actual de las variables del proceso, tanto de variables manipuladas como de variables controladas, hacia los respectivos objetivos de operación, establecidos a largo plazo para estas variables del proceso. El MPCC 2500 genera seguidamente unas directrices de control para modificar las operaciones del sub-sistema SCR 2170' de acuerdo con los establecidos objetivos de operación a largo plazo y con el óptimo trazado del recorrido. Finalmente, el MPCC 2500 - al activar la lógica generadora de control 2860 - genera y comunica unas señales de control al sub-sistema SCR 2170' sobre la base de las directrices de control.

25 Por consiguiente, el MPCC 2500 lleva a efecto - en conformidad con el modelo de control dinámico y con los datos de parámetros de una medición actual y computados - una primera optimización de las operaciones del sub-sistema de SCR 2170' sobre la base de una seleccionada función objetiva como, por ejemplo, una función objetiva elegida en base a los actuales costos de electricidad o del precio actual de los créditos administrativos de emisiones, para determinar un deseado objetivo de estado fijo. A continuación, el MPCC 2500 realiza - de acuerdo con el modelo de control dinámico y con los datos históricos del proceso - una segunda optimización de las operaciones del sub-sistema de SCR 2170' para determinar un camino dinámico a lo largo del cual han de ser pasadas las variables del proceso, desde el estado actual hasta el deseado objetivo de estado fijo. De una manera conveniente, la lógica de pronóstico, que está siendo activada por el MPCC 2500, determina un camino que facilitará el control de las operaciones del sub-sistema de SCR 2170' por parte del MPCC 2500, con el fin de conducir las variables del proceso lo más rápido posible hacia el deseado objetivo de estado fijo de cada variable del proceso, mientras que reduce al mínimo el error o la desviación entre el deseado objetivo de estado fijo para cada variable del proceso y el estado actual de cada variable del proceso, y esto en cualquier punto a lo largo del camino dinámico.

40 De este modo, el MPCC 2500 resuelve las tareas del control, no solamente para el instante actual del tiempo ( $T_o$ ), sino también en todos los demás momentos durante el periodo en el que las variables del proceso están pasando desde el estado actual en  $T_o$  hasta el objetivo de estado fijo en  $T_{ss}$ . Este movimiento de las variables del proceso permite, que las mismas sean optimizadas al pasar a lo largo del camino, desde el estado actual hasta el estado fijo, que representa el objetivo. Esto proporciona, a su vez, una estabilidad adicional en comparación con los movimientos de los parámetros del proceso al emplearse para ello unos reguladores convencionales de la SCR como, por ejemplo, el PID anteriormente descrito.

50 Un control optimizado del sub-sistema de SCR es posible gracias al hecho de que las relaciones dentro del proceso están representadas por el modelo de control dinámico 2870 así como debido a que un cambio en la función objetiva o en las entradas no directamente relacionadas con el proceso - como, por ejemplo, las entradas de carácter económico o bien un ajuste en el reglaje de las variables - no ejerce ningún impacto sobre estas relaciones. Por consiguiente, existe la posibilidad de manipular o de modificar la manera en la que el MPCC 2500 regula el sub-sistema 2170' de SCR - y, *por ende*, el proceso de la reducción catalítica SCR - bajo diferentes condiciones, incluyendo distintas condiciones que no están directamente relacionadas con el proceso, y esto sin tener en consideración el nivel del proceso, una vez que haya sido validado el modelo de control dinámico.

60 Haciendo otra vez referencia a las Figuras 23A y 23B, se describe a continuación algunos ejemplos del control del sub-sistema 2170' de la SCR para la función objetiva de incrementar al máximo los créditos administrativos de emisiones del NOx así como para la función objetiva de incrementar al máximo los beneficios o de reducir al mínimo las pérdidas en las operaciones del sub-sistema de SCR. Las personas familiarizadas con este ramo técnico saben que por proporcionar unos factores de reglaje para otros escenarios de operación, existe la posibilidad de aumentar al máximo o de reducir al mínimo otros parámetros, que son controlables dentro del sub-sistema de SCR.

### *Aumentar al máximo los créditos administrativos de emisión del NOx*

65 Para aumentar al máximo los créditos de emisión del NOx, el MPCC 2500 activa la lógica de pronóstico 2850 en conformidad con el modelo de control dinámico 2870, que tiene la función objetiva con las constantes de reglaje, configuradas para aumentar al máximo los créditos de emisión del NOx. Ha de tenerse en cuenta que, bajo el punto de

## ES 2 311 234 T3

vista del proceso de SCR, el hecho de aumentar al máximo los créditos de emisión del NOx requiere, asimismo, que sea incrementada al máximo la recuperación del NOx.

5 Las constantes de reglaje, que son introducidas en la función objetiva, permitirán que la función objetiva pueda equilibrar los efectos de los cambios en las variables manipuladas en relación con las emisiones del NOx.

Los resultados netos de la optimización consisten en que el MPCC 2500 incrementará:

10 - La eliminación del NOx por incrementar los puntos de ajuste del flujo de amoníaco, los cuales están sometidos al requisito de:

- Un desplazamiento máximo del amoníaco.

15 En este escenario de operaciones, el MPCC 2500 está completamente enfocado a incrementar la eliminación del NOx para así generar los créditos de emisión del NOx. El MPCC 2500 respetará las limitaciones con respecto al desplazamiento del amoníaco. Sin embargo, este escenario no proporcionará ningún equilibrio entre el costo/valor del amoníaco o el desplazamiento del amoníaco frente al valor de los créditos de emisión del NOx. Este escenario sería apropiado para el caso de que el valor de los créditos de emisión del NOx sobrepase, y por mucho, el costo/valor del amoníaco y el desplazamiento del amoníaco.

20 *Aumentar al máximo la rentabilidad o reducir al mínimo las pérdidas*

25 La función objetiva dentro del MPCC 2500 puede estar configurada de tal manera, que la misma pueda aumentar al máximo la rentabilidad o pueda reducir al mínimo las pérdidas. Este escenario de operación puede ser denominado como escenario de optimización de beneficios. También este escenario requiere una exacta y actualizada información sobre el costo/valor de la energía eléctrica, sobre los créditos de emisión del NOx, sobre el amoníaco así como sobre el impacto que el desplazamiento del amoníaco ejerce sobre el equipo, que está situado corriente abajo.

30 Son introducidos en la función objetiva los factores de costo/valor asociados a cada una de las variables dentro del modelo de control. En este caso, la función objetiva dentro del MPCC 2500 es dirigida para reducir al mínimo los costos/aumentar al máximo los beneficios. Al estar el beneficio definido como un costo negativo, la relación costo/beneficio se hace una función continua de la función objetiva para reducir los costos al mínimo.

35 En este escenario, la función objetiva identificará la operación de un costo mínimo en un punto en el que el valor marginal de la generación de un adicional crédito de emisión del NOx es igual al costo marginal para crear este crédito. Debe tenerse presente, que la función objetiva representa una optimización restringida, de tal modo la solución de reducir al mínimo los costos estará sujeta a las limitaciones siguientes:

40 - Mínima eliminación del NOx (para cumplir con los permisos u objetivos de la emisión);

- Mínimo desplazamiento del amoníaco;

- Reducir al mínimo el uso de amoníaco.

45 Este escenario de operación será sensible a los cambios, tanto en la relación valor/costo de la electricidad como en la relación valor/costo de los créditos de emisión del NOx. A efectos de un máximo beneficio, estos factores de costo deberían ser actualizados en tiempo real.

50 Suponiendo, por ejemplo, que los factores de costo sean actualizados previo a la activación de cada controlador, y a la vista de que la demanda de electricidad se incrementa a diario, también aumentará el valor de mercado de la energía eléctrica, que está siendo generada. En la suposición de que para la Compañía Eléctrica sea posible vender la energía adicional a este valor de mercado y de que el valor de los créditos de emisión del NOx esté principalmente fijo en el momento actual, existe un importante incentivo económico para reducir al mínimo el desplazamiento del amoníaco, habida cuenta de que esto mantendrá más limpio el precalentador de aire y permite una más eficiente generación de energía. Hay un significativo incentivo económico para pasar la adicional energía a la red de distribución. El factor de costo/valor, asociado a la energía eléctrica en la función objetiva del MPCC 2500, cambiará tan pronto que cambie el valor de mercado de la electricidad, y la función objetiva alcanzará una nueva solución que cumpla con las limitaciones de operación, pero que utiliza menos energía eléctrica.

60 A la inversa, al incrementar el valor de mercado de un crédito de emisión del NOx, existe un mercado para los adicionales créditos de emisión del NOx, y al ser relativamente constante la relación costo/valor de la energía, la función objetiva dentro del MPCC 2500 responderá a este cambio por aumentar la eliminación del NOx, la cual está sujeta a las limitaciones de la operación.

65 En ambos ejemplos de escenarios, el MPCC 2500 tendrá en consideración las limitaciones de la operación y, en este caso, la función objetiva dentro del MPCC 2500 buscará el óptimo punto de operación, en el que el valor marginal de un crédito de emisión del NOx es igual al costo marginal, necesario para generar este crédito.

**Resumen**

Asimismo, debe ser reconocido por las personas familiarizadas con este ramo técnico que, si bien la presente invención haya sido descrita anteriormente en los términos de una o de varias formas de realización, la misma no está, sin embargo, limitada a éstas. Varios aspectos y características de la anteriormente descrita invención pueden ser empleados de una manera individual o en su conjunto. Además, y aunque la presente invención haya sido descrita de forma detallada en el contexto de su implementación en un entorno particular y para unas finalidades especiales - como, por ejemplo, para la desulfuración de gases de escape húmedos (WFGD), con un breve resumen de la selectiva reducción catalítica (SCR) - las personas familiarizadas con este ramo técnico tendrán que admitir, que la utilidad de esta invención no está limitada a esta finalidad y que la invención también puede ser empleada, de una manera beneficiosa, en toda una serie de distintos entornos e implementaciones.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

1. Regulador de fases múltiples para dirigir las operaciones de un sistema, que realiza un proceso; con una multitud de parámetros de proceso (MPP), siendo por lo menos uno de los MPP un parámetro controlable del proceso (CTPP), mientras que otro de los MPP es un objetivado parámetro del proceso (TPP); y con un definido valor de objetivo (DTV), que representa el primer límite de un actual valor medio (AAV) del parámetro TPP durante un definido período de tiempo de la duración  $T_{L_{AAV2}}$ , con el valor medio AAV computado en base a unos valores actuales (AV) del TPP durante el definido período, comprendiendo este regulador lo siguiente:

Un primer controlador lógico con una lógica para pronosticar los futuros valores medios (FAV) del TPP por un primer período de tiempo futuro (FFTP), que tiene una duración de por lo menos  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV2}$ , en el que - o antes del mismo - el parámetro TPP pasará al estado fijo y en el cual los FAV son pronosticados en base a (i) los AAV de los TPP a distintos tiempos durante un primer período de tiempo anterior (FPTP), que tiene una duración de por lo menos  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-AAV2}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) a los valores actuales de los MPP; así como (iii) en base al DTV;

Un segundo controlador lógico, que tiene una lógica (a) para establecer otro valor objetivado (FTV) adicional, que representa un segundo límite de un AAV del parámetro TPP durante un segundo período de tiempo futuro (SFTP), teniendo este SFTP una duración igual a  $T_{L_{AAV1}}$ , que es inferior a la duración  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV1}$ , en el que el FTV queda establecido en base a uno o a varios FAV, pronosticados del parámetro TPP durante el período del FFTP; (b) para determinar un punto de ajuste de objetivo para cada CTPP en base a (i) los AAV del parámetro TPP a distintos tiempos durante un segundo período de tiempo anterior (SPTP), que tiene la duración de  $T_{L_{AAV1}}$  y que se extiende desde un tiempo anterior de  $T_{-AAV1}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) a los valores actuales de los MPP; así como (iii) en base al FTV; (c) para dirigir el control de cada parámetro CTPP en conformidad con el determinado punto de ajuste de objetivo para este CTPP.

2. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1) en el cual:

El punto de ajuste de objetivo para cada CTPP es determinado por (a) pronosticar los FAV del TPP durante el período de tiempo SFTP y en base a (i) los AAV del parámetro TPP a distintos tiempos durante el período SPTP; y (ii) en base a los valores actuales de los MPP; así como (b) por pronosticar también los FAVs del parámetro TPP a distintos tiempos durante el período SFTP y en base a (i) los valores actuales del MPP y (ii) en base al punto de ajuste de objetivo para cada CTPP.

3. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), el cual comprende, además, un medio de memoria, configurado para guardar datos históricos que representan los AAV del TPP durante el período FPTP.

4. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), en el cual el FVT es establecido para todo el período SFTP.

5. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), en el cual el segundo controlador lógico está configurado, además, para determinar el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP, de tal manera que el AAV del TPP pueda cumplir con el DTV durante cada uno de toda una serie de períodos de tiempo de maniobra (MTP), cada uno de los cuales tiene un distinto tiempo de comienzo y tiene un tiempo de finalización, que es posterior al tiempo actual  $T_0$ .

6. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), el cual comprende, además, un dispositivo de entrada que está configurado para introducir - en el tiempo actual  $T_0$  o previo al mismo - un acontecimiento, que va a producirse en el tiempo actual  $T_0$  o posterior al mismo; en este regulador, el primer controlador lógico comprende, además, una lógica para pronosticar los FAV del parámetro TPP durante el período FFTP, también en base al acontecimiento introducido, y el segundo controlador lógico comprende, además, una lógica para determinar el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP, asimismo sobre la base del acontecimiento introducido.

7. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 6), en el cual el acontecimiento de entrada es indicativo de un cambio en por lo menos uno de los MPP o en por lo menos uno de los parámetros (NPP), que no están directamente relacionados con el proceso, pero sí están asociados al funcionamiento del sistema para poder llevar a efecto el proceso.

8. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 7), en el cual por lo menos uno de los MPP comprende los datos sobre la carga del sistema, mientras que por lo menos uno de los NPP comprende uno o más datos sobre el costo de la energía eléctrica, sobre el valor de un crédito administrativo para emisiones así como datos sobre el valor de un sub-producto del proceso.

9. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), en el cual el sistema representa un sistema de desulfuración de gas de escape húmedo (WFGD), que recibe el gas de escape húmedo, cargado del  $SO_2$ ; aplica el lodo de piedra caliza para eliminar el  $SO_2$  del recibido gas de escape húmedo, cargado del  $SO_2$ , y el mismo despiden el gas de escape desulfurado; en este caso, por lo menos un parámetro CTPP comprende uno o varios parámetros corres-

## ES 2 311 234 T3

pondientes al nivel pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aplicado, mientras que otro parámetro corresponde a la distribución del aplicado lodo de piedra caliza, y el TPP es un parámetro correspondiente a una cantidad del  $\text{SO}_2$  dentro del despedido gas de escape desulfurado.

5 10. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), en el cual el sistema representa un sistema de selectiva reducción catalítica (SCR), que recibe el gas de escape cargado de  $\text{NO}_x$ ; aplica el amoníaco para eliminar el  $\text{NO}_x$  del recibido gas de escape, cargado del  $\text{NO}_x$ , para de este modo controlar las emisiones del  $\text{NO}_x$ , y el mismo despiden el gas de escape, una vez reducido el  $\text{NO}_x$ ; en este caso, por lo menos un parámetro CTPP comprende un parámetro correspondiente a una cantidad del amoníaco aplicado, mientras que el parámetro TPP representa la  
10 cantidad de  $\text{NO}_x$  dentro del despedido gas de escape.

11. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), el cual comprende, además, un modelo de proceso de una red neuronal así como un modelo de proceso de una red no-neuronal; en este caso, un modelo representa la relación entre el TPP y por lo menos un CTPP; el primer controlador lógico pronostica los FAV en conformidad con  
15 uno de este modelo, mientras que el segundo controlador lógico determina el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP en conformidad con uno del otro modelo.

12. Regulador de fases múltiples conforme a la reivindicación 1), en el cual un modelo representa un modelo de primeros principios, un modelo híbrido y un modelo regresivo.

13. Regulador de fases múltiples para dirigir la operación de un sistema, que lleva a efecto un proceso; este proceso comprende una multitud de parámetros de proceso (MPP), incluyendo por lo menos un controlable parámetro de proceso (CTPP) así como por lo menos un objetivado parámetro de proceso (TPP), que tiene un definido valor de objetivo (DTV), que representa el primer límite de un actual valor medio (AAV) del parámetro TPP durante un período  
25 de tiempo (TP); comprendiendo este regulador:

Un modelo de proceso de una red neuronal así como un modelo de proceso de una red no-neuronal, representando un modelo la relación entre el TPP y por lo menos un CTPP;

30 Una primera lógica para pronosticar un camino correspondiente a los futuros valores medios (FAV) del TPP durante un primer período de tiempo (FTP), que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{F1}$ , anterior al cual el TPP pasará a la condición de un estado fijo, teniendo el  $T_{F1}$  una duración de por lo menos el TP, basado en (i) los AAV del TPP a distintos tiempos durante un primer período de tiempo anterior, que tiene una duración de por lo menos el TP y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-F1}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) en los actuales MPP; (iii) el DTV; así como (iv) basado en uno de los modelos; y  
35

Una segunda lógica para establecer otro valor objetivado (FTV) adicional, que representa un segundo límite para el AAV del TPP durante un segundo período de tiempo (STP), que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{F2}$  y que tiene una duración que es inferior al FTP, y para determinar, basado en el camino pronosticado,  
40 un punto de ajuste de objetivo para cada CTPP - basado en el FTV y en el otro modelo - así como para dirigir las operaciones del sistema, basadas en los puntos de ajuste de objetivo para cada CTPP.

14. Procedimiento de fases múltiples para dirigir las operaciones de un sistema, que realiza un proceso; con una multitud de parámetros de proceso (MPP), siendo por lo menos uno de los MPP un parámetro controlable de proceso (CTPP), mientras que otro de los MPP es un parámetro objetivado de proceso (TPP); y con un definido valor de objetivo (DTV), que representa el primer límite de un actual valor medio (AAV) del parámetro TPP durante un definido período  
45 de tiempo con la duración  $T_{L_{AAV2}}$ , con el valor medio AAV computado en base a unos valores actuales (AV) del TPP durante el definido período, comprendiendo este procedimiento lo siguiente:

50 Pronosticar los futuros valores medios (FAV) del parámetro TPP durante un primer período de tiempo (FFTP), que tiene una duración de por lo menos  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde un tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV2}$  en el que - o previo al mismo - el parámetro TPP pasará al estado fijo y en el cual los FAV son pronosticados en base a (i) los AAV del TPP a distintos tiempos durante un primer período de tiempo anterior (FPTP), que tiene una duración de por lo menos  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-AAV2}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) a los valores  
55 actuales de los MPP; así como (iii) en base al DTV;

Establecer otro valor objetivado (FTV) adicional, que representa un segundo límite de un AAV del parámetro TPP al término de un segundo período de tiempo futuro (SFTP), teniendo este SFTP una duración igual a  $T_{AAV1}$ , que es inferior a la duración  $T_{L_{AAV2}}$  y que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{AAV1}$ , en el  
60 que el FTV queda establecido en base a uno o a varios FAV, pronosticados del parámetro TPP durante el período FFTP; Determinar un punto de ajuste de objetivo para cada CTPP en base a (i) los AAV del parámetro TPP a distintos tiempos durante un segundo período de tiempo anterior (SPTP), que tiene la duración de  $T_{L_{AAV1}}$  y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-AAV1}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) a los valores actuales de los MPP; así como en base al FTV;  
65

Dirigir el control de cada parámetro CTPP en conformidad con el determinado punto de ajuste de objetivo para este CTPP.

## ES 2 311 234 T3

15. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), en el cual el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP es determinado (a) por pronosticar los FAV del TPP durante el período de tiempo SFTP y en base a (i) los AAV del parámetro TPP a distintos tiempos durante el período SPTP; y (ii) en base a los valores actuales de los MPP; así como (b) por pronosticar también los FAV del parámetro TPP a distintos tiempos durante el período SFTP y en base a (i) los valores actuales de los MPP y (ii) en base al punto de ajuste de objetivo para cada CTPP.

16. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), el cual comprende, además, la memorización de datos históricos que representan los AAV del parámetro TPP durante el período FPTP.

17. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), en el cual el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP es determinado de tal manera, que el AAV del TPP pueda cumplir con el DTV durante cada uno de toda una serie de períodos de tiempo de maniobra (MTP), cada uno de los cuales tiene un distinto tiempo de comienzo y tiene un tiempo de finalización, que es posterior al tiempo actual  $T_0$ .

18. Procedimiento conforme a la reivindicación 15), el cual comprende, además, recibir - en el tiempo actual  $T_0$  o previo al mismo - la entrada correspondiente a un acontecimiento, que va a producirse en el tiempo actual  $T_0$  o posterior al mismo; en este procedimiento, los FAV del parámetro TPP son pronosticados durante el período FFTP así como sobre la base del acontecimiento introducido, y el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP es determinado, asimismo, en base al acontecimiento introducido.

19. Procedimiento conforme a la reivindicación 18), en el cual la entrada representa un cambio en por lo menos uno de los MPP o en por lo menos uno de los parámetros de proceso (NPP), que no están directamente relacionados con el proceso, pero sí están asociados al funcionamiento del proceso.

20. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), en el cual el proceso representa un proceso de desulfuración de gas de escape húmedo (WFGD), que recibe el gas de escape húmedo, cargado del  $SO_2$ ; se aplica el lodo de piedra caliza para eliminar el  $SO_2$  del recibido gas de escape húmedo, cargado del  $SO_2$ , y se despiden el gas de escape desulfurado; a este efecto, por lo menos un parámetro CTPP comprende uno o varios parámetros correspondientes al nivel pH del lodo de piedra caliza, que está siendo aplicado, mientras que otro parámetro corresponde a la distribución del aplicado lodo de piedra caliza, y el TPP es un parámetro correspondiente a una cantidad del  $SO_2$  dentro del gas de escape desulfurado y despedido.

21. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), en el cual el proceso representa un proceso de selectiva reducción catalítica (SCR), que emplea el amoníaco para eliminar el  $NO_x$  del gas de escape, que está cargado del  $NO_x$ , controlando de esta manera las emisiones del  $NO_x$ , y el mismo despiden el gas de escape, una vez reducido del  $NO_x$ ; en este caso, por lo menos un parámetro CTPP comprende un parámetro correspondiente a la cantidad de amoníaco aplicado, mientras que el parámetro TPP representa la cantidad de  $NO_x$  dentro del despedido gas de escape.

22. Procedimiento conforme a la reivindicación 14), en el cual los FAV son pronosticados y el punto de ajuste de objetivo para cada CTPP es determinado en conformidad con uno de un modelo de proceso de una estructura neuronal y con uno de un modelo de proceso de una estructura no-neuronal, representando uno de los modelos la relación entre el TPP y por lo menos un CTPP.

23. Procedimiento conforme a la reivindicación 22), en el cual un modelo comprende un modelo de primeros principios, un modelo híbrido y un modelo regresivo.

24. Procedimiento de fases múltiples para dirigir el control en la realización de un proceso, con una multitud de parámetros de proceso (MPP), siendo por lo menos uno de los MPP un parámetro controlable de proceso (CTPP), mientras que otro de los MPP es un objetivado parámetro de proceso (TPP); y con un definido valor de objetivo (DTV), que representa un primer límite de un actual valor medio (AAV) del parámetro TPP durante un definido período de tiempo (TP), comprendiendo este procedimiento lo siguiente:

Pronosticar un camino correspondiente a los futuros valores medios (FAV) del parámetro TPP durante un primer período de tiempo (FTP), que se extiende desde un tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $F_1$ , en el que - o previo al mismo - el parámetro TPP pasará a la condición de estado fijo, y el cual tiene una duración de por lo menos TP, siendo el camino pronosticado en base a (i) los AAV del TPP a distintos tiempos durante un primer período de tiempo anterior, que tiene una duración de por lo menos TP y que se extiende desde un tiempo anterior  $T_{-F1}$  hasta el tiempo actual  $T_0$ ; (ii) a los valores actuales de los MPP; (iii) al DTV; así como (iv) en base a un parámetro de un modelo de estructura neuronal y de un modelo de estructura no-neuronal, representando uno de los modelos la relación entre el TPP y por lo menos un CTPP;

Establecer - en base al camino pronosticado - otro valor objetivado (FTV) adicional, que representa un segundo límite para un AAV del parámetro TPP durante un segundo período de tiempo (STP), que se extiende desde el tiempo actual  $T_0$  hasta un tiempo futuro  $T_{F2}$  y que tiene una duración, que es inferior al FTP;

Determinar un punto de ajuste de objetivo para cada CTPP en base al establecido FTV y en base a uno de los modelos y dirigir el control de la realización del proceso en base al punto de ajuste de objetivo para cada CTPP.

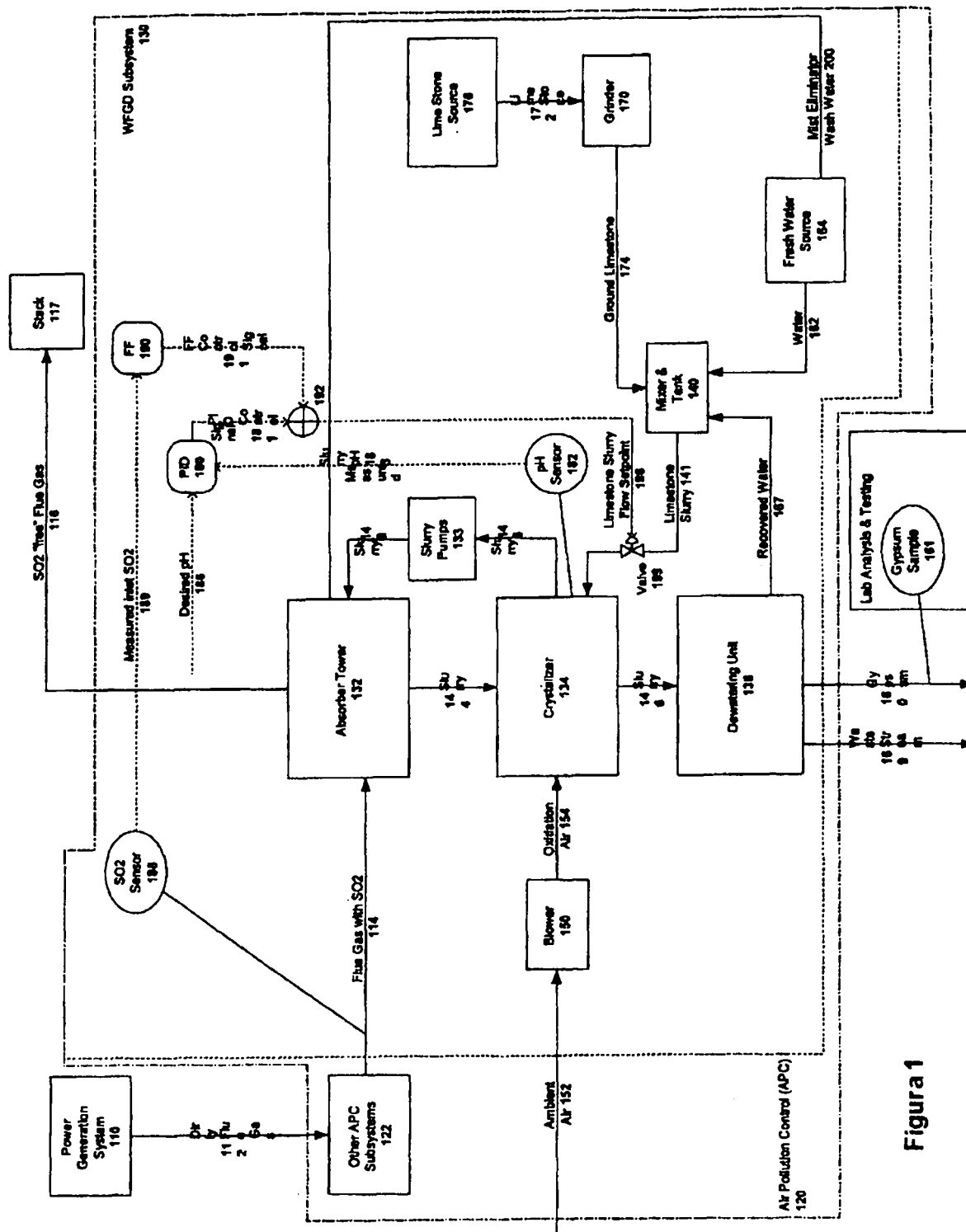


Figura 1

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 1).

**Figura 1**

Sistema de generación de energía <b>110</b>	Sensor SO <sub>2</sub> <b>188</b>	
Gas de escape <b>116</b> libre de SO <sub>2</sub>	Otros sub-sistemas APC <b>122</b>	
Gas de escape con SO <sub>2</sub> <b>114</b>	Medida entrada de SO <sub>2</sub> <b>189</b>	
Aire ambiental <b>152</b>	Soplador <b>150</b>	Valor pH deseado <b>186</b>
Chimenea <b>117</b>	Control de contaminación de aire <b>120</b>	
Oxidación <b>154</b>	Sub-sistema WFGD <b>130</b>	Torre de absorción <b>132</b>
Bombas de lodo <b>133</b>	Sensor de pH <b>182</b>	Fuente de piedra caliza <b>176</b>
Cristalizador <b>134</b>	Lodo <b>146</b>	
Punto de ajuste de lodo de piedra caliza <b>196</b>	Válvula <b>199</b>	
Unidad de deshidratación <b>136</b>	Lodo de piedra caliza <b>141</b>	Agua recuperada <b>167</b>
Lodo <b>148</b>	Mezclador/depósito <b>140</b>	Fuente de agua limpia <b>164</b>
Piedra caliza triturada <b>174</b>	Piedra caliza fresca <b>172</b>	Triturador <b>170</b>
Piedra caliza triturada <b>174</b>	Agua <b>162</b>	Fuente de agua limpia <b>164</b>
Eliminador de nieblas/agua de enjuague <b>200</b>	Yeso <b>160</b>	
Corriente de desperdicios <b>169</b>	Señal de control <b>191</b>	Señal de control <b>181</b>
Valor pH lodo <b>183</b>		

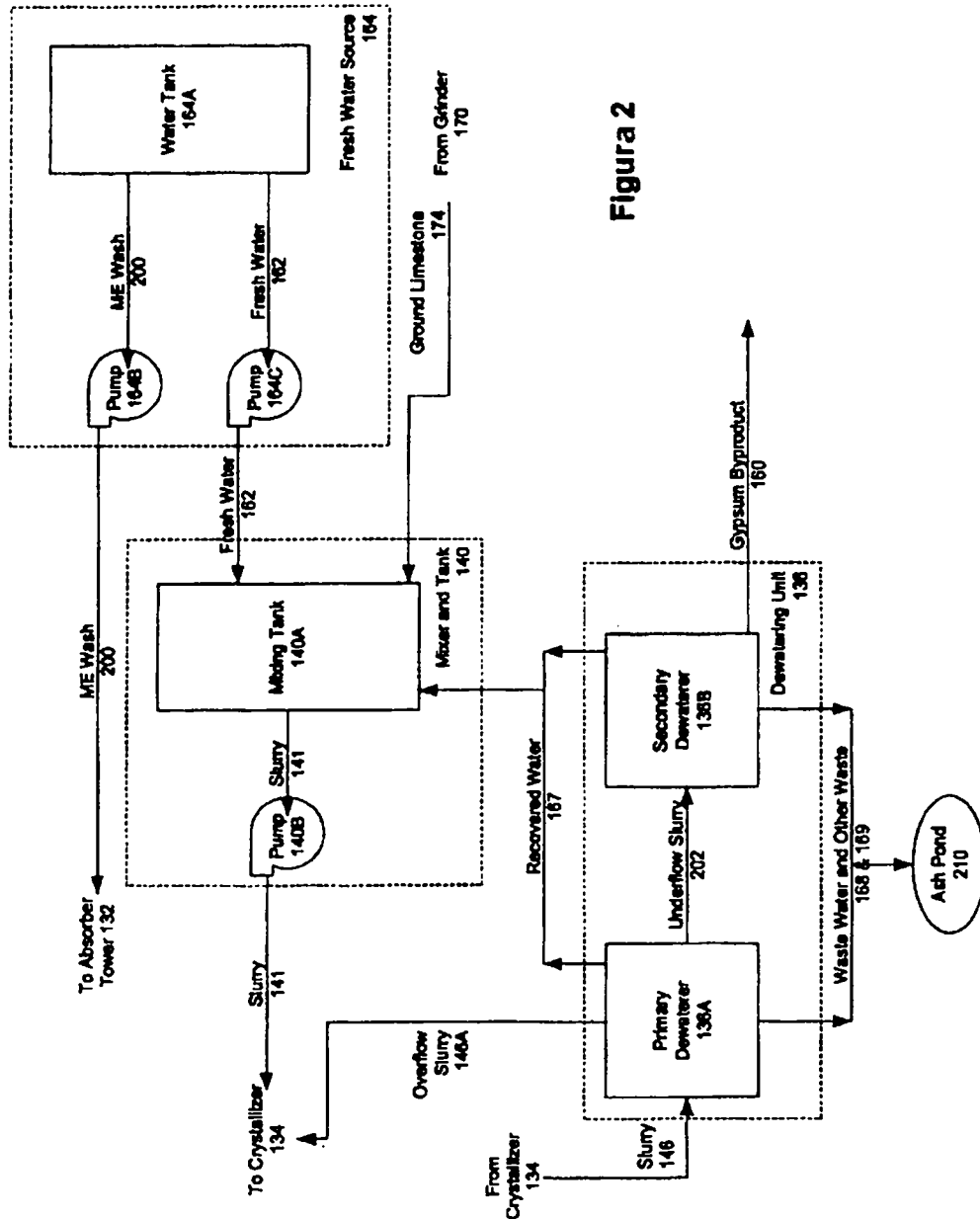


Figura 2

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 2).

**Figura 2**

Hacia la torre de absorción **132**      Agua de enjuague **ME 200**      Bomba **164B**  
Depósito de agua **164A**      Agua limpia **162**      Fuente de agua limpia **164**  
Lodo **141**      Depósito mezclador **140A**      Piedra caliza triturada **174**  
Desde el triturador **170**      Hacia el cristalizador **134**      Rebosadero de lodo **146A**  
Agua recuperada **167**      Desde el cristalizador **134**      Lodo **146**  
Sub-producto yeso **160**      Corriente de fondo de lodo **202**  
Unidad de deshidratación primaria **136A**      Unidad de deshidratación secundaria **136B**  
Agua residual y otros desperdicios **168 & 169**      Embalse para cenizas **210**

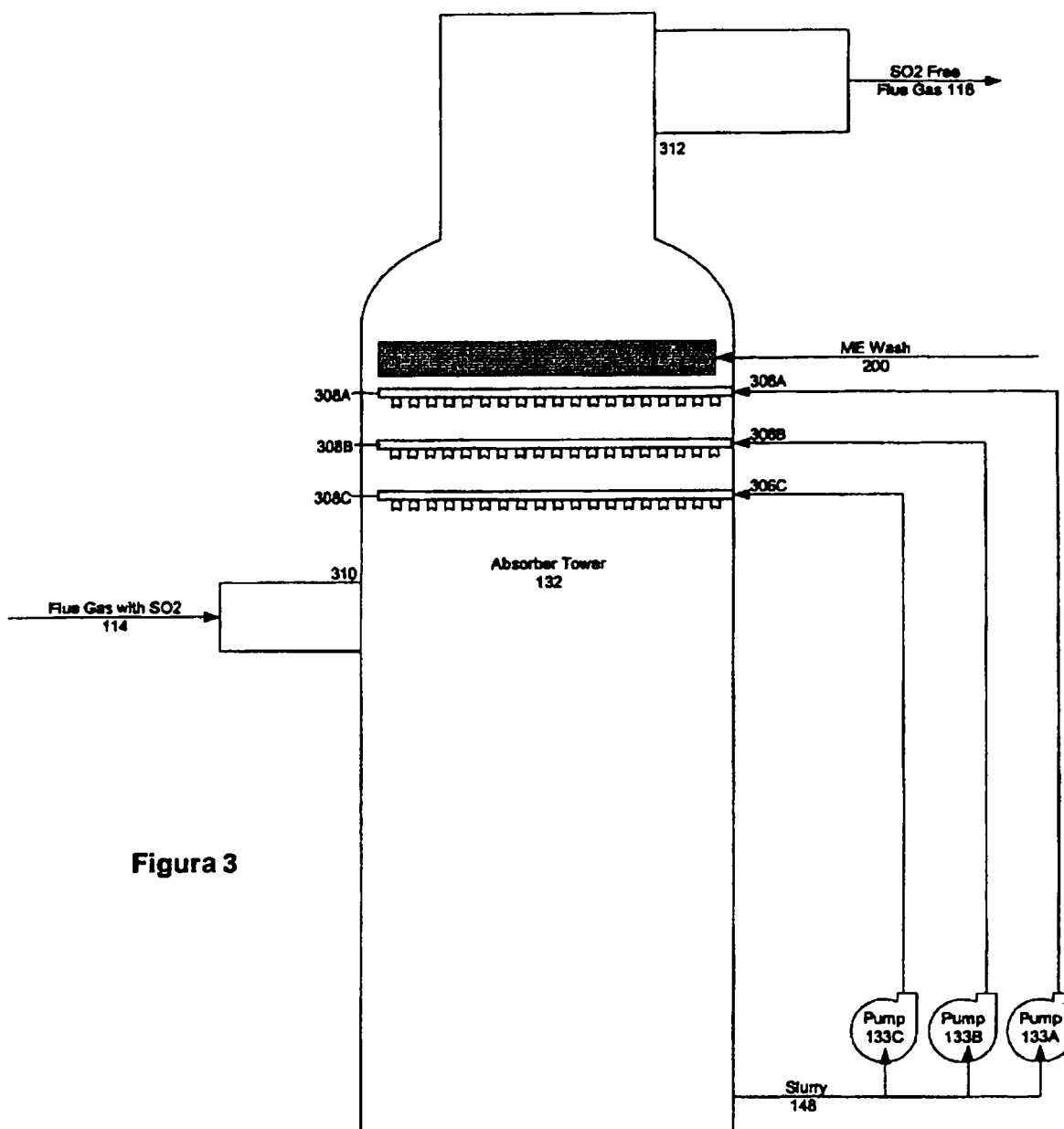


Figura 3

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 3).

**Figura 3**

Gas de escape **116** libre de SO<sub>2</sub>

Agua de enjuague **ME 200**

Gas de escape **114** con SO<sub>2</sub>

Torre de absorción **132**

Bomba **133**

Lodo **148**

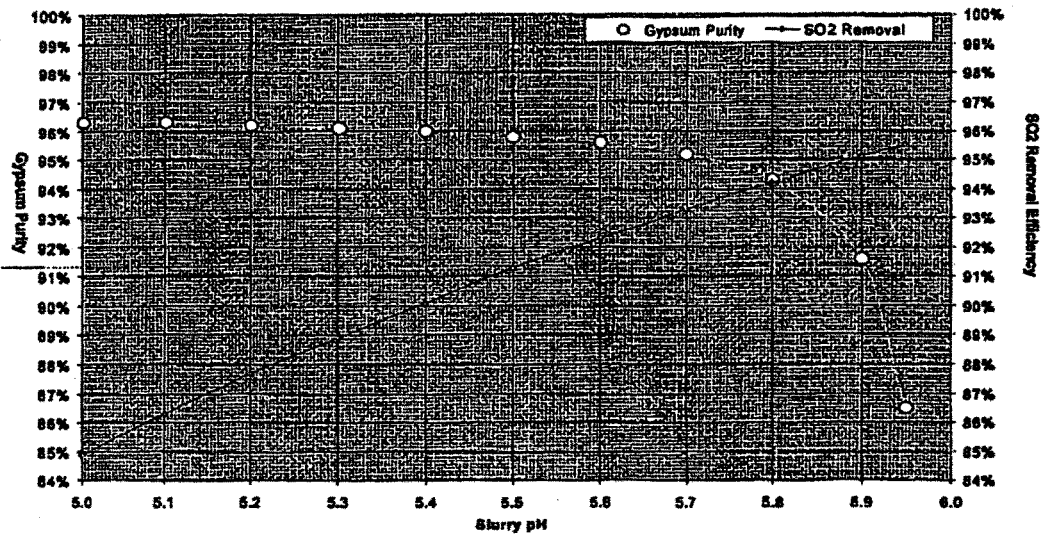


Figura 4

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 4).

**Figura 4**

Pureza del yeso – Eliminación del SO<sub>2</sub>

Pureza de yeso

Eficiencia en la eliminación del SO<sub>2</sub>

Valor pH del lodo

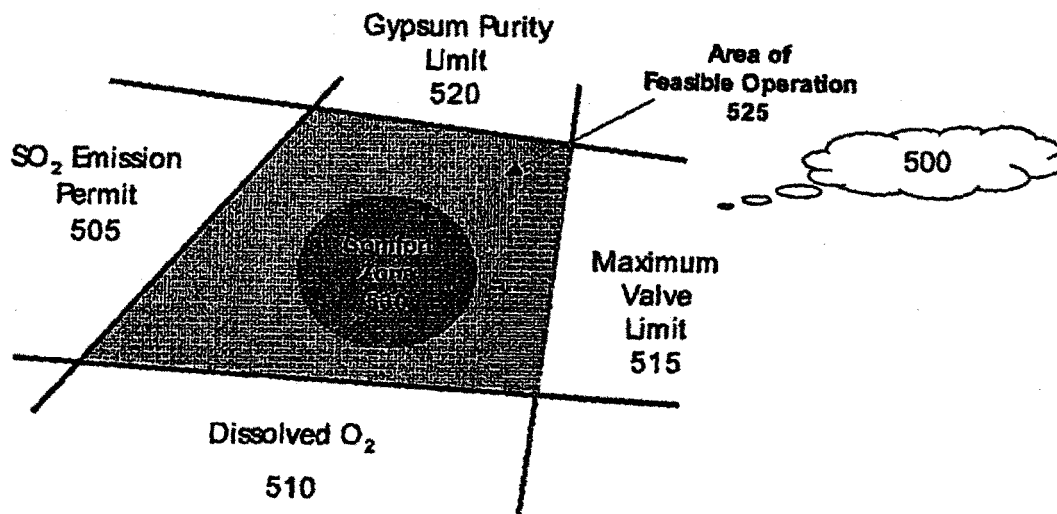


Figura 5A

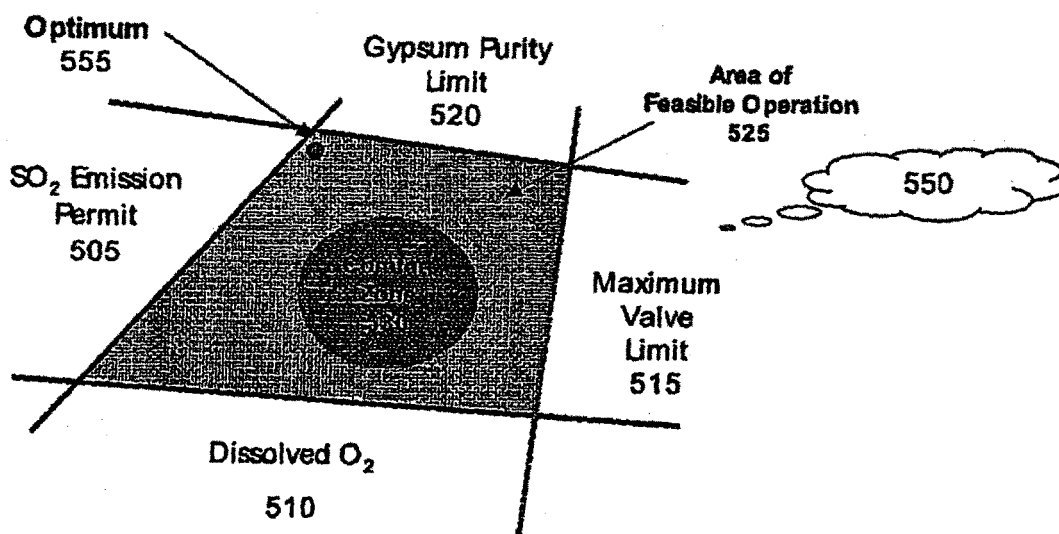


Figura 5B

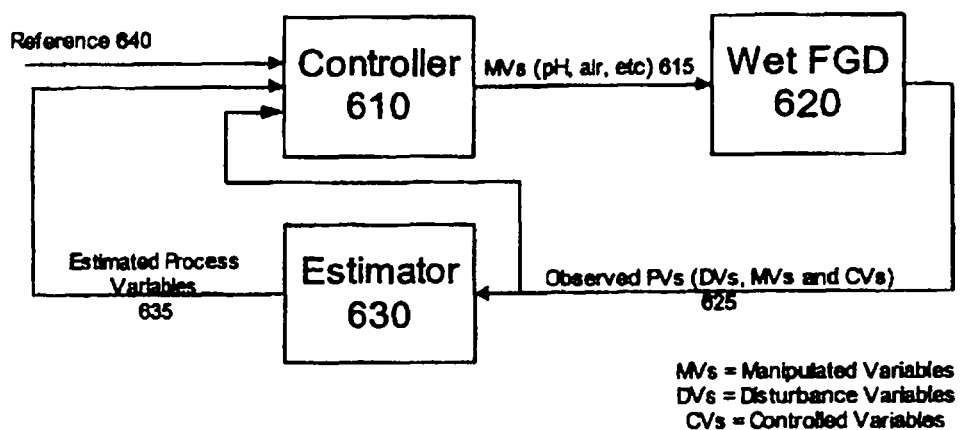
Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figuras 5A y 5B).

**Figura 5A**

Límite pureza del yeso <b>520</b>	Zona de posibles operaciones <b>525</b>
Zona de confort <b>530</b>	Permiso emisión del SO <sub>2</sub> <b>505</b>
Límite máximo de válvula <b>515</b>	O <sub>2</sub> disuelto <b>510</b>

**Figura 5B**

Punto óptimo <b>555</b>	Límite de pureza del yeso <b>520</b>
Zona de posibles operaciones <b>525</b>	Zona de confort <b>530</b>
Permiso emisión del SO <sub>2</sub> <b>505</b>	Límite máximo de válvula <b>515</b>
O <sub>2</sub> disuelto <b>510</b>	



**Figura 6**

**Nota:** En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 6).

**Figura 6**

Referencia 640      Controlador 610      MV (valor pH, aire, etc.) 615

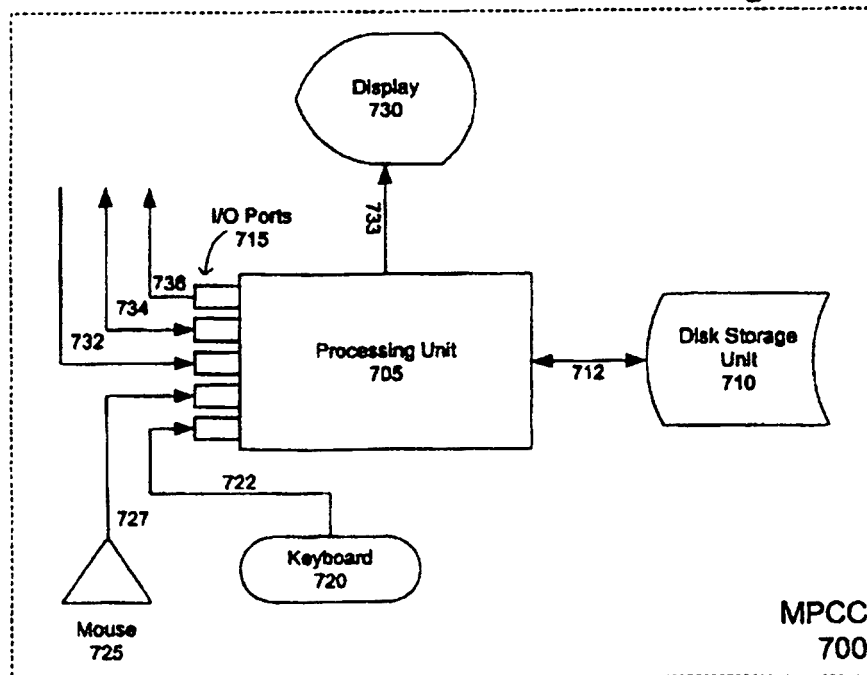
Desulfuración de gas de escape húmedo 620

Estimadas variables de proceso 635      Estimador 630

PV observadas (DV, MV, CV) 625

MV = Variables manipuladas  
DV = Variables de perturbación  
CV = Variables controladas

Figura 7



**Nota:** En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 7).

**Figura 7**

Visualizador **730**

Unidad de procesamiento **705**

Unidad de memoria de disco **710**

Puertas entrada/salida **715**

Teclado **720**

Ratón **725**

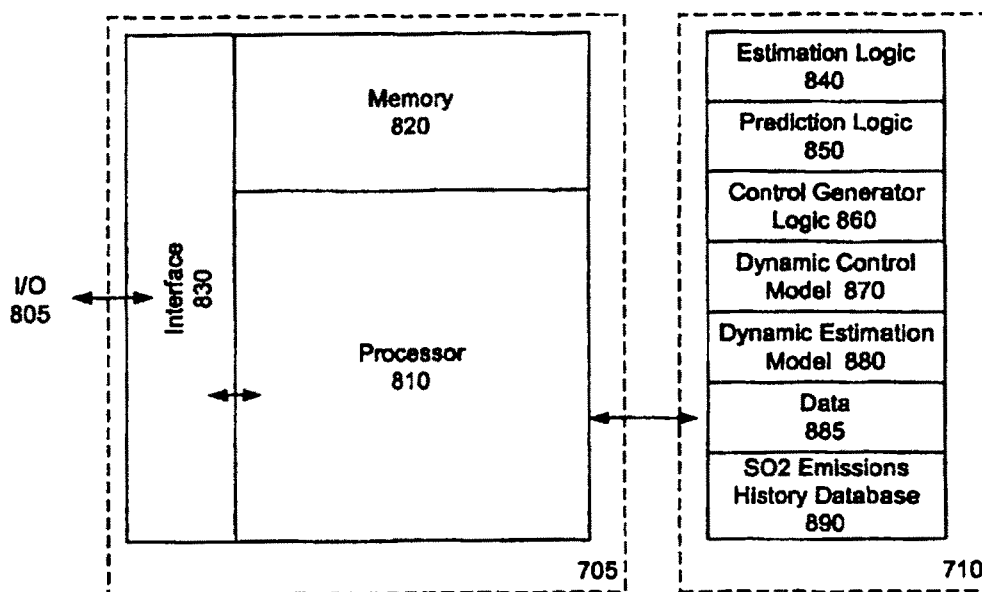
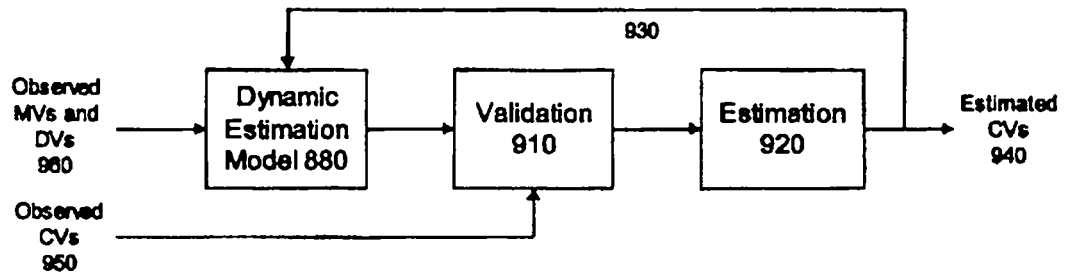


Figura 8

**Nota:** En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 8).

**Figura 8**

Entrada/salida **805**                      Memoria **820**                      Procesador **810**  
Lógica de estimación **840**                      Lógica de pronóstico **850**  
Lógica generadora de control **860**                      Modelo de control dinámico **870**  
Modelo de estimación dinámico **880**                      Datos **885**  
Base de datos histórico emisiones de SO<sub>2</sub> **890**



**Figura 9**

**Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 9).**

**Figura 9**

MV y DV observadas **960**

Modelo de estimación dinámico **880**

Validación **910**

Estimación **920**

CVs estimadas **940**

CVs observadas **950**

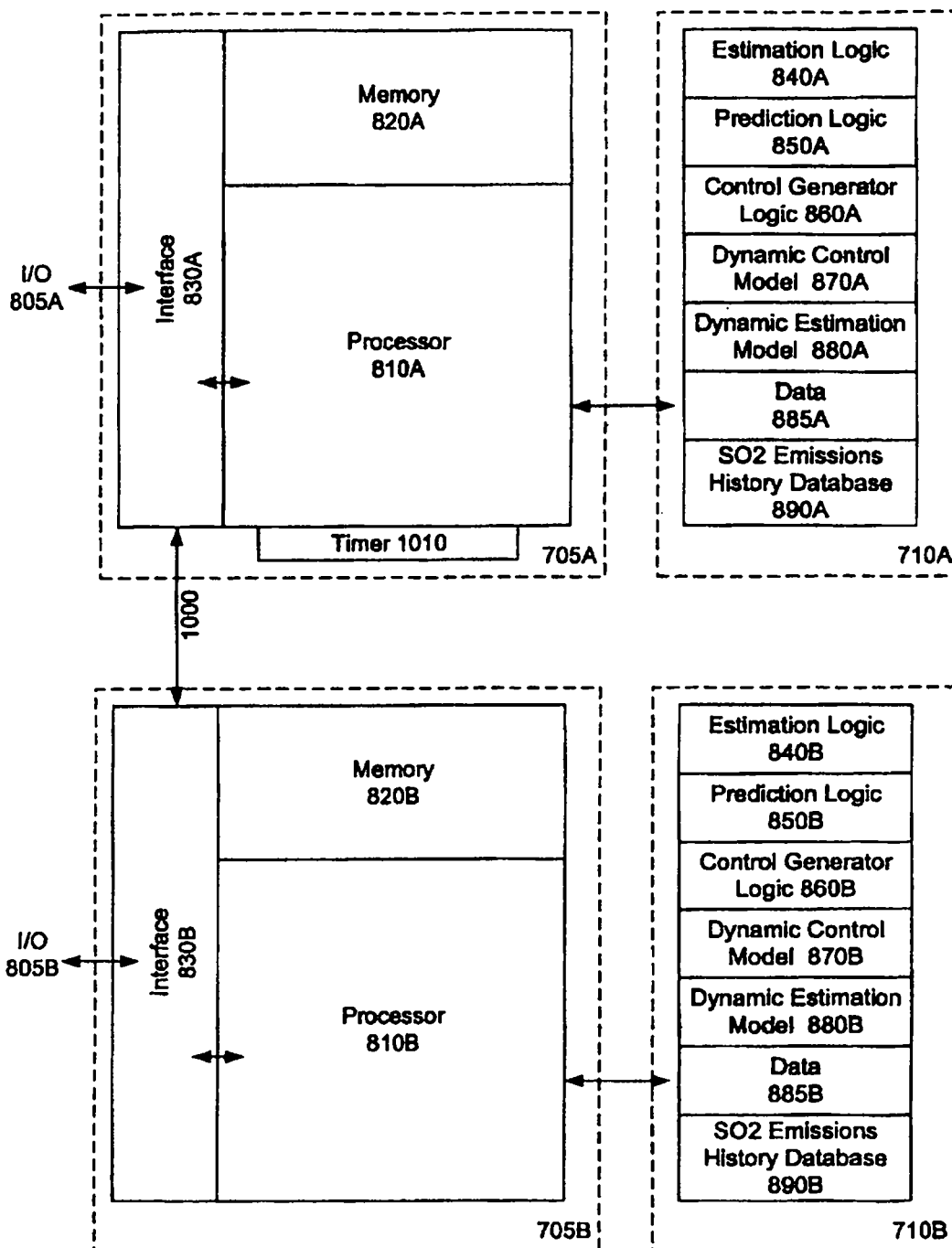


Figura 10

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 10).

**Figura 10**

Entradas/salidas **805A**      Interface **830A**      Memoria **820A**  
Procesador **810A**      Temporizador **1010**  
**705A**  
Lógica de estimación **840A**      Lógica de pronóstico **850A**  
Lógica generadora de control **860A**      Modelo de control dinámico **870A**  
Modelo de estimación dinámico **880A**      Datos **885A**  
**710A**

Entradas/salidas **805B**      Interface **830B**      Memoria **820B**  
Procesador **810B**  
**705B**  
Lógica de estimación **840B**      Lógica de pronóstico **850B**  
Lógica generadora de control **860B**      Modelo de control dinámico **870B**  
Modelo de estimación dinámico **880B**      Datos **885B**  
**710B**

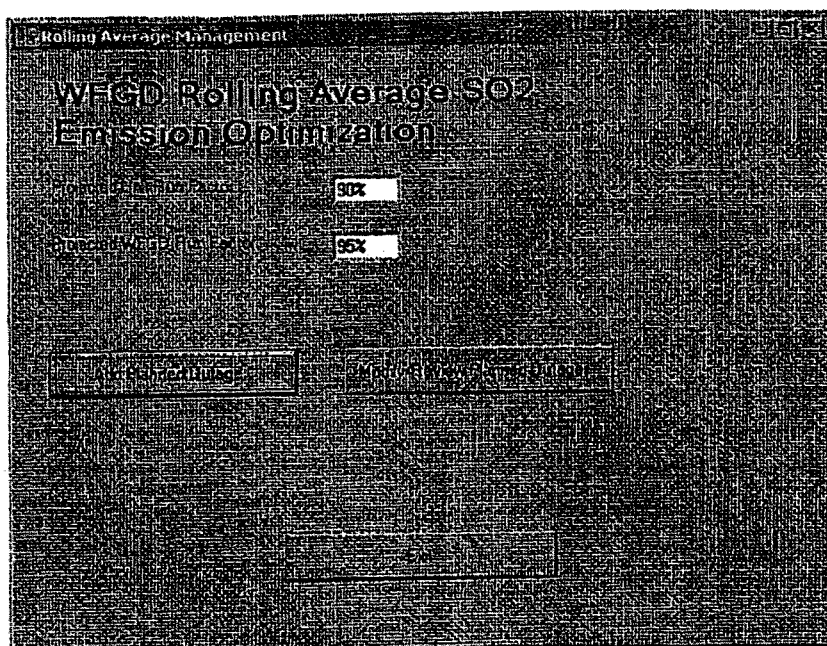


Figura 11A

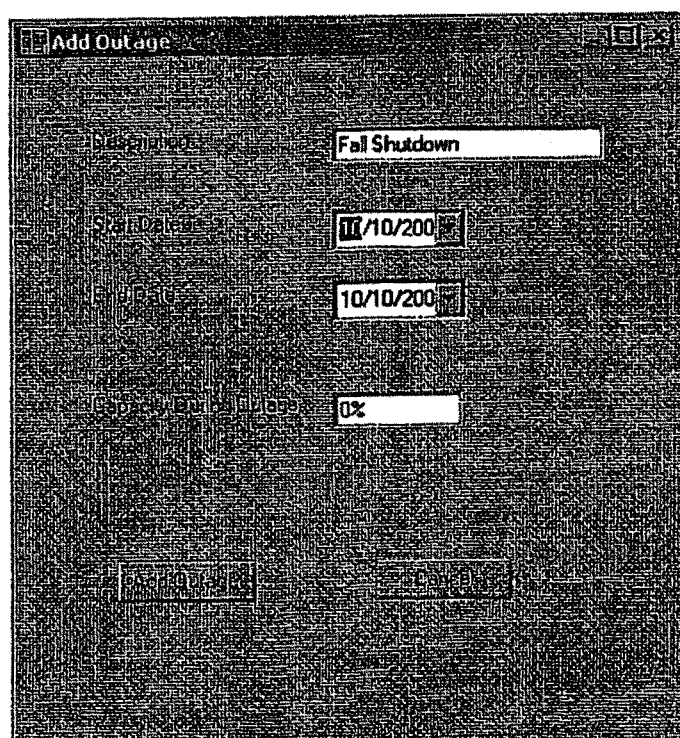


Figura 11B

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figuras 11A y 11B).

**Figura 11A**

Manejo del promedio rotativo

Optimización del promedio rotativo de emisiones de SO<sub>2</sub>  
en la desulfuración de gas de escape húmedo

Proyectado factor de funcionamiento del sistema de generación de energía 90%

Proyectado factor de funcionamiento de la desulfuración de gas de escape húmedo  
95%

Añadir parada programada

Modificar por parada programada

**Figura 11B**

Añadir parada

Descripción: Caída por interrupción de corriente

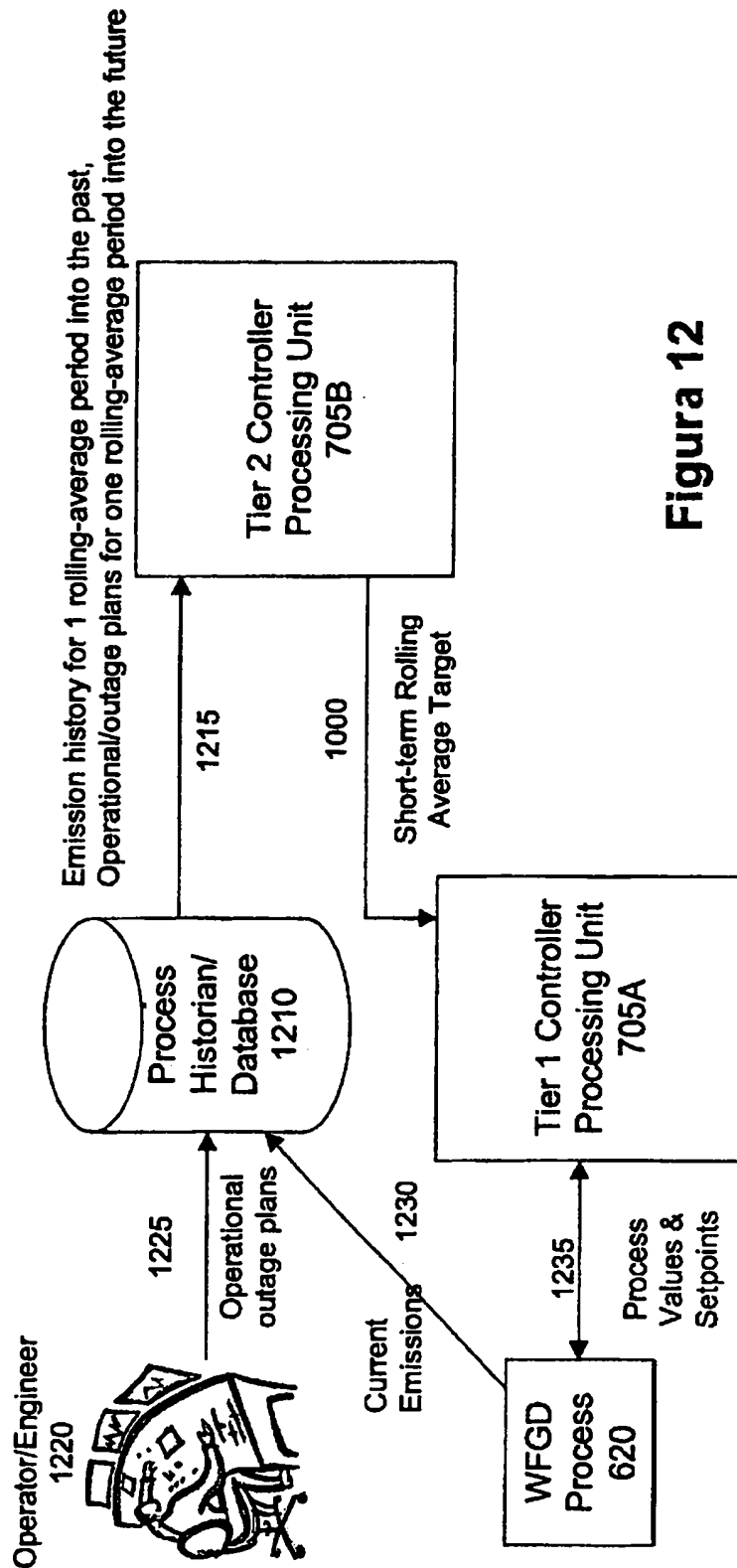
Fecha de comienzo: 10/10/200X

Fecha de terminación: 10/10/200X

Capacidad durante parada: 0%

Añadir parada

Cancelar



**Figura 12**

**Nota:** En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 12).

**Figura 12**

Histórico de emisiones para un periodo del promedio rotativo en el pasado

Programa de operaciones/paradas para un periodo del promedio rotativo en el futuro

Operario/Ingeniero **1220**

Base de datos histórico de proceso **1210**

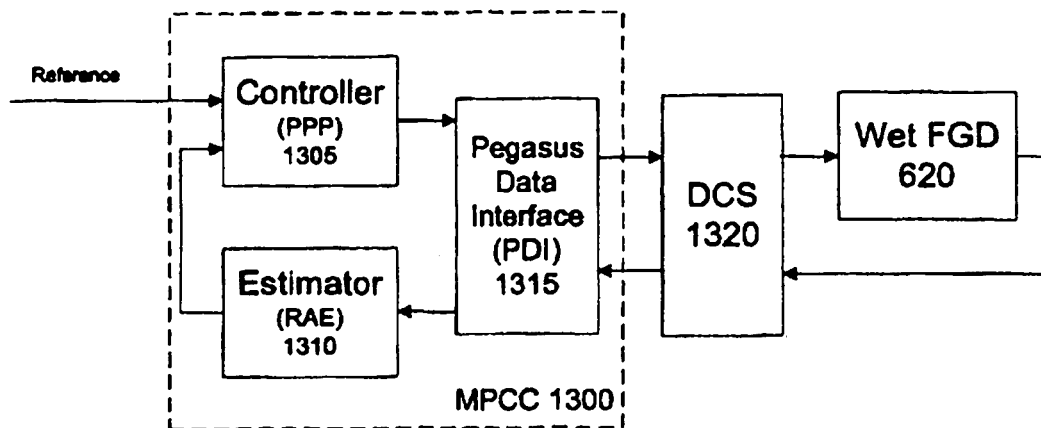
Controlador de fase 2 de la unidad de procesamiento **705B**

Emisiones actuales **1230**      Objetivo a corto plazo del promedio rotativo **1000**

Valores de proceso y puntos de ajuste **1235**

Proceso de la desulfuración de gas de escape húmedo **620**

Controlador de fase 1 de la unidad de procesamiento **705A**



**Figura 13**

**Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 13).**

**Figura 13**

Referencia – Controlador (PPP) **1305**

Estimador (RAE) **1310**

Interface de datos Pegasus (PDI) **1315**

DCS (Distribuido sistema de control) **1320**

Desulfuración de gas de escape húmedo **620**

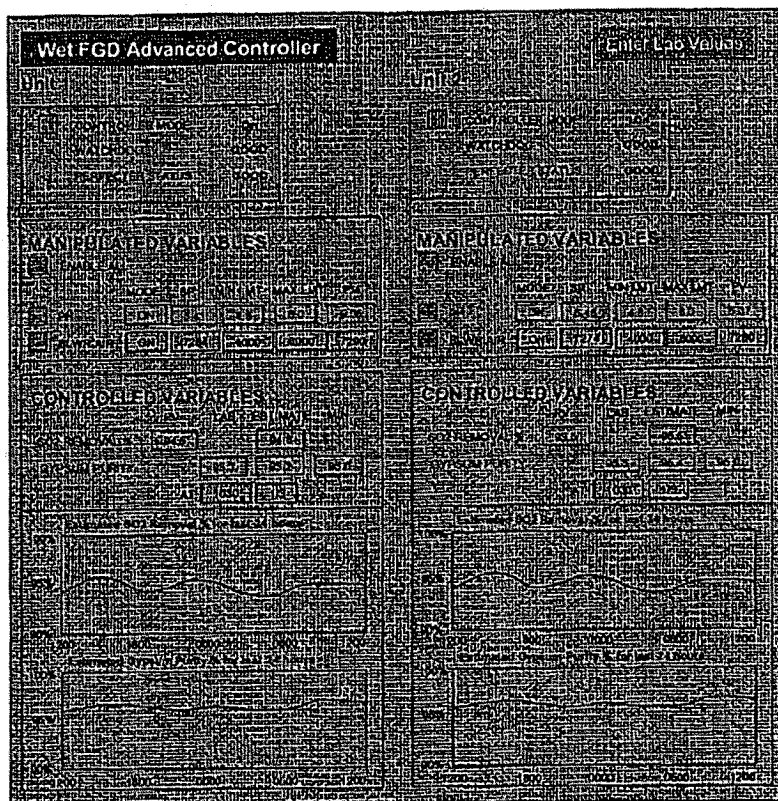


Figura 14A

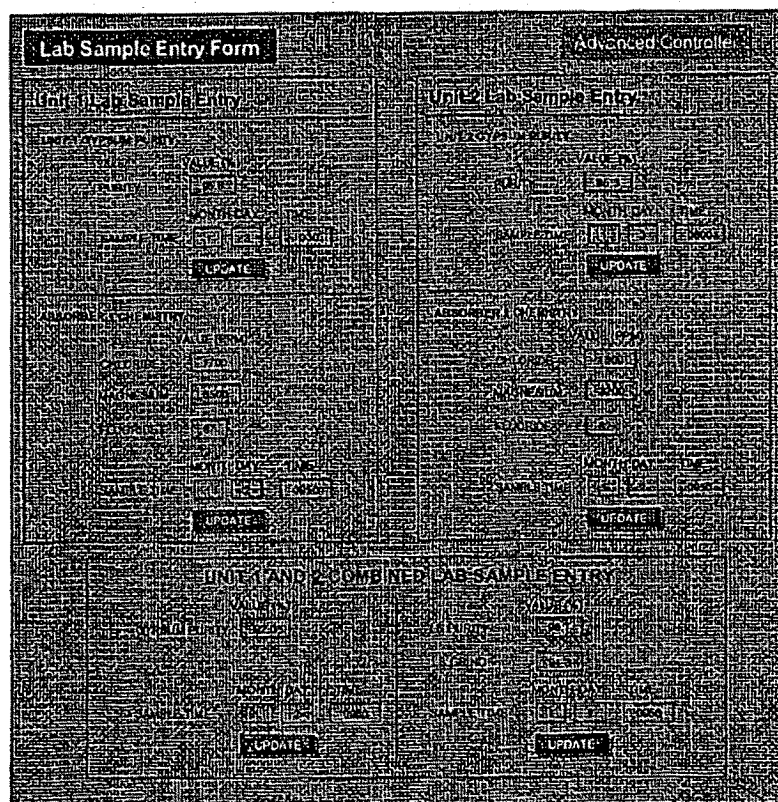


Figura 14B

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figuras 14A y 14B).

**Figura 14A**

Controlador avanzado de desulfuración de gas de escape húmedo

Introducir valores de laboratorio

Unidad 1

Unidad 2

Variables manipuladas

Variables manipuladas

Variables controladas

Variables controladas

**Figura 14B**

Impreso de entrada de la muestra del laboratorio

Controlador avanzado

Unidad 1 Entrada muestra de laboratorio

Unidad 2 Entrada muestra de laboratorio

Pureza del yeso

Pureza del yeso

Fecha

Fecha

Actualizar

Actualizar

Química del absorbedor

Química del absorbedor

Cloruro

Cloruro

Magnesio

Magnesio

Fluoruro

Fluoruro

Fecha

Fecha

Actualizar

Actualizar

Unidad 1 y Unidad 2 – Entrada combinada de muestras de laboratorio

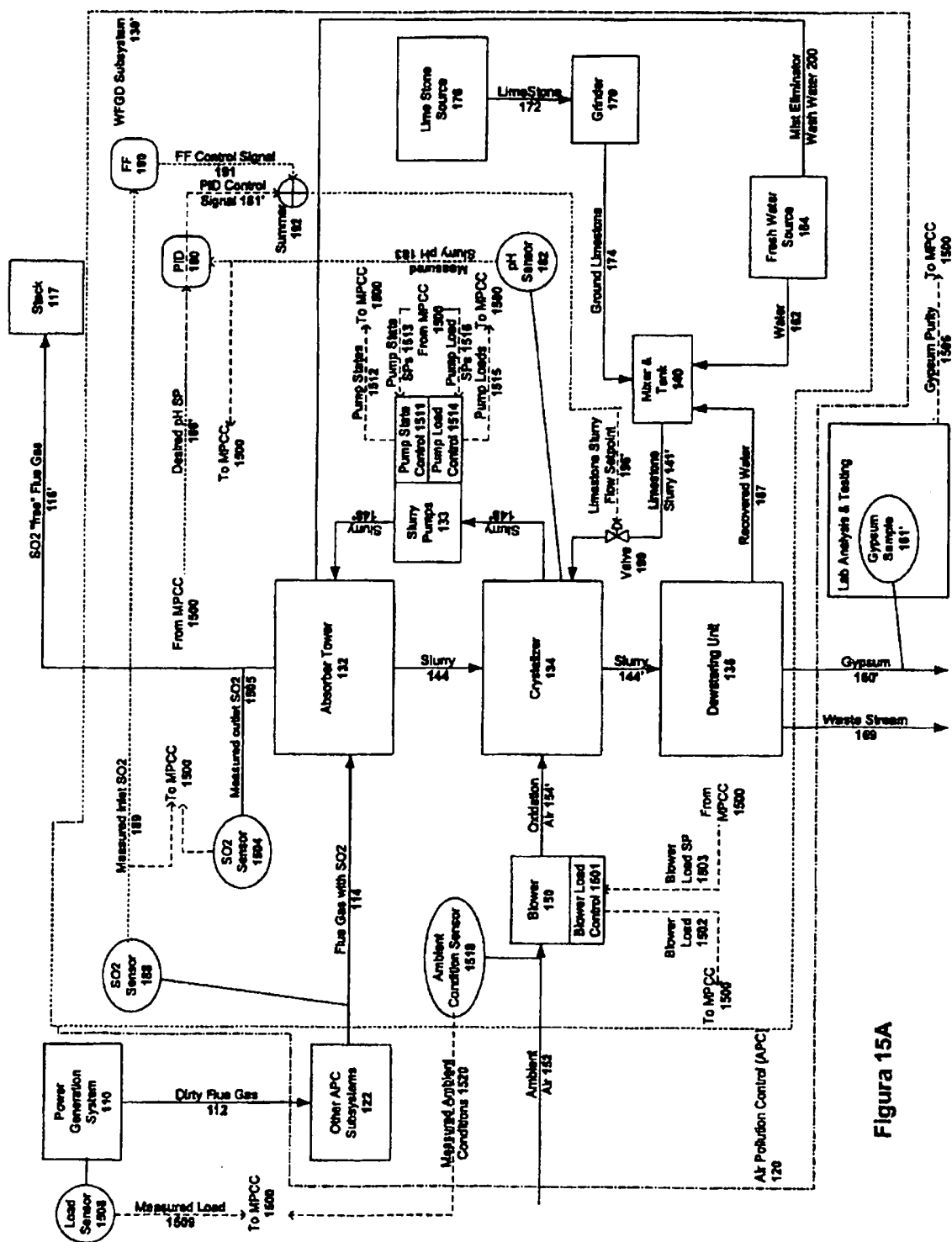


Figura 15A

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 15A).

**Figura 15A**

**Sensor de carga 1508**      **Sistema de generación de energía 110**  
**Gas de escape libre de SO<sub>2</sub> 116'**      **Chimenea 117**      **Carga medida 1509**  
**Gas de escape sucio 112**      **Sensor de SO<sub>2</sub> 188**      **Entrada medida de SO<sub>2</sub> 189**  
**Sub-sistema de desulfuración de gas de escape húmedo 130'**  
**Hacia MPCC 1500**      **Sensor de SO<sub>2</sub> 1504**      **Salida medida de SO<sub>2</sub> 1505**  
**Desde MPCC 1500**      **Punto de ajuste valor pH deseado 186'**      **FF 190**  
**Señal de control de FF 191**      **Verano 192**      **Señal de control PID 181'**  
**Otros sub-sistemas de control de contaminación de aire 122**  
**Gas de escape con SO<sub>2</sub> 114**      **Torre de absorción 132**      **Lodo 148'**  
**Estado de bombas 1512**      **Hacia MPCC 1500**      **Bombas de lodo 133**  
**Control estado de bombas 1511**      **Control carga de bombas 1514**  
**Puntos de ajuste de estado de bombas 1513**      **Desde MPCC 1500**  
**Puntos de ajuste de carga de bombas 1516**      **Cargas de bombas 1515**  
**Hacia MPCC 1500**      **Medido valor pH del lodo 183**      **Lodo 144**  
**Aire ambiental 152**      **Condiciones ambientales medidas 1520**  
**Sensor de condiciones ambientales 1518**      **Soplador 150**      **Aire de oxidación 154'**  
**Cristalizador 134**      **Sensor de pH 182**      **Triturador 170**  
**Fuente de piedra caliza 176**      **Piedra caliza 172**      **Control de carga de soplador 1501**  
**Agua 162**      **Piedra caliza triturada 174**      **Mezclador y depósito 140**      **Válvula 199**  
**Fuente de agua limpia 184**      **Punto de ajuste de flujo de lodo de piedra caliza 196'**  
**Agua recuperada 167**      **Unidad de deshidratación 136**  
**Eliminador de niebla ME Agua de enjuague 200**      **Control de carga de soplador 1501**  
**Carga de soplador 1502**      **Hacia el MPCC 1500**  
**Punto de ajuste de carga de soplador 1503**      **Desde MPCC 1500**  
**Control de contaminación de aire 120**      **Corriente de desperdicios 169**  
**Yeso 160'**      **Análisis y ensayos de laboratorio**      **Muestra de yeso 161'**  
**Pureza de yeso 1506**      **Hacia el MPCC**

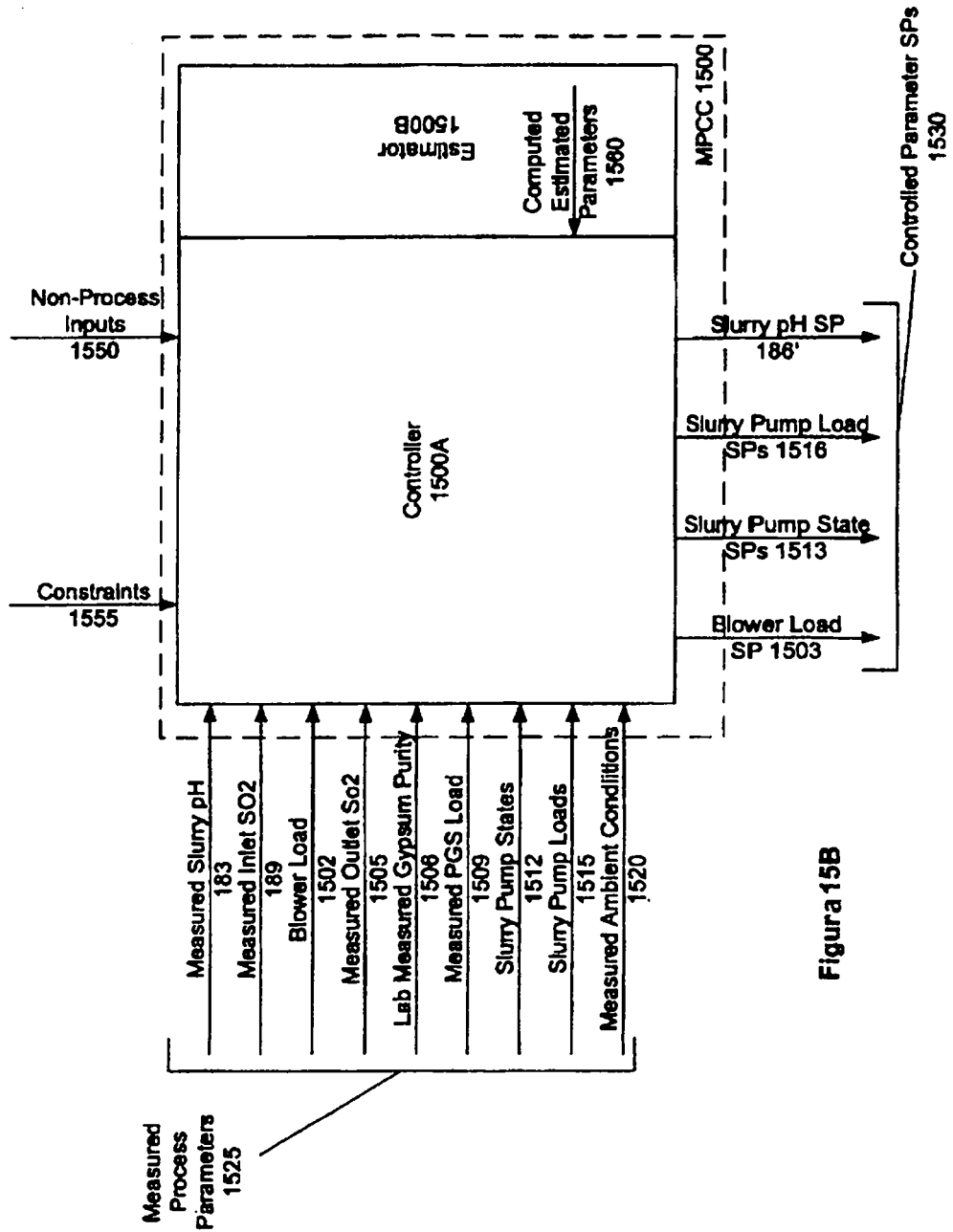


Figura 15B

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 15B).

**Figura 15B**

Medidos parámetros de proceso **1525**      Medido valor pH de lodo **183**  
Medida entrada de SO<sub>2</sub> **189**      Carga de soplador **1502**  
Medida salida de CO<sub>2</sub> **1505**      Pureza de yeso medida en laboratorio **1506**  
Medida carga del sistema de generación de energía **1509**  
Estado de bombas de lodo **1512**      Carga de bombas de lodo **1515**  
Condiciones ambientales medidas **1520**      Limitaciones **155**  
Entradas **1550** no directamente relacionadas con el proceso  
Controlador **1500A**      Estimador **1500B**  
Parámetros estimados computados **1560**  
Puntos de ajuste de parámetros controlados **1530**  
Puntos de ajuste de valor pH de lodo **186'**  
Puntos de ajuste de carga de bomba de lodo **1516**  
Puntos de ajuste de estado de bombas de lodo **1513**  
Punto de ajuste de carga de soplador **1503**

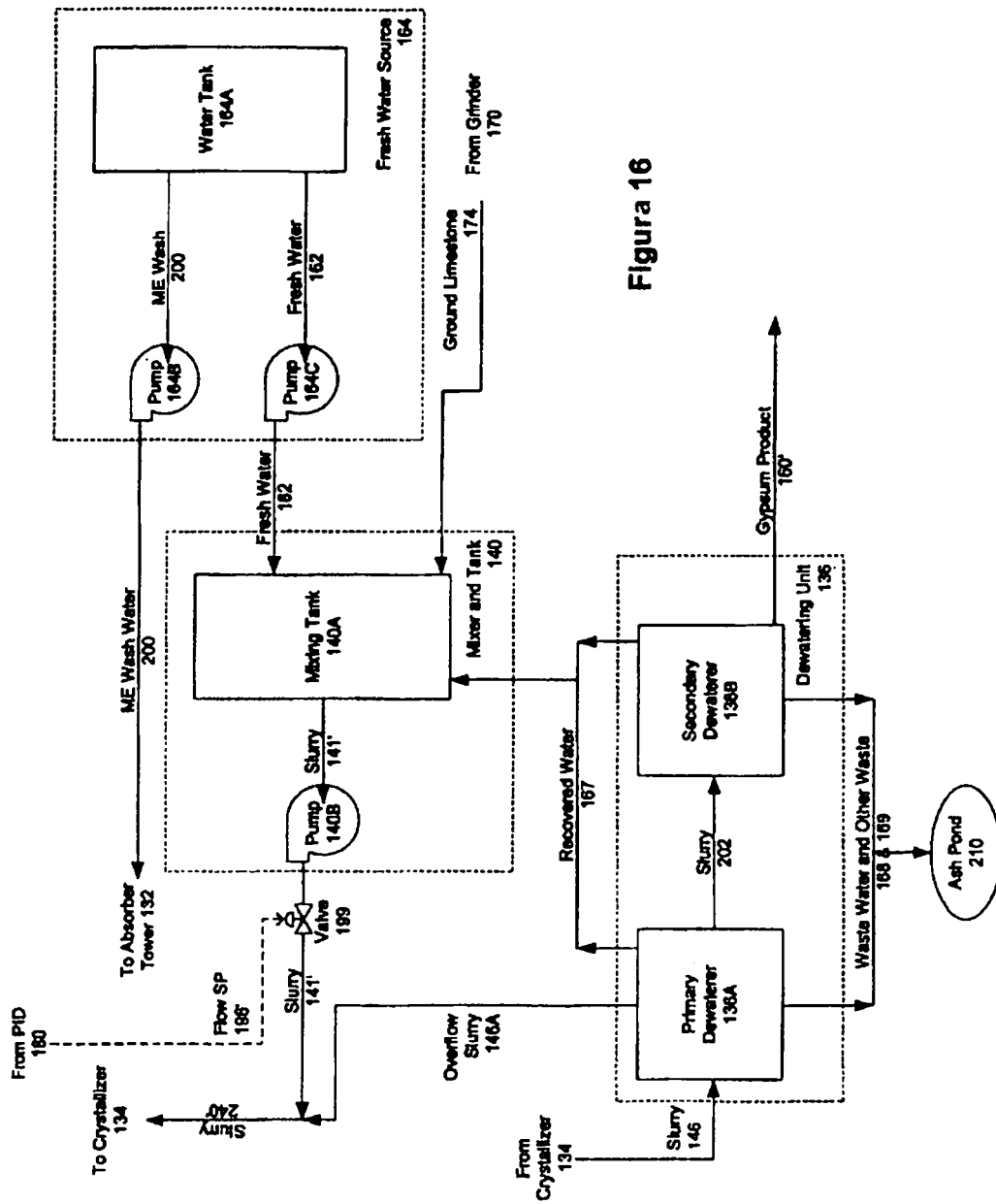


Figura 16

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 16).

## ES 2 311 234 T3

### Figura 16

Desde PID 180      Hacia cristalizador 134      Lodo 240'  
Hacia la Torre de absorción 132      Estimador de nieblas      Agua de enjuague 200  
Bomba 164B      Depósito de Agua 164A      Agua limpia 162  
Fuente de agua limpia 164      Mezclador/depósito 140A      Lodo 141'  
Bomba 140B      Válvula 199      Punto de ajuste de flujo 196'  
Lodo de rebosadero 146A      Mezclador y depósito 140      Piedra caliza triturada 174  
Desde el triturador 170      Desde el cristalizador 134      Lodo 148  
Agua recuperada 167      Deshidratador primario 136A      Lodo 202  
Deshidratador secundario 136B      Producto de yeso 160'      Agua residual 168  
Otros desperdicios 169      Embalse para cenizas 210

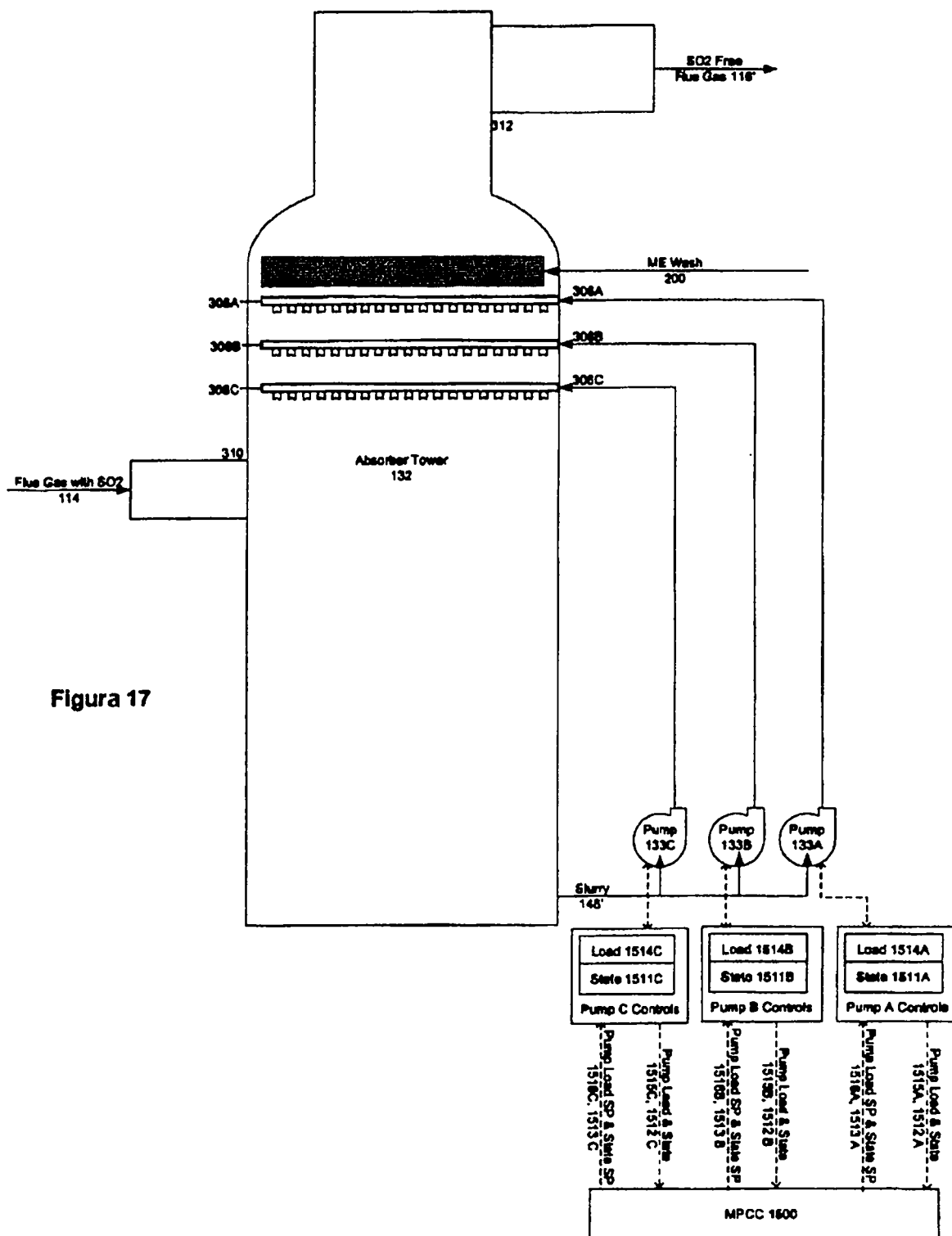


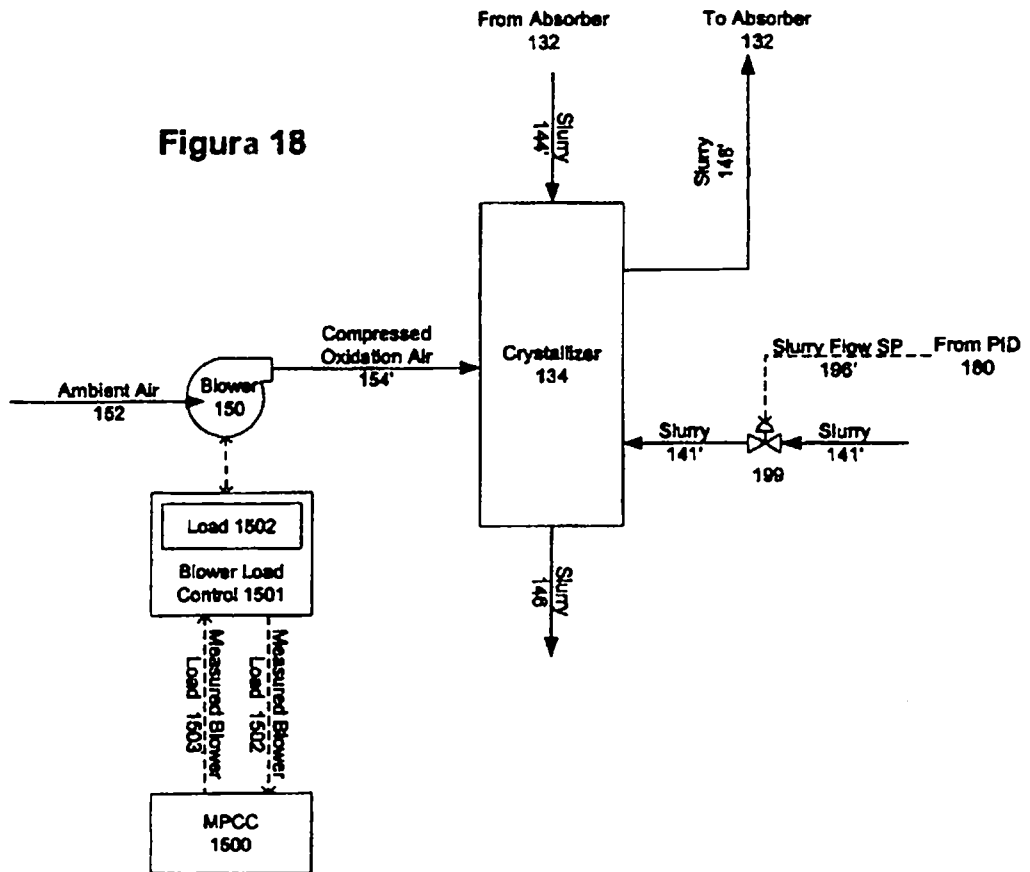
Figura 17

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 17).

**Figura 17**

Gas de escape libre del SO<sub>2</sub> 116'    Eliminator de nieblas ME Agua de enjuague 200  
Torre de absorción 132                      Gas de escape con SO<sub>2</sub> 114  
Bombas 133A, 133B, 133C                      Lodo 148'    Controles bomba 133A  
Carga 1511A                      Estado 1511A                      Bomba carga y estado 1515 A, 1512A  
Punto de ajuste carga bomba 1516A                      Punto de ajuste estado bomba 1513A  
Controles bomba 133B                      Carga 1514B                      Estado 1511B  
Bomba carga y estado 1515B, 1512B  
Punto de ajuste carga bomba 1516B                      Punto de ajuste estado bomba 1513B  
Controles bomba 133C                      Carga 1514C                      Estado 1211C  
Bomba carga y estado 1515C, 1512C  
Punto de ajuste carga bomba 1516C                      Punto de ajuste estado bomba 1513C  
Hacia el MPC 1500

Figura 18



Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 18).

**Figura 18**

Desde el absorbedor <b>132</b>	Hacia el absorbedor <b>132</b>	Lodo <b>144'</b>	Lodo <b>148'</b>
Aire ambiental <b>152</b>	Soplador <b>150</b>	Aire comprimido de oxidación <b>154'</b>	
Cristalizador <b>134</b>	Lodo <b>141'</b>	Desde PID <b>180</b>	
Punto de ajuste de flujo de lodo <b>196'</b>		Carga <b>1502</b>	Lodo <b>148</b>
Control de carga de soplador <b>1501</b>		Medida carga de soplador <b>1502</b>	
Medida carga de soplador <b>1503</b>		Hacia el MPCC <b>1500</b>	

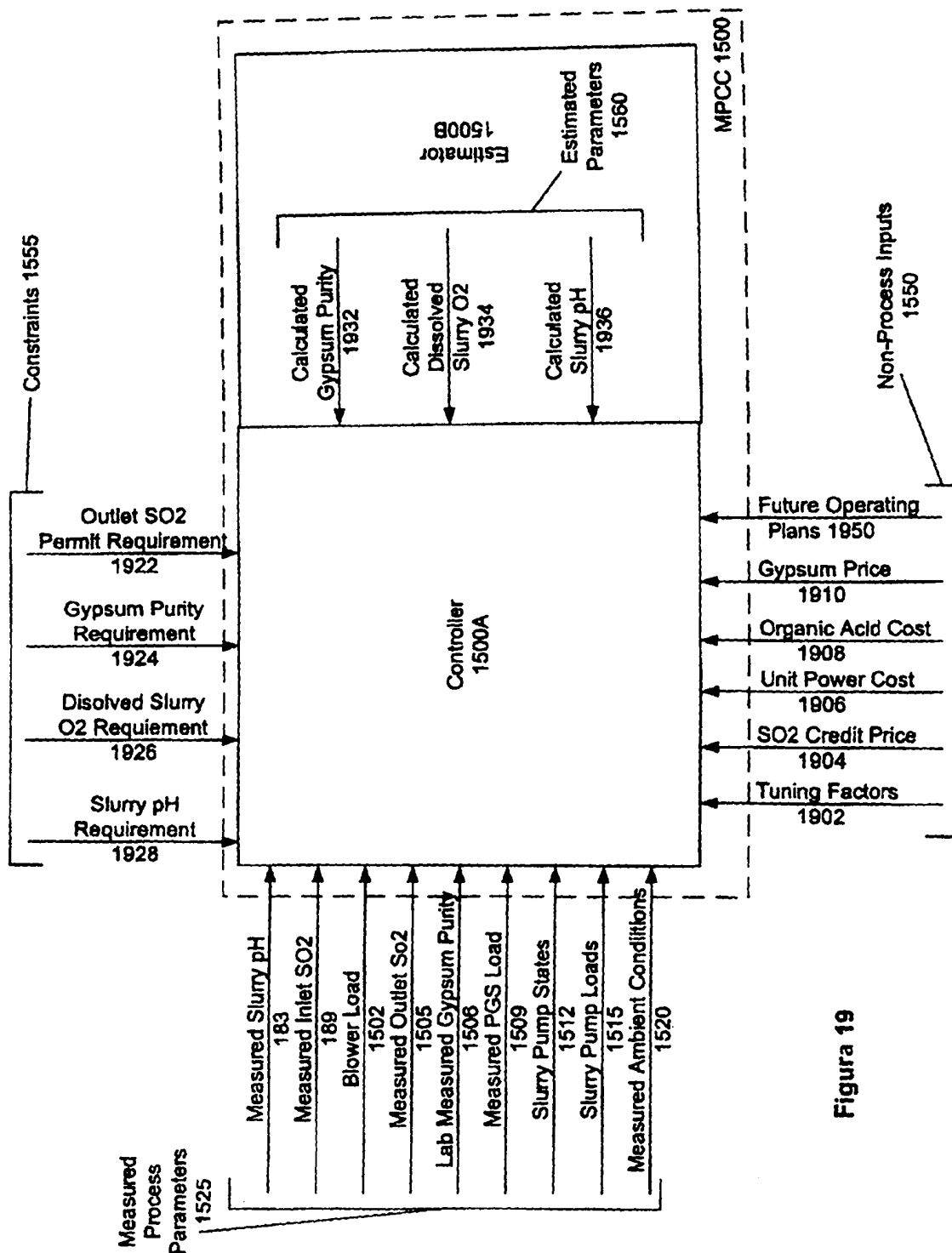


Figura 19

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 19).

**Figura 19**

Limitaciones 1555

Requisito permiso de emisión de SO<sub>2</sub> 1922

Requisito pureza de yeso 1924

Requisito O<sub>2</sub> disuelto en lodo 1926

Requisito valor pH de lodo 1928

Parámetros de proceso medidos 1525

Medido valor pH de lodo 183

Medida entrada de SO<sub>2</sub> 189

Carga de soplador 1502

Medida salida de SO<sub>2</sub> 1505

Pureza de yeso medida en laboratorio 1506

Medida carga del sistema de generación de energía 1509

Estado de bombas de lodo 1512

Carga de bombas de lodo 1515

Medidas condiciones ambientales 1520

Controlador 1500A

Calculada pureza de yeso 1932

Calculado O<sub>2</sub> disuelto en lodo 1934

Calculado valor pH en lodo 1936

Estimador 1500B

Parámetros estimados 1560

Entradas no directamente relacionadas con el proceso 1550

Futuros planes de operación 1950

Precio yeso 1910

Costo de ácido orgánico 1908

Costo de energía eléctrica 1906

Precio de crédito de emisiones de SO<sub>2</sub> 1904

Factores de reglaje 1902

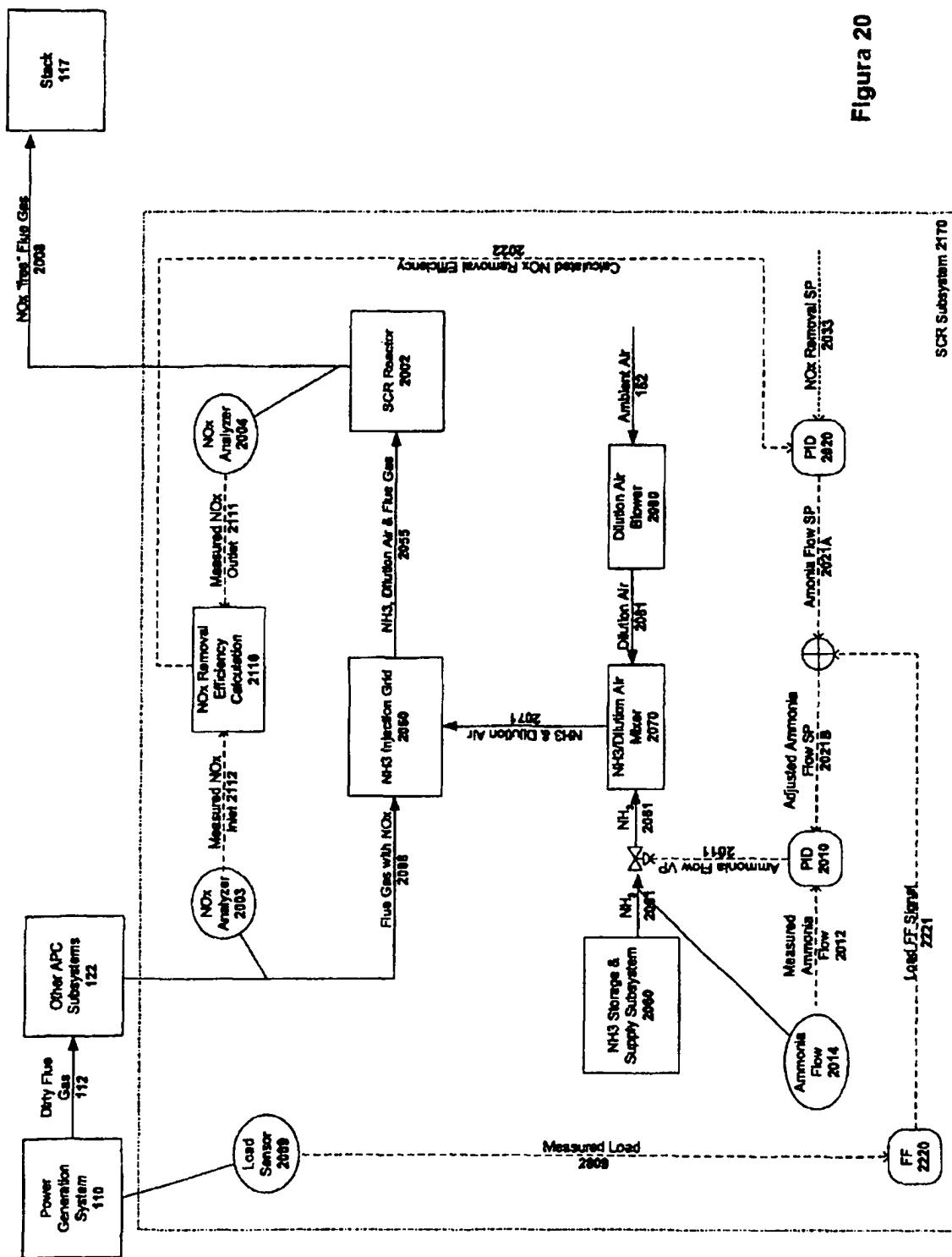


Figura 20

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 20).

**Figura 20**

Sub-sistema de selectiva reducción catalítica (SCR) **2170**

Sistema de generación de energía **110**      Gas de escape sucio **112**

Otros sub-sistemas de control de contaminación de aire **122**

Gas de escape libre de NOx **2008**      Chimenea **117**

Sensor de carga **2009**      Analizador de NOx **2003**      Medida entrada de NOx **2112**

Cálculo de eficiencia de eliminación de NOx **2110**      Medida salida de NOx **2111**

Analizador de NOx **2004**      Gas de escape con NOx **2008**

Rejilla de inyección de NH<sub>3</sub> **2050**      Aire de dilución del NH<sub>3</sub> y gas de escape **2055**

Reactor de SCR **2002**      NH<sub>3</sub> y aire de dilución **2071**      Medida carga **2809**

Sub-sistema de almacenamiento y de entrega del NH<sub>3</sub> **2060**      NH<sub>3</sub> **2061**

Mezclador de NH<sub>3</sub> y aire de dilución **2070**      Punto de ajuste de flujo de amoníaco **2011**

Aire de dilución **2081**      Aire ambiental **152**

Calculada eficiencia en la eliminación del NOx **2022**      Flujo de amoníaco **2014**

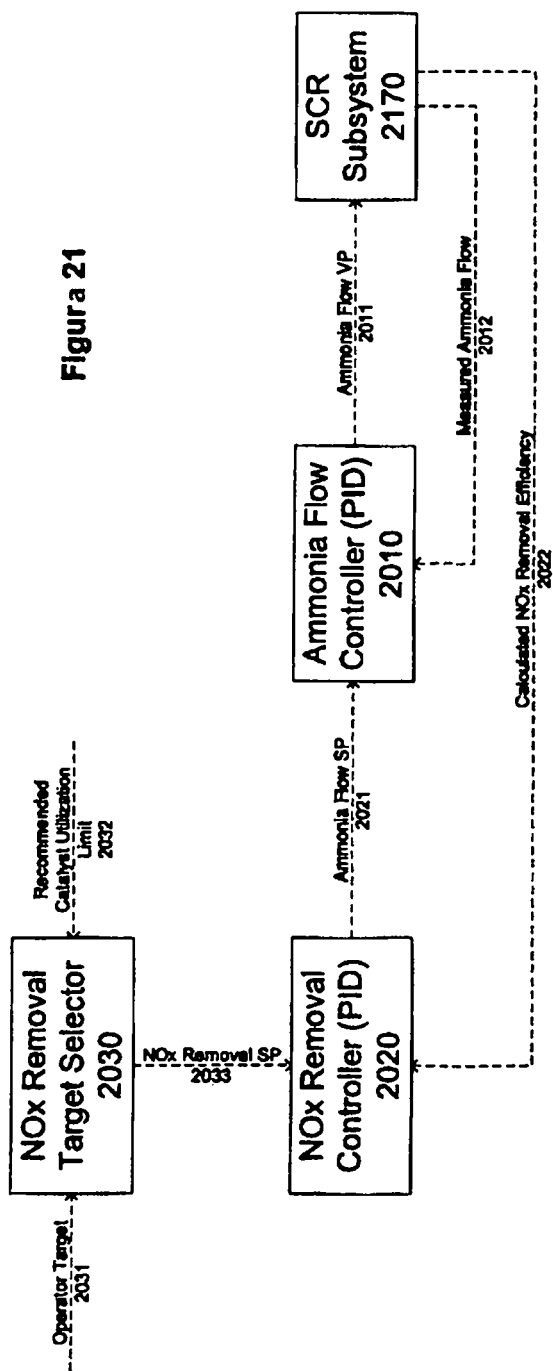
Medido flujo de amoníaco **2014**      PID **2010**

Punto de ajuste del flujo de amoníaco **2021B**

Punto de ajuste del flujo de amoníaco **2021A**      PID **2020**

Punto de ajuste de eliminación del NOx **2033**      Señal de carga FF **2221**      FF **2220**

Figura 21



Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 21).

**Figura 21**

Objetivo del operario **2031**                      Selector de objetivos de eliminación de NOx **2030**

Recomendado límite de utilización de catalizadores **2032**

Punto de ajuste de eliminación de NOx **2033**

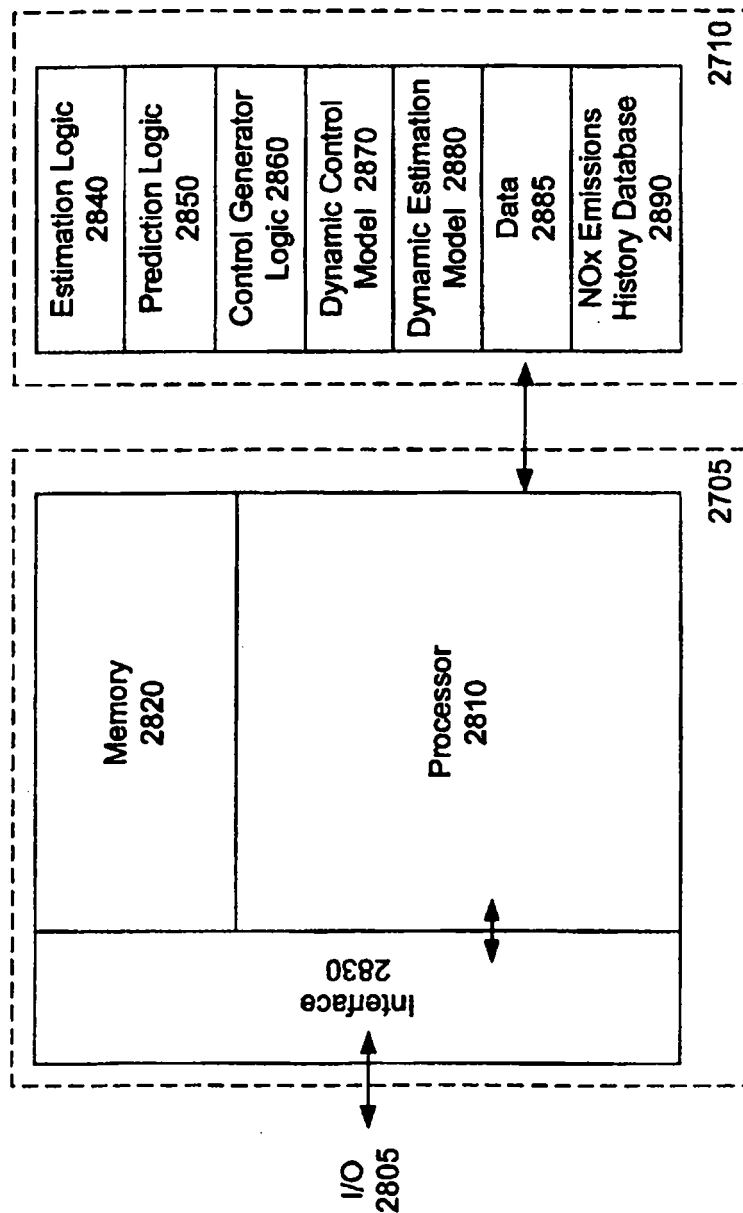
Controlador de eliminación de NOx (PID) **2020**

Punto de ajuste de flujo de amoníaco **2021**

Controlador de flujo de amoníaco (PID) **2010**

Punto de ajuste de flujo de amoníaco **2011**                      Sub-sistema SCR **2170**

Medido flujo de amoníaco **2012**                      Calculada eficiencia de eliminación de NOx **2022**



**Figura 22**

**Nota:** En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 22).

**Figura 22**

**Entradas/salidas 2905      Interface 2830      Memoria 2820      Procesador 2810**

**Lógica de estimación 2840                      Lógica de pronóstico 2850**

**Lógica generadora de control 2860              Modelo de control dinámico 2870**

**Modelo de estimación dinámico 2880              Datos 2885**

**Base de datos del histórico de emisiones de NOx 2890**

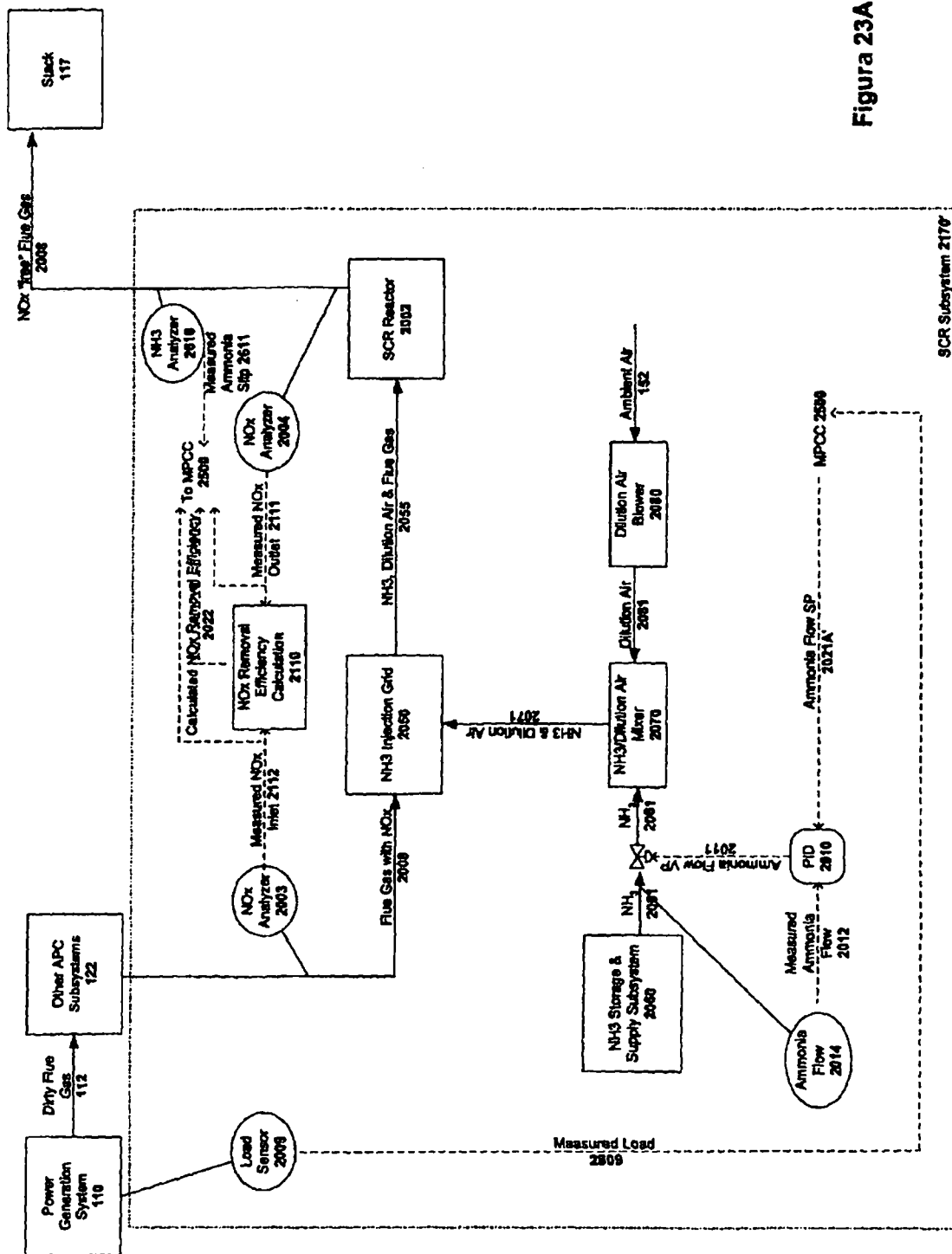


Figura 23A

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 23A).

**Figura 23A**

Sub-sistema de selectiva reducción catalítica (SCR) **2170'**  
 Sistema de generación de energía **110** Flujo de gas sucio **112**  
 Otros sub-sistemas de control de contaminación de aire **122**  
 Gas de escape libre de NOx **2008** Chimenea **117**  
 Sensor de carga **2009** Analizador de NOx **2003** Medida entrada de NOx **2112**  
 Calculada eficiencia de eliminación de NOx **2002** Hacia el MPCC **2500**  
 Analizador de NH<sub>3</sub> **2610** Medido desplazamiento de amoníaco **2611**  
 Cálculo de eficiencia de eliminación de NOx **2110** Medida salida de NOx **2111**  
 Analizador de NOx **2004** Reactor de SCR **2002** Gas de escape con NOx **2008**  
 Rejilla de inyección de NH<sub>3</sub> **2050** NH<sub>3</sub>, aire de dilución y gas de escape **2055**  
 NH<sub>3</sub> y aire de dilución **2071** Medida carga **2809**  
 Sub-sistema de almacenamiento y entrega de NH<sub>3</sub> **2060** NH<sub>3</sub> **2061**  
 Punto de ajuste de flujo de amoníaco **2011** Mezclador de NH<sub>3</sub>/Aire de dilución **2070**  
 Aire de dilución **2081** Soplador de aire de dilución **2080** Aire ambiental **152**  
 Flujo de amoníaco **2014** Medido flujo de amoníaco **2012** PID **2010**  
 Punto de ajuste de flujo de amoníaco **2021A** MPCC **2500**

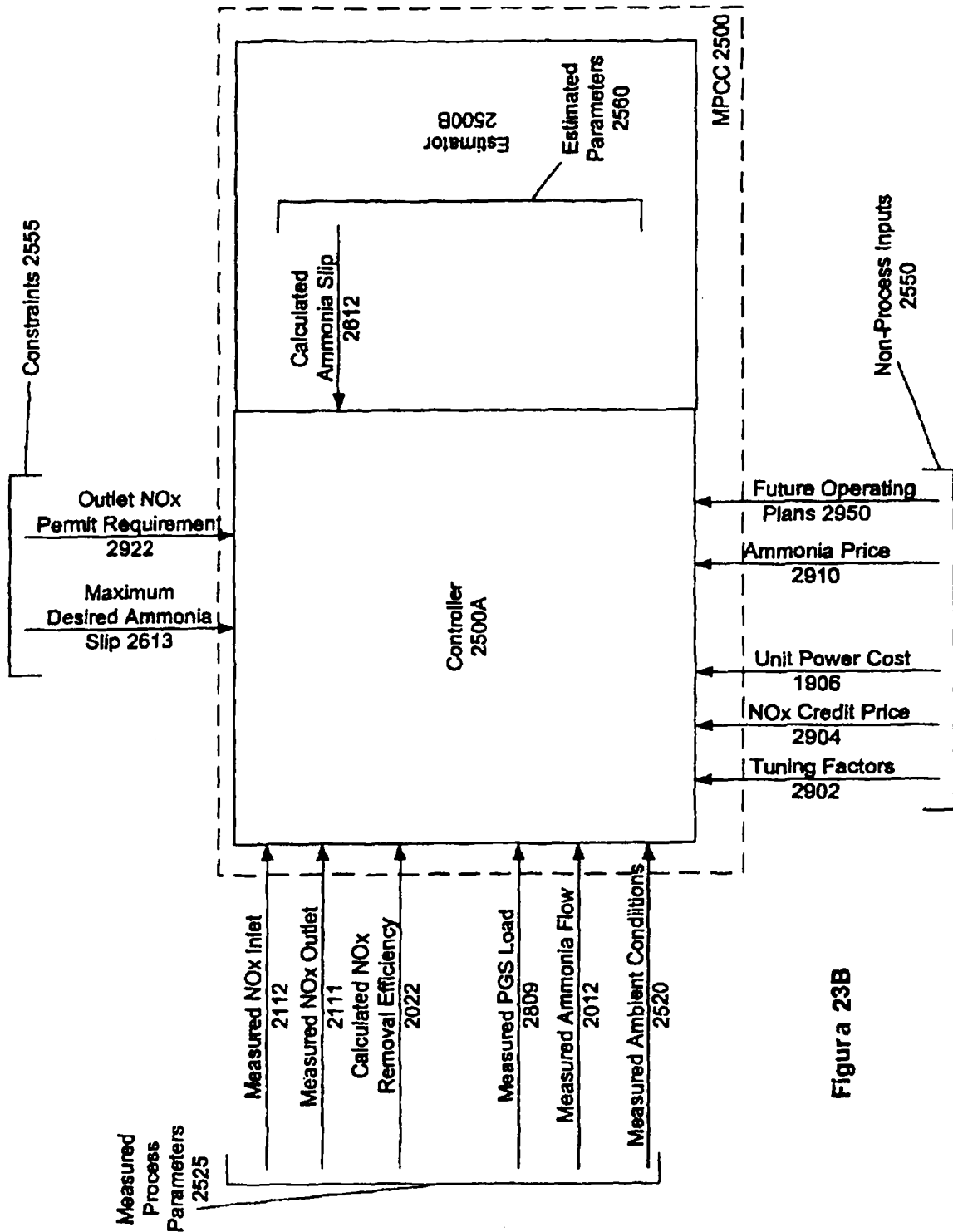


Figura 23B

Nota: En la página adjunta se aporta traducción española de las leyendas que aparecen en este plano (Figura 23B).

**Figura 23B**

Medidos parámetros de proceso **2525**      Medida entrada de NOx **2112**  
Medida salida de NOx **2111**      Calculada eficiencia en eliminación de NOx **2022**  
Medida carga del sistema de generación de energía **2809**  
Medido flujo de amoníaco **2012**      Medidas condiciones ambientales **2520**  
Requisito permiso de emisión de NOx **2922**  
Máximo desplazamiento de amoníaco deseado **2613**      Controlador **2500A**  
Calculado desplazamiento de amoníaco **2612**      Estimador **2500B**  
Estimados parámetros **2560**  
Entradas no directamente relacionadas con el proceso **2550**  
Futuros planes de operación **2950**      Precio del amoníaco **2910**  
Costo de energía eléctrica **1906**      Precio de crédito de emisiones de NOx **2904**  
Factores de reglaje **2902**