

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 459 045**

51 Int. Cl.:

G05D 11/13 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.07.2009 E 09737086 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.01.2014 EP 2310925**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de elaboración de una mezcla de constituyentes con restricciones, particularmente con premezcla**

30 Prioridad:

04.08.2008 FR 0804422

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

07.05.2014

73 Titular/es:

**TOTAL RAFFINAGE FRANCE (100.0%)
2 place Jean Millier, La Défense
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**PETIT, NICOLAS;
CREFF, YANN y
CHEBRE, MÉRIAM**

74 Agente/Representante:

SUGRAÑES MOLINÉ, Pedro

ES 2 459 045 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de elaboración de una mezcla de constituyentes con restricciones, particularmente con premezcla

5 La invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo de control de la elaboración de una mezcla de constituyentes, particularmente de una mezcla con volúmenes muertos de premezcla.

10 Más particularmente, se aplica a la regulación automática de mezclas de constituyentes en línea, tales como, por ejemplo, mezclas de productos petrolíferos, en los que las mezclas elaboradas cumplen un conjunto de especificaciones o de parámetros significativos. En estas aplicaciones, cada producto contenido en la mezcla actúa sobre el conjunto de las características o de los parámetros de la mezcla final obtenida.

15 La invención se aplica particularmente a la elaboración de mezclas en las que las características o los parámetros de los diferentes constituyentes no se conocen bien o pueden evolucionar durante la elaboración de la mezcla. En particular, las mezclas de productos petrolíferos presentan estos aspectos, aunque el procedimiento y dispositivo de la invención puede aplicarse a mezclas de otros productos, tales como, por ejemplo, cementos, pinturas, etc...

20 En todos los casos, se trata de obtener una mezcla que tenga un estado o que presente unos parámetros de constitución definidos por adelantado. Estos parámetros se refieren a las características físico-químicas de las mezclas a obtener. Para una mezcla de productos petrolíferos, por ejemplo, estos parámetros podrían ser el contenido de azufre de la mezcla, su índice de octano, etc... Para una mezcla de cementos, los parámetros serían, por ejemplo, el contenido en cal, el módulo de silicio, el módulo aluminico-férrico, etc.

25 Los procedimientos y dispositivos conocidos en el estado de la técnica permiten elaborar una mezcla en línea o en bucle cerrado, es decir con una realimentación a partir de informaciones medidas en tiempo real, continua o periódicamente, a partir de aparatos de medición (analizadores en línea) dispuestos aguas abajo de la instalación de mezcla (mezcladora). Estos procedimientos y dispositivos se aplican generalmente en unos flujos de constituyentes que proceden de cubetas de productos intermedios.

30 Una realimentación típica utiliza la desviación entre una consigna objetivo y la medida. Se trata de una realimentación mediante retorno de salida.

35 Otra realimentación típica consiste en corregir las predicciones de las características o parámetros de la mezcla, añadiéndole un término que es el resultado de un filtrado de primer orden de la diferencia entre la medida y la predicción sin corrección.

40 El documento US 6 120 173 A describe un sistema de control de las proporciones de una mezcla para la fabricación de cemento cuyo objetivo es mejorar la convergencia entre las propiedades de la mezcla y las propiedades objetivo de la mezcla y reducir los cambios bruscos de control de la mezcla con respecto a unos métodos de control en bucle cerrado que utilizan como entrada la desviación de las propiedades de la mezcla con respecto a las propiedades objetivo de la mezcla y generan nuevas propiedades objetivo a alcanzar en la etapa siguiente. Con este fin, el documento US 6 120 173 A describe un sistema en el que un controlador utiliza unos valores objetivo y la composición química de los materiales de base para generar unas acciones de control y cambiar continuamente las proporciones de los materiales de base. En el modelo descrito, las propiedades de los constituyentes son, o bien medidas en línea, o bien consideradas no cambiantes en el transcurso de la mezcla, mientras que los valores de las propiedades de la mezcla se miden en el transcurso de una primera etapa por medio de un captador, y después se calculan. Este documento no hace alusión a la estimación de las propiedades de los constituyentes de la mezcla ni a los problemas asociados a una mala estimación de las propiedades de estos constituyentes.

50 El documento US 2004/221889 A1 describe un procedimiento y un sistema para controlar una mezcla de fluidos. El objetivo de este documento es proponer un método de optimización simultánea de magnitudes denominadas cuantitativas (del tipo de la presión) y de magnitudes denominadas cualitativas (del tipo de las propiedades de la mezcla) de un proceso de mezcla de fluidos, gases o líquidos. Los valores corrientes de las cantidades (asociados a los constituyentes de la mezcla o a los caudales que salen del sistema de mezcla) y de las cualidades (asociados a los constituyentes de la mezcla) se determinan en una primera etapa. En la etapa siguiente, el control se determina por medio de un proceso de realimentación. En particular, un filtro de Kalman extendido permite modificar las predicciones, realizadas por el modelo durante el cálculo del control, añadiendo a la salida prevista la integral de la desviación de la predicción. En este procedimiento, las desviaciones medidas sobre las cualidades de la mezcla no son imputadas a las cualidades de los constituyentes.

60 Estas realimentaciones típicas presentan el inconveniente de aplicarse sobre la mezcla en la salida de la mezcladora, y no sobre las características de los constituyentes aguas arriba de la mezcladora.

65 Las regulaciones utilizadas tienen generalmente en cuenta restricciones de calidad de la mezcla a fabricar, así como restricciones relacionadas con las vías de la alimentación de los constituyentes (por ejemplo límites relacionados con

las restricciones hidráulicas tales como el dimensionamiento de las bombas, restricciones de homogeneidad en las proporciones calculadas, cuya suma debe ser igual a 1 en el conjunto de las vías). Permiten igualmente supervisar el caudal total de producción de la mezcla.

5 Los dispositivos y procedimientos conocidos presentan el inconveniente de asegurar el contenido de las diferentes especificaciones de la mezcla en función de las propiedades de mezcla integradas (acumuladas o promediadas en volumen) en una cubeta de destino de la mezcla situada inmediatamente aguas abajo de la mezcladora. La medición de las propiedades de la mezcla se efectúa en efecto en general sobre la mezcla instantánea en la salida de la mezcladora, aguas arriba de la cubeta de destino de la mezcla, permitiendo estas medidas obtener una
10 estimación de la calidad integrada (vertido a la salida de la mezcladora o en la cubeta) que es el objeto de la regulación en modo integrado de la mezcla o integrado en la cubeta (la definición de estos modos se dará más adelante).

15 Aunque estos procedimientos y dispositivos que funcionan como medición integrada están bien adaptados a unas áreas de mezcla tradicionales, con unas cubetas de constituyentes, en vertido-descarga eventual, es decir alimentados a medida de su consumo, y una cubeta de destino de la mezcla, son insuficientes para un funcionamiento con un flujo continuo directo aguas abajo de los constituyentes y, eventualmente, una expulsión directa continua de la mezcla elaborada, sin paso por una cubeta de destino.

20 En efecto, dependen de las cualidades de los constituyentes, que pueden variar, particularmente durante un flujo continuo aguas abajo de los constituyentes.

25 Por otro lado, en una configuración de flujo aguas abajo continuo directo de la mezcla, las proporciones de los constituyentes de la mezcla obtenida por los dispositivos conocidos se corrigen teniendo en cuenta el volumen de mezcla presente en la cubeta de destino. De ese modo, en el transcurso de la elaboración de un volumen dado de mezcla en la cubeta de destino, las propiedades de la mezcla son susceptibles de variar considerablemente, lo que no sería aceptable para una expulsión directa continua de la mezcla.

30 Otro inconveniente de los dispositivos y procedimientos conocidos es que difícilmente gestionan lo que no puede realizarse mediante solución de compromiso óptimo. Es decir, cuando no se pueden respetar una o varias restricciones, la solución obtenida conduce a una mezcla de la que no se controla correctamente la desviación respecto a las especificaciones requeridas.

35 Los procedimientos de realimentación tradicionales son igualmente insuficientes para gestionar una sincronización de las instalaciones que comprenden premezclas de constituyentes aguas arriba, en particular en caso de premezclada múltiples en serie y/o en paralelo. Dichas premezclas producen en efecto un retardo sobre los flujos de ciertos constituyentes que necesitan la utilización de márgenes de fabricación importantes con el fin de respetar las especificaciones de la mezcla en la cubeta de destino, pero que inducen una calidad excesiva no necesaria y costosa. Además, este defecto de sincronización puede conducir a unos bombeos (oscilaciones) que entrañan una
40 sollicitación abusiva de los órganos de control, lo cual puede conducir a su desgaste prematuro.

45 Finalmente, los procedimientos y dispositivos conocidos regulan generalmente de manera independiente por un lado la proporción de los constituyentes, y por otro lado la inyección de aditivos para regular de manera separada las especificaciones de la mezcla. Esta independencia de la regulación no permite economizar unas costosas inyecciones de aditivos.

50 Los procedimientos y dispositivos conocidos aseguran igualmente la supervisión del caudal total de la mezcladora, teniendo en cuenta restricciones de límite alto y bajo, relacionadas con limitaciones hidráulicas (dimensionamiento de las bombas en las vías elegidas aguas abajo y aguas arriba de la mezcladora) así como a limitaciones económicas (restricciones de planificación), y que permiten particularmente maximizar el caudal para acortar los tiempos de fabricación, mientras se reduce automáticamente la velocidad en el caso de una restricción activa de aplicabilidad de la formulación calculada.

55 El objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento de control de la elaboración de una mezcla, y un dispositivo correspondiente, que solucione estos inconvenientes.

60 Particularmente, el procedimiento de control según la invención asegura una realimentación de regulación multi-variable mediante un observador dinámico que permite una estimación en tiempo real de las propiedades de los constituyentes de la mezcla, suficiente para garantizar la eficacia del bucle de realimentación. De ese modo, se garantizan las propiedades deseadas de la mezcla a pesar de las importantes incertidumbres sobre las propiedades de los constituyentes, por un lado, y del conocimiento parcial del proceso de mezcla por otro lado.

65 En una solicitud precedente, FR 2901894, el Solicitante ha elaborado un procedimiento de control de la elaboración de una mezcla M de n constituyentes, permitiendo este procedimiento determinar las proporciones u de los constituyentes que entran en la mezcla para obtener un número m de propiedades predeterminadas de la mezcla cuyos valores están comprendidos entre unos umbrales mínimo y máximo predeterminados y/o son sensiblemente

iguales, para m' de entre las mismas ($m' \leq n-1$), a unos valores objetivo predeterminados, comprendiendo dicho procedimiento las etapas siguientes:

(i) en un tiempo $t = 0$,

- 5
- (1) se determina una matriz B que representa un número m de propiedades y n constituyentes;
 - (2) se determina una formulación de referencia \bar{u} a partir de los umbrales mínimo y máximo predeterminados y/o de los valores objetivo predeterminados, tales que las propiedades $B\bar{u}$ de la mezcla estén comprendidas entre dichos umbrales predeterminados, y/o para m' de entre las mismas, iguales a dichos valores objetivo predeterminados; siendo \bar{u} un vector de dimensión n , que representa las proporciones de los diferentes
 - 10 constituyentes que entran en la composición de la mezcla, con $\sum_{i=1}^n \bar{u}_i = 1$;
 - (3) se aplica la formulación \bar{u} a los constituyentes con el fin de elaborar una mezcla M ;

(ii) en el tiempo $t' = t + \Delta t$,

- 15
- (1) se miden las propiedades y_{med} de la mezcla M obtenida aplicando la formulación calculada en el tiempo precedente,
 - (2) se deduce una matriz corregida \hat{B} que representa la estimación de las propiedades de los constituyentes,
 - (3) se determina una nueva formulación u , de manera que las propiedades $\hat{B}u$ de la mezcla estén comprendidas entre dichos umbrales predeterminados, y/o para m' de entre las mismas, sean iguales a dichos valores objetivo predeterminados,
 - 20 (4) se aplica esta nueva formulación u a los constituyentes,

(iii) en el tiempo $t'' = t' + \Delta t$, se repiten las operaciones (1) a (4) de la etapa (ii) precedente;

- 25 (iv) se repite la etapa (iii) a lo largo de toda la duración de la elaboración de la mezcla.

De ese modo, en el tiempo inicial $t = 0$, se determina una matriz B_0 , por ejemplo partir de los datos suministrados por los fabricantes de los constituyentes, o de medidas de laboratorios, y después se actualiza en el transcurso de la elaboración de la mezcla.

Se observará que los umbrales mínimo y máximo predeterminados, así como los valores objetivo predeterminados, se pueden modificar durante la mezcla.

Este procedimiento presenta la ventaja de reactualizar la estimación de las propiedades de los constituyentes, lo que permite tener en cuenta variaciones de sus propiedades en el transcurso del tiempo con el fin de mantener las especificaciones deseadas de la mezcla. Este enfoque original permite superar imprecisiones e incertidumbres de las propiedades de los constituyentes debidas a los errores de medición, a los defectos/contaminaciones, a una homogeneización incompleta o una estratificación de las cubetas, y a la variabilidad en el tiempo de los diferentes constituyentes. Este procedimiento puede también utilizarse ventajosamente en instalaciones con un flujo continuo directo aguas arriba de los constituyentes.

Sin embargo, el estimador, tal como se reivindica en este procedimiento, presenta inconvenientes notables como, por ejemplo, estimar propiedades de los constituyentes que están a veces muy alejadas de la realidad. Se observarán, particularmente en ciertos casos particulares caracterizados por el mal conocimiento de los constituyentes de la mezcla, ralentizaciones del proceso de convergencia, incluso es posible que no se observe ninguna convergencia en absoluto, lo que se traduce en la obtención de características estimadas fuera de la zona física, nulas e incluso negativas (lo que puede conducir a variaciones de control en el sentido contrario al sentido esperado), lo cual no corresponde jamás a la realidad. Dichos fenómenos son frecuentemente esporádicos y temporales, pero tienen como consecuencia la fabricación de mezclas de mala calidad o que requieren más tiempo del necesario y por tanto la obligación de retomar su fabricación en la refinería para componer nuevas mezclas cuyas características sean compatibles con las especificaciones del producto esperado. Esto es costoso en tiempo y en disponibilidad de unidades para rehacer estas mezclas.

La presente invención tiene por objetivo mejorar este procedimiento, mejorando por una parte la ayuda al diagnóstico y al control de la estimación de las propiedades con el fin de limitar las desviaciones con relación a la calidad real de los constituyentes de la mezcla y, por otro lado, mejorando la rapidez de fabricación de la mezcla y la robustez del procedimiento.

Por un lado, el procedimiento según la invención permite en efecto, no solamente asegurar un bucle de realimentación con garantía de convergencia entre la previsión y la medición, en el espacio de calidad de la mezcla saliente, es decir el espacio definido por los dominios de las especificaciones requeridas de la mezcla a la salida, asegurando de ese modo el éxito de las mezclas reales.

Por otro lado, el procedimiento según la invención permite incrementar la robustez en los derivados constatados en caso de incertidumbre residual sobre los constituyentes (propiedades variables, mala homogeneización de la cubeta,...). Esto se traduce en una mejor convergencia en ciertos casos difíciles de mezcla, o en una convergencia más rápida, y por tanto, en un tiempo de realización de la mezcla más corto y una mayor disponibilidad de los equipos para producir más productos. También es posible incrementar los volúmenes fabricados o mejorar la flexibilidad de fabricación de las mezclas.

Con este fin y según los términos de la reivindicación 1, el solicitante ha introducido en la etapa (ii) una corrección de la matriz \hat{B} mediante al menos una operación de corrección que introduce al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad.

Estas nuevas restricciones, que no pueden definirse durante el cálculo de la formulación de referencia, son independientes y distintas de los umbrales mínimo y máximo predeterminados y de valores objetivo predeterminados definidos al inicio —para los objetivos de la mezcla a fabricar—. Por ejemplo, los límites se pueden elegir o bien a partir de los últimos análisis de laboratorio disponibles sobre las bases y los constituyentes o a partir de escalas conocidas a priori, recogidas manualmente o configuradas para una mezcladora dada. Las relaciones de orden pueden definirse de manera condicional en relación con elementos exógenos (del tipo de presencia o no del objetivo de tendencia de incorporación de bases). Estas restricciones pueden estar definidas o no y por tanto añadirse, propiedad a propiedad, en una mezcla dada (el efecto de las restricciones puede ser flexible y contextual en la mezcla considerada, no estará generalmente fijado en la configuración de reglaje de la mezcla afectada). De ese modo, se pueden definir restricciones sobre el contenido de azufre especificando unos límites o contenidos de azufre mínimos y máximos para el conjunto de las bases o incluso unas relaciones de orden o de igualdades entre bases según su contenido de azufre, permitiendo esto fijar un orden de preferencia para la utilización de una base con respecto a otra u otras para conseguir una mezcla cuya especificación debe respetarse imperativamente. Estas restricciones de límites, de igualdad y/o de relación de orden se imponen de manera sistemática sobre el conjunto de las bases en el transcurso del tiempo para ciertas mediciones o para la elección equivalente o preferida de una o varias bases para la mezcla a fabricar.

Gracias a la introducción de estas nuevas restricciones, las propiedades estimadas se pueden utilizar como indicación de la evolución de la calidad de los constituyentes (independientemente del cálculo de la formulación que se le asocia para supervisar la mezcla). Las propiedades estimadas de los constituyentes se pueden utilizar como información de diagnóstico independiente del control de la mezcladora, y permiten mejorar el conocimiento de los constituyentes utilizados (detección de un constituyente de calidad sospechosa,...).

Ventajosamente, las propiedades y_{med} de la mezcla medidas en el transcurso de la operación (1) de la etapa (ii) se miden por medio de un proceso continuo de medición sobre la mezcla elaborada. Por proceso continuo de medición, se entiende o bien una medición efectuada en continuo porque lo permite su naturaleza, o bien una sucesión de extracciones de muestras y de medidas de las muestras.

Estas medidas instantáneas en la mezcla, desde su formación, permiten utilizar el procedimiento para una instalación cuya mezcla se distribuye directamente en continuo. El procedimiento está entonces en modo instantáneo.

El procedimiento según la invención presenta la ventaja de poder funcionar en modo integrado, pudiendo entonces acumularse o promediarse en volumen las medidas en una cubeta de destino de la mezcla. Se puede prever igualmente conmutar del modo integrado al modo instantáneo (o a la inversa) en el transcurso de la elaboración de la mezcla.

Por ejemplo, esta conmutación se puede realizar manualmente por un operador con el fin de modificar el modo de regulación requerido en el transcurso de la mezcla.

La conmutación se puede realizar igualmente de forma automática, en secuencia, por ejemplo al final de la mezcla, al final de un volumen de circulación alcanzado, y teniendo en cuenta el volumen que queda por fabricar. Esta configuración se utiliza particularmente para garantizar una expulsión directa por oleoducto, o incluso para garantizar la calidad de la totalidad del producto residual en las líneas, en el caso de volúmenes de líneas importantes entre una mezcladora y una cubeta de almacenamiento de producto acabado situada en un área de almacenamiento alejada.

Ventajosamente, en un tiempo predeterminado en el transcurso de la elaboración de la mezcla, se miden una o varias propiedades de los constituyentes y se actualiza la matriz \hat{B} que representa las propiedades de los constituyentes. De esta manera, es posible, sin que sea preciso el reinicio del procedimiento, actualizar mediante una medida una o varias propiedades de un constituyente, lo que permite mejorar la estimación de la o de las propiedades de este constituyente. La velocidad de actualización puede ser regulable, propiedad a propiedad, para cada constituyente.

Según la presente invención, se puede corregir la matriz B mediante al menos una operación de corrección para introducir al menos una restricción correspondiente a las restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad, en al menos una de las propiedades. Esta operación de corrección consiste en modificar el valor inicial de B que es B₀, correspondiente a la ecuación (1) siguiente

5

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu (y_j - y_j^{med}) \quad (1)$$

en la que

- 10
- β_j , un número real estrictamente positivo, es una constante de regulación del tiempo de convergencia que permite diferenciar la rapidez de convergencia de la estimación, propiedad a propiedad
 - la matriz H es una matriz simétrica definida positiva que tiene por utilidad asegurar una normalización de la toma en consideración de la desviación medición-predicción que permite el cálculo de la desviación de la predicción de calidad de los constituyentes, con el fin de asegurar las propiedades de convergencia del procedimiento.
- 15
- \hat{B}_j^t es la transpuesta de \hat{B}_j , en la que j es el índice de las propiedades de la mezcla,

obteniéndose la modificación de \hat{B} mediante sustitución de la ecuación (1) por una ecuación correspondiente a una nueva ley de adaptación y/o por la adición de un término complementario δ .

- 20
- Dicho de otra manera, para corregir la matriz \hat{B} , se modifica el valor inicial de \hat{B} , es decir B₀, reemplazando la ecuación (1) por una nueva ecuación diferencial que corresponde a una nueva ley de adaptación para integrar el respeto asintótico de las restricciones referidas y/o realizando una operación de adición al valor de la estimación \hat{B} del valor inicial B₀, estimación modificada eventualmente por la precedente ley de adaptación, de un término aditivo delta resultante de un cálculo óptimo para respetar estrictamente las restricciones referidas.

25

Por ley de adaptación, se entiende la ecuación diferencial (1) que registra la estimación de las propiedades de los constituyentes. La nueva ley de adaptación según la invención consiste entonces en una nueva ecuación diferencial que reemplaza la ecuación diferencial (1), o en una modificación del segundo miembro de la ecuación diferencial (1).

- 30
- En una primera forma de realización, la modificación de la matriz \hat{B} que corresponde a la sustitución de la ecuación (1) por una ecuación que corresponde a una nueva ley de adaptación puede comprender la adición de una función complementaria a la ecuación (1) o su sustitución por otra ecuación independiente.

- 35
- Según una primera variante, la modificación de la matriz \hat{B} se obtiene reemplazando la ecuación (1) inicial por una ecuación que comprende la adición de la función suplementaria a la ecuación (1):

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu (y_j - y_j^{med}) + \lambda f(\hat{B}_j^t) \quad (1.1)$$

en la que

40

- f es una función no nula, elegida según un perfil que permite introducir al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad,
 - λ es un coeficiente de ponderación que permite ajustar la rapidez de retorno de las propiedades estimadas de los constituyentes en un dominio admisible definido por unas limitaciones, y
- 45
- H es diagonal con el fin de asegurar las propiedades de convergencia del procedimiento.

Son posibles diferentes elecciones de la matriz H, que seguirá siendo simétrica y definida positiva, para asegurar la convergencia de un sistema de ese tipo.

- 50
- Se puede, por ejemplo, utilizar la matriz H siguiente, que introduce un factor de normalización basado en la formulación inicial de referencia:

$$\frac{1}{\|u\|} \begin{pmatrix} \frac{1}{u_1} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{u_n} \end{pmatrix}$$

La normalización efectuada por la matriz H es particularmente importante para superar unos efectos de escalas físicas de una propiedad a otra, y las sensibilidades de variación diferentes, específicas para cada propiedad.

5 Esta normalización permite posteriormente modular mejor las desviaciones de predicción calculadas (después de ser superados estos efectos de escala), pudiendo hacerse esta modulación, por ejemplo, de manera proporcional a un término relacionado con la formulación actual, llevado a una formulación de referencia.

10 La constante β_j permite diferenciar la rapidez de convergencia de la estimación, propiedad a propiedad, y particularmente, permite poder tener en cuenta las especificidades de retardo de medición propias de cada propiedad.

A título de ejemplo de regulaciones de β_j , se podrán tomar valores iguales a dos a cuatro veces el retardo puro.

15 Por ejemplo, para una propiedad como el índice de octano, asociado a un retardo de medición de 10 minutos, β se ajustará a 20 minutos.

Para una propiedad como el porcentaje destilado a 70 °C, asociado a un retardo de medición de 40 minutos (cromatógrafo en línea), β se podrá regular a 80 minutos.

20 La función f se elegirá convenientemente para mantener inalteradas las propiedades de convergencia del procedimiento, mientras se introducen restricciones (de límites, de relación de orden y/o de desigualdades) a respetar sobre las estimaciones resultantes. De esta manera, se asegura una convergencia asintótica, garantizando el respeto de las restricciones al final de la convergencia.

25 La función f, no nula, se puede elegir según un perfil que permite orientar la convergencia de las propiedades estimadas de los constituyentes hacia un conjunto de valores que cumplen al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad.

30 Esta función f se puede elegir según un perfil de tipo lineal por fragmentos o logarítmico o incluso utilizando unos cálculos matriciales.

A título de ejemplo, se pueden aplicar las funciones siguientes.

35 Para las restricciones de límites, esta función f podrá tomar así la forma siguiente:

Sea un intervalo $[B_{\min}, B_{\max}]$ de interior no vacío que contiene $B(i), \forall i$,

$$f(y) = 0 \text{ si } y \in [B_{\min}, B_{\max}]$$

$$40 \quad f(y) \leq 0 \text{ si } y \geq B_{\max}$$

$$f(y) \geq 0 \text{ si } y \leq B_{\min}$$

45 Para las restricciones de relación de orden, esta función f podrá tomar así la siguiente forma:

Sea m el número de bases sometidas a la relación de orden: $B_j(1) \leq \dots \leq B_j(m)$.

La ley de adaptación podrá tomar la siguiente forma:

$$50 \quad \boxed{\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu(\hat{B}_j u - y_j^{med}) + \lambda H f(\hat{B}_j)} \quad (1.13)$$

En la que $\lambda \geq 0$.

Con:

$$55 \quad f(\hat{B}_j) = \begin{pmatrix} f_0(B_j^{\min} - \hat{B}_j(1)) \\ f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ \vdots \\ f_{m-2}(\hat{B}_j(m-2) - \hat{B}_j(m-1)) \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ (0) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ f_2(\hat{B}_j(2) - \hat{B}_j(3)) \\ \vdots \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ f_m(\hat{B}_j(m) - B_j^{\max}) \\ (0) \end{pmatrix}$$

Y

$$\forall i \in [1, m-1], f_i(y): \begin{cases} = 0 & \text{si } y \leq 0 \\ \geq 0 & \text{si } y \geq 0 \end{cases}$$

5 Para las restricciones de igualdad, esta función f podrá tomar así la forma siguiente como producto matricial de H (normalización), A (definida a continuación) y estimaciones B_j:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H u (\hat{B}_j u - y_j^{med}) + \lambda H A \hat{B}_j^t \quad (1.12)$$

10 Se indica por m el número de subconjuntos de constituyentes cuyas propiedades j son iguales. Un conjunto de ese tipo se denomina "juego de igualdades". Se introduce la matriz A siguiente, de tamaño n x n:

$$A = \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_m \\ (0) \end{pmatrix}$$

en la que:

15

$$R_i = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & (0) & \vdots \\ (0) & \vdots & (0) & \ddots & \ddots & 0 & (0) \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

20

Según una segunda variante, la modificación de la matriz \hat{B} se obtiene reemplazando a la ecuación (1) inicial por una ecuación correspondiente a la aplicación de una nueva ley de adaptación representada por la ecuación siguiente:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H \frac{1}{\delta t} \int_{t-\delta t}^t u (\hat{B}_j u - y_j^{med}) ds \quad (1.2)$$

en la que δt es la ventana de integración temporal (es decir la longitud del intervalo sobre el que se promedia) y s la variable temporal bajo la integral.

25

Preferentemente, δt es inferior a la frecuencia de actualización de las estimaciones.

30

La matriz corregida \hat{B} se determina así utilizando la ecuación (1.2), lo que permite aprovechar una media temporal (ventana deslizante temporal) que integra órdenes anteriores. Este dispositivo se utiliza preferentemente en el caso de mediciones esporádicas de las propiedades del producto resultante de la mezcla de los constituyentes, no renovadas en cada periodo de cálculo.

35

Según una tercera variante, la modificación de la matriz \hat{B} se obtiene reemplazando la ecuación (1) inicial por una ecuación correspondiente a la aplicación de una nueva ley de adaptación, representada por la ecuación siguiente:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} H \int_{t-\Delta-\frac{\delta t}{2}}^{t-\Delta+\frac{\delta t}{2}} u(s) (\hat{B}_j u(s) - y_j^{med}) ds \quad (1.3)$$

en la que δt es la ventana de integración temporal, Δ el retardo de medición y s la variable temporal bajo la integral.

40

La variable temporal s permite trabajar sobre una ventana deslizante temporal alrededor del retardo Δ , la ventana de amplitud δ .

En una segunda forma de realización de la invención, la modificación de la matriz \hat{B} se obtiene mediante la adición de un término complementario δ a al menos una de las ecuaciones (1), (1.1), (1.2) o (1.3) y que corresponde al cálculo siguiente:

$$\hat{B}_{completa_j} = (\hat{B}_j + \delta^t) \quad (1.4)$$

5 en la que el vector δ cumple la ecuación $\delta^t * u = 0$, con el fin de que las predicciones permanezcan inalteradas (predicción uniforme) en virtud de la ecuación:

$$y = \hat{B}_j * u = (\hat{B}_j + \delta^t) * u \quad (1.5)$$

10 $\hat{B}_{completa_j}$ reemplaza entonces la matriz corregida \hat{B} de la etapa (ii) de la invención.

El vector δ se determina de manera que se asegure un respeto de las restricciones sobre la mezcla de manera sistemática, en cada instante. Se define propiedad a propiedad para las estimaciones de cada constituyente. Este vector permite principalmente repartir la desviación constatada en la salida del dispositivo entre las medidas de laboratorio de las propiedades de los constituyentes y las propiedades estimadas de estos constituyentes, efectuándose este reparto sobre los constituyentes en la entrada y estando orientado de manera preferente hacia una dirección elegida, por ejemplo, en función de un nuevo análisis en el laboratorio, de la cubeta en vertido-descarga,..., sin alteración de las propiedades de convergencia del procedimiento.

20 El cálculo de δ puede ser el objeto de un cálculo algebraico directo o de una resolución mediante optimización bajo restricciones.

25 Siguiendo las elecciones que se han hecho para calcularlo, el vector δ permite orientar las propiedades estimadas hacia unas direcciones particulares, como por ejemplo el valor de un nuevo análisis de laboratorio del constituyente. Esta corrección δ puede utilizarse también para resaltar el confinamiento de ciertos constituyentes resultantes de cubetas aisladas, cuyas propiedades estimadas deben permanecer próximas a su análisis de laboratorio de referencia, con respecto a los resultados de las cubetas en vertido-descarga (cubeta del constituyente alimentada permanentemente), de propiedades variables en el tiempo, sujetas a perturbaciones y de las que se pretende liberar al dispositivo de estimación.

30 El cálculo de δ puede tener en cuenta, además de la restricción de predicción uniforme $\delta * u = 0$, otras restricciones consideradas sobre las propiedades estimadas de los constituyentes: igualdad de propiedades, límites sobre las propiedades, y relaciones de orden total o parcial. La ventaja de este dispositivo es el respeto en todo momento, y no solamente asintóticamente, de las diferentes restricciones.

35 El valor calculado de δ se añade a la matriz de las propiedades estimadas de los constituyentes siguiendo la ecuación (1.4), o bien de manera sistemática en cada iteración, o bien de manera condicional.

40 Para tener en cuenta la o las etapas de premezcla de constituyentes antes de la constitución de la mezcla, la formulación u determinada en el transcurso de la operación (3) de la etapa (ii) del procedimiento según la invención tiene en cuenta los retardos debidos a los volúmenes muertos presentes en la instalación en unas zonas de premezcla.

45 Esta sincronización permite mejorar la elaboración de la mezcla y respetar unas consignas de propiedades de la mezcla. Permite igualmente reducir los márgenes de fabricación y controlar de ese modo más precisamente los flujos de constituyentes y evitar la calidad excesiva. Finalmente, este control más preciso de los flujos de constituyentes limita los bombeos y, por esto mismo, una solicitud abusiva de los órganos de control de la instalación. Esta sincronización permite igualmente una mejor robustez durante las variaciones del caudal total de la mezcladora.

50 Ventajosamente, en el transcurso de la operación de corrección de la matriz \hat{B} , la variable u utilizada en una de las ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3) y (1.4) aplicada se sustituye por una variable U definida por el vector formulación $U(t)$ que tiene en cuenta los volúmenes muertos en el tiempo t de manera que

$$U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))^t$$

55 Más particularmente, en la primera variante de la primera forma de realización de las modificaciones de la matriz \hat{B} , ésta se determina utilizando la ecuación siguiente:

60

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H U(t) (y_j(t) - y_j^{med}(t)) + \lambda f(\hat{B}_j^t) \quad (2.1)$$

En la que f y λ son tal como se han definido con referencia a la ecuación (1.1), e $y(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t) b_i$, siendo b_i el vector de las propiedades del constituyente i .

5 En la segunda variante de la primera forma de realización de las modificaciones de la matriz \hat{B} , ésta se determina utilizando la ecuación siguiente:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H \frac{1}{\delta t} \int_{t-\delta t}^t U(\hat{B}_j U - y_j^{med}) ds \quad (2.2)$$

10 En la tercera variante de la primera forma de realización de las modificaciones de la matriz \hat{B} , ésta se determina utilizando la ecuación siguiente:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} H \int_{t-\frac{\Delta}{2}}^{t-\frac{\Delta}{2}+\frac{\delta t}{2}} U(s) (\hat{B}_j U(s) - y_j^{med}) ds \quad (2.3)$$

en la que δt es la ventana de integración temporal, Δ el retardo de medición y s la variable temporal bajo la integral.

15 En la segunda forma de realización de las modificaciones de la matriz \hat{B} , el vector δ cumple la ecuación $\delta * U = 0$, con el fin de que las predicciones permanezcan inalteradas (predicción uniforme) en virtud de la ecuación:

$$y = \hat{B}_j^t * U = (\hat{B}_j^t + \delta) * U \quad (2.5)$$

20 Ventajosamente, las magnitudes de control y de salida que entran en esta ecuación están sincronizadas para tener en cuenta el retardo de premezcla y el retardo de medición.

25 Las zonas de premezcla y los analizadores inducen en efecto unos retardos. Según la propiedad medida, los retardos de los analizadores se pueden considerar constantes o variables en función del valor medido. Con el fin de compensar estos retardos, el procedimiento según la invención utiliza un dispositivo de sincronización que predice los valores futuros de las propiedades (a partir de características de los constituyentes y de los últimos porcentajes calculados), sabiendo que la medida correspondiente que se suministrará por el analizador no estará aún disponible en ese momento a causa del retardo del análisis (que incluye el retardo del bucle de muestreo y el retardo del analizador).

30 Por ejemplo, en el caso de retardos de medición variables, se utiliza una tabla de correspondencia que permite asociar varios valores de retardos en unos intervalos de funcionamiento dados: se obtiene entonces un perfil de retardo constante por fragmento, variando el nivel de retardo automáticamente cuando se cambia la zona de funcionamiento. Este nivel de retardo induce a continuación una nueva sincronización de las predicciones con las medidas.

35 Ventajosamente, en el procedimiento de control según la invención, la formulación u determinada al final de la etapa (ii) se obtiene por medio de un procedimiento de optimización que comprende unas etapas secuenciales en el transcurso de las cuales se busca la solución de un problema de mínimos que respete un mínimo de restricciones prioritarias, si no es factible un problema completo que respete la totalidad de las restricciones, incrementándose el número de restricciones prioritarias a respetar en cada etapa hasta obtener una formulación u que respete el máximo de restricciones prioritarias.

45 Estas etapas son, por ejemplo, las siguientes:

(a) - determinar la solución de un problema de regulación completo P_0 , consistiendo esta solución en una formulación u optimizada que tiene en cuenta restricciones en las proporciones de los constituyentes y restricciones en las propiedades de la mezcla,

50 - si el problema de regulación completo P_0 es resoluble, se aplica la formulación u , solución de P_0 ,

- (b) - si el problema de regulación completo P0 no es resoluble, determinar una formulación u para la que se resuelve un problema de regulación de mínimos P1, que no tiene en cuenta más que las restricciones del problema P0 definidas como prioritarias, aplicando este problema P1 una sucesión de problemas de optimización, normalmente factibles, cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas restricciones prioritarias, con el fin de definir los nuevos valores alcanzables para estas restricciones prioritarias,
- (c) - si el problema de regulación de mínimos P1 es resoluble, determinar una formulación u para la que se resuelve un problema de regulación P2, que tiene en cuenta dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones prioritarias del problema P0 así como restricciones no prioritarias del problema P0, aplicando este problema P2 un problema de optimización cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas restricciones prioritarias, con el fin de definir nuevos valores alcanzables para unas restricciones no prioritarias,
- si el problema de regulación de mínimos P1 no es resoluble, se aplica la formulación u actual (es decir la formulación aplicada antes de la optimización de la etapa (ii)),
- (d) - si el problema de regulación P2 es resoluble, determinar una formulación u para la que se resuelve un problema de regulación P3, que tiene en cuenta dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones prioritarias del problema P0 obtenidas en la etapa (b), dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones no prioritarias obtenidas en la etapa (c), así como todas las otras restricciones no prioritarias del problema P0 y no tratadas por los problemas P1 y P2, aplicando este problema P3 una sucesión de problemas de optimización, normalmente factibles, cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas otras restricciones no prioritarias, con el fin de definir nuevos valores alcanzables para estas otras restricciones no prioritarias,
- si el problema de regulación P2 no es resoluble, se aplica la formulación obtenida por el problema P1,
- (e) si el problema de regulación P3 es resoluble, la formulación aplicada es la solución del problema P3, si no es así, la formulación es la solución del problema P2.

Las secuencias de optimización (a) y (e) aseguran una gestión óptima de las prioridades que permite tratar los problemas no factibles degradándolos hasta obtener un conjunto de restricciones factibles. Estas secuencias de optimización presentan la originalidad de buscar la solución de un problema de mínimos si el problema completo no es factible, incrementando posteriormente de forma progresiva el número de restricciones, en lugar de disminuir progresivamente el número de restricciones, como en las secuencias de optimización clásicas. De esta manera, es posible obtener una formulación u que respete siempre al máximo las restricciones definidas como prioritarias.

Ventajosamente, las restricciones no prioritarias tratadas por el problema P2 conciernen a las referencias, y se denominan "de regulación" correspondiendo a las ecuaciones de regulación de consigna fija.

Ventajosamente, las etapas (b) y (d) son por sí mismas secuencias de optimización que se pueden descomponer en etapas, tal como se describe en el presente documento a continuación.

La etapa (b) está constituida preferentemente por las etapas (b_i) donde se tratan sucesivamente las restricciones duras (prioritarias) de rango decreciente. En el transcurso de cada etapa (b_i), se puede encontrar una relajación óptima que proporciona el valor de todas las restricciones duras del mismo rango i , que se convierten en restricciones alcanzables, teniendo en cuenta las restricciones prioritarias sobre las proporciones de las bases y las restricciones alcanzables sobre las propiedades de la mezcla de rango $j > i$, eventualmente relajadas a las etapas b_j que preceden a la etapa actual b_i .

La etapa (d) está constituida preferentemente por las etapas (d_i) donde se tratan sucesivamente las restricciones suaves (no prioritarias) de rango decreciente. En el transcurso de cada etapa (d_i), se puede encontrar una relajación óptima que proporciona el valor de todas las restricciones suaves del mismo rango i , que se convierten en restricciones alcanzables, teniendo en cuenta las restricciones prioritarias sobre las proporciones de las bases, las restricciones alcanzables sobre las propiedades de la mezcla de rango duro eventualmente relajadas en las etapas (b_j), las restricciones alcanzables en términos de objetivos de regulación sobre las propiedades reguladas sobre el objetivo calculado en la etapa (c) y, finalmente, las restricciones suaves alcanzables sobre las propiedades de rango $j > i$, eventualmente relajadas en las etapas d_j que preceden a la etapa actual d_i .

Ventajosamente, la secuencia de optimización puede comprender una etapa complementaria en el transcurso de la que, si el problema de regulación precedente P3 es resoluble, se determina la formulación u para la que se resuelve el problema de regulación P0 teniendo en cuenta dichos nuevos valores alcanzables determinados durante las etapas (b), (c) y (d).

Es posible de ese modo asegurar una orientación optimizada de la formulación calculada, por ejemplo maximizando o minimizando ciertos constituyentes, de manera jerarquizada, o minimizando la desviación entre la formulación a calcular y la formulación inicial de referencia, cuando se dispone de suficientes grados de libertad.

Esta etapa suplementaria permite, en ciertos casos, obtener como mínimo una orientación óptima de la formulación sobre la totalidad de las restricciones iniciales parcialmente degradadas cuando el problema completo inicial no era factible.

- 5 Ventajosamente, las restricciones prioritarias tenidas en cuenta para la resolución del problema P1 son restricciones sobre las proporciones de los constituyentes y restricciones sobre las propiedades de la mezcla.

10 Las restricciones sobre las proporciones de los constituyentes incluyen particularmente unos límites simples sobre las proporciones de constituyentes y una restricción sobre la suma de las proporciones de los constituyentes. Las restricciones prioritarias sobre las propiedades de la mezcla se relajan eventualmente durante las iteraciones precedentes a P1. La solución buscada es una formulación u que permite tener en cuenta las restricciones prioritarias eventualmente relajadas sobre las propiedades de la mezcla.

15 En caso de que el procedimiento esté destinado a una instalación de preparación de una mezcla de n constituyentes y de aditivos, para una propiedad j de la mezcla sobre la que influye el aditivo, el modelo de control tiene en cuenta el efecto d de la adición del aditivo en el transcurso de las operaciones (2) y (3) de la etapa (ii) según: $y_j = \hat{B}_j u + d$.

20 La invención se refiere igualmente a un dispositivo de elaboración y de control de una mezcla de constituyentes, que comprende unas vías de transporte de los constituyentes a mezclar hacia una vía principal unida al emplazamiento de recepción de la mezcla, unos medios para controlar los caudales de los constituyentes sobre cada vía de transporte, unos medios de medición continua sobre la vía principal de los parámetros representativos de la mezcla en transcurso de elaboración y unos medios de cálculo de las proporciones de los diferentes constituyentes que entran en la mezcla, un estimador unido a los medios de cálculo, comprendiendo el estimador unos medios programados para producir una estimación de las propiedades de los constituyentes utilizando las mediciones de las propiedades de la mezcla medidas por los medios de medición, comprendiendo los medios de cálculo unos medios programados para calcular por medio de esta estimación de las proporciones de los diferentes constituyentes que entran en la mezcla con el fin de obtener una mezcla que comprenda unas propiedades predeterminadas, estando caracterizado este dispositivo por que el estimador comprende unos medios programados para introducir al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad, sobre al menos una de las propiedades para corregir la matriz \hat{B} de la etapa (ii) del procedimiento según la invención.

Por unos medios de medición continuos se entienden unos medios adecuados para implementar un proceso continuo de medición, tal como se ha definido más arriba.

35 Ventajosamente, el estimador comprende unos medios programados para implementar las etapas (i) y (ii) del procedimiento según la invención, que integran informaciones externas suplementarias tales como los últimos análisis de laboratorio de las cubetas de constituyentes, los indicadores de las cubetas en vertido-descarga, y los objetivos de utilización de las cubetas en términos de tendencia (maximizado/minimizado de la incorporación en la mezcla) en términos de prioridades relativas de aplicación de los objetivos de tendencias de incorporación deseados.

Ventajosamente, el estimador comprende unos medios de sincronización programados para tener en cuenta los retardos debidos a los volúmenes muertos en las zonas de premezcla de al menos dos constituyentes de la mezcla.

45 Como variante, el estimador comprende unos medios de sincronización programados para tener en cuenta los retardos debidos a los volúmenes muertos en varias etapas, estando constituida una etapa al menos por una o varias zonas de premezcla de al menos dos constituyentes de la mezcla.

50 Dicho de otra manera, se sitúa una etapa entre una llegada de constituyentes, mezclados o no, y una salida de constituyentes, mezclados y no mezclados, y comprende al menos una premezcla de al menos dos constituyentes (pudiendo ser cada uno de estos constituyentes en sí mismos una mezcla de constituyentes) que llegan suministrando una premezcla de estos constituyentes en la salida.

55 Preferentemente, estos medios de sincronización están programados para implementar la ecuación (2) de la operación (2) de la etapa (ii) del procedimiento según la invención para la elaboración de una mezcla de constituyentes, en la que al menos se realiza una premezcla de al menos dos de los constituyentes antes de la preparación de la mezcla.

60 Ventajosamente, el dispositivo comprende un optimizador unido a los medios de cálculo y a un medio de almacenamiento de objetivos de mezcla, comprendiendo el optimizador unos medios programados para optimizar la formulación u de las proporciones de los constituyentes determinada por los medios de cálculo en función de objetivos de mezcla almacenados en dicho medio de almacenamiento.

65 Preferentemente, el optimizador comprende entonces unos medios programados para implementar el procedimiento de optimización del procedimiento de elaboración descrito más arriba.

Ventajosamente, el dispositivo comprende al menos una cubeta de aditivo unida por una vía de transporte a la vía principal, aguas abajo de la zona de mezcla de los constituyentes, un medio de control del caudal de aditivo asociado a la cubeta previsto sobre la vía de transporte, y un controlador de inyección de aditivo unido a dicho medio de control, al optimizador y al medio de almacenamiento de objetivos de mezcla, siendo adecuado el controlador de inyección de aditivo, para una propiedad j de la mezcla sobre la que influye el aditivo, para optimizar la proporción del aditivo con el fin de regular dicha propiedad j correspondiente de la mezcla teniendo en cuenta un objetivo suministrado por el medio de almacenamiento de objetivos de mezcla.

La invención se describe ahora por medio de ejemplos y con referencia a los dibujos adjuntos, no limitativos, en los que:

- la figura 1 es una representación esquemática de un dispositivo de elaboración de una mezcla de productos de acuerdo con la invención;
- la figura 2 es un ejemplo de topografía de una mezcla de 6 bases que comprende tres premezclas;
- la figura 3 representa un ejemplo de secuenciación de los problemas de optimización;
- la figura 4 representa la evolución en función del tiempo del contenido de azufre de la mezcla del ejemplo 7;
- la figura 5 representa la evolución en función del tiempo de las proporciones de las bases de la mezcla del ejemplo 7;
- las figuras 6a-6e representan la evolución en función del tiempo de las proporciones de las bases (figura 6a), y de las cualidades de la mezcla de gasolina del ejemplo 8, a saber, regulaciones del RVP (figura 6b) y RON (figura 6c) y supervisión de la zona para el porcentaje de destilación (figura 6d) y para el contenido de benceno (figura 6e);
- las figuras 7a-7f representan la evolución en función del tiempo de los parámetros siguientes de la mezcla de gasóleo con regulación por inyección de aditivos del ejemplo 9:

figura 7a: perfil de inyección de dopado que influye sobre el índice de cetano
 figura 7b: perfil de inyección de dopado que influye sobre la filtrabilidad
 figura 7c: relación de las bases 1 y 3 utilizadas en la elaboración de la mezcla,
 figura 7d: índice de cetano de la mezcla,
 figura 7e: filtrabilidad de la mezcla,
 figura 7f: contenido de azufre de la mezcla

- la figura 8 representa el gráfico de la función f descrita en el ejemplo 1.3.A.
- la figura 9 representa la propiedad estimada del azufre que utiliza un estimador según la solicitud precedente del solicitante
- la figura 10 representa la propiedad estimada del azufre utilizando un estimador corregido según la presente invención por un vector δ .
- las figuras 11 y 12 representan ejemplos de topologías utilizadas en el ejemplo 2.1.

La invención se describe en el presente documento a continuación para unas instalaciones petrolíferas que permiten elaborar unas mezclas que contienen unas proporciones determinadas de varios constituyentes o bases disponibles, con el fin de que la combinación de las propiedades de estas bases confiera a la mezcla las propiedades deseables respetando unos extremos o un valor de consigna.

La figura 1 representa un esquema de un dispositivo de control de la elaboración de una mezcla de productos según la invención.

Los constituyentes o bases de la mezcla están contenidos en las cubetas 1, 2, 3, cuyo número se ha limitado a tres para facilitar la representación. Los constituyentes a mezclar recorren las vías de transporte 4, 5, 6 hacia una vía principal 7 provista de una mezcladora 8, conduciendo la vía principal la mezcla a una cubeta de destino 9. Unos medios designados por la referencia 10 en la figura 1 permiten controlar los caudales de las bases en cada vía de transporte. Se trata por ejemplo de reguladores de caudal que controlan una válvula.

Unos medios de análisis 11, o medios de medición en continua, permiten medir de manera repetitiva los parámetros representativos de la mezcla en el transcurso de su elaboración. Estos medios 11 están constituidos, por ejemplo, por unos analizadores en línea conectados a la mezcladora 8 situada en la vía principal 7.

En el caso de una mezcla de productos petrolíferos, estos analizadores miden, por ejemplo, el contenido de azufre de la mezcla (sulfurímetro), el índice de octano (motor octano), el índice de cetano (motor cetano)...

La instalación comprende igualmente unos medios de cálculo 12 de las proporciones (formulación u) de las bases que entran en la mezcla, un estimador 13 y un optimizador 14 que permiten determinar una formulación u de las proporciones de las bases que se transmitirá a los medios de control 10.

El papel del estimador 13 es estimar las propiedades de las bases a partir de los análisis de las propiedades de la mezcla efectuados por los medios análisis 11, comprendiendo los medios de cálculo 12 unos medios programados

para calcular, por medio de esta estimación y de valores de consigna de estas propiedades o de valores de restricciones asociadas a estas propiedades, las proporciones de las diferentes bases que entran en la mezcla con el fin de obtener una mezcla que comprenda unas propiedades predeterminadas. Las proporciones de las bases a aplicar se calculan de manera repetitiva, con unos intervalos de tiempo predeterminados, no forzosamente iguales (por ejemplo del orden de 5 minutos), permitiendo de este modo un control preciso de las propiedades de la mezcla.

El estimador 13 comprende unos medios programados para implementar las operaciones de determinación de las propiedades de los constituyentes, formando parte del procedimiento de elaboración de la mezcla según la invención descrito más arriba.

El papel del optimizador 14 es optimizar una formulación u de las proporciones de las bases a partir de las propiedades estimadas de las bases, de restricciones sobre la formulación u y de restricciones sobre las propiedades de la mezcla. La formulación u así optimizada sirve para controlar los medios de control 10.

El optimizador 14 comprende unos medios programados para implementar el procedimiento de optimización de la formulación calculada para la implementación mediante el estimador del procedimiento de control según la invención.

El dispositivo comprende además un medio de almacenamiento 15 de objetivos de mezcla. Este medio de almacenamiento de objetivos de mezcla contiene los diferentes objetivos fijados por el usuario para obtener la mezcla deseada. Esta unido al optimizador 14 con el fin de transmitir los objetivos deseados para cada mezcla.

En el ejemplo, se trata la formulación inicial de referencia, unos objetivos de tipo de consigna o de límites altos y bajos para los propiedades, unas restricciones mínimas/máximas sobre las proporciones de constituyentes, unas orientaciones deseadas mínimas/máximas sobre los constituyentes, el volumen a fabricar y el modo de regulación elegido (instantáneo, integrado, integrado sobre cubeta, tal como se definen más adelante).

El dispositivo según la invención puede comprender igualmente una cubeta 16 de aditivo unida por una vía de transporte 17 a la vía principal 7, aguas abajo de la mezcladora 8. Se prevé igualmente un medio de control 10 del caudal de aditivo sobre la vía de transporte 17. Este medio 10 está controlado por un controlador de inyección de aditivo 18, unido al optimizador 14 y al medio de almacenamiento 15 de objetivos de mezcla.

El papel del controlador de inyección de aditivo 18 es optimizar una formulación de inyección de dopado de la cubeta 16, con el fin de regular una propiedad dada, paralelamente a la optimización de la formulación de los constituyentes 1 a 3 accionada por el optimizador 14, sabiendo que en caso de saturación de la inyección de dopado (por ejemplo cuando se ha alcanzado un límite de consumo predefinido por los usuarios), se acciona una conmutación automática de la propiedad regulada por el dopado sobre la regulación multivariable mediante la acción sobre las proporciones de constituyentes, supervisada por el optimizador 14.

Por supuesto, se pueden concebir varias cubetas 16 de aditivo.

El dispositivo según la invención puede funcionar siguiendo dos modos:

- Control en análisis integrado (modo integrado).

Este control está bien adaptado al caso de que la mezcla se vierta en una cubeta de producto final (cubeta de destino) aislada. En este caso, es la calidad media integrada sobre el conjunto de la cubeta lo que se controla.

Las proporciones de las bases se controlan entonces de manera que se modifiquen las propiedades instantáneas de la mezcla con el fin de compensar las desviaciones de calidad constatadas en el paso de la mezcla, de manera que se lleven las propiedades del conjunto de la mezcla contenida en la cubeta de destino a los valores de consigna, o dentro de las restricciones.

Las acciones de control de las proporciones de las bases aumentan entonces al mismo tiempo que el volumen de la mezcla en la cubeta de destino.

Se distingue en este caso un modo "integrado de la mezcla" y un modo "integrado de la cubeta". Este último tiene en cuenta el volumen y la calidad del fondo de la cubeta inicial antes de la mezcla, mientras que el modo "integrado de la mezcla" funciona sobre el producto fabricado, que se vierte desde la mezcladora, estando integradas las cualidades de este producto de la mezcla a controlar, es decir acumuladas, promediadas después del comienzo de la mezcla.

- Control en análisis instantáneo (modo instantáneo)

Este control se adapta bien al caso de que la mezcla se vierta directamente en un oleoducto, un barco, un tren o un camión. Es entonces importante mantener permanentemente los valores instantáneos de los análisis próximos a las

consignas o dentro de las restricciones. En este caso, las acciones de control de las proporciones de las bases son independientes del volumen de mezcla vertida.

5 El funcionamiento del estimador 13 de propiedades es independiente del modo de regulación elegido, instantáneo o integrado. En los dos modos, asegura de manera instantánea y sincrónica el cálculo de una predicción de propiedades que puede ser utilizada a continuación por el optimizador 14. El procedimiento de optimización implementado por el optimizador utiliza unas ecuaciones de regulación, detalladas a continuación, que hacen intervenir o bien una consigna que corresponde directamente al objetivo buscado en el modo instantáneo, o bien a una referencia calculada sobre una trayectoria modulada por un horizonte regulable en modo integrado.

10 Los ejemplos 1.1 a 1.5, 2.1, 2.2 y 3 a 5 describen las fórmulas que se pueden utilizar para implementar la invención.

15 Estos ejemplos se refieren respectivamente: a una realimentación sin premezcla (ejemplos 1.1 a 1.5), una realimentación con premezcla (ejemplos 2.1 y 2.2), unas secuencias de optimización (ejemplo 3), una gestión en modo integrado (ejemplo 4) y una regulación mediante aditivos (ejemplo 5).

20 La realimentación descrita en el ejemplo 1.1 permite la toma en consideración de los analizadores en línea, que está en la base del principio de regulación. Permite particularmente una estimación en tiempo real de las propiedades de los constituyentes, según un mecanismo de corrección de las propiedades de los constituyentes siguiendo una orientación privilegiada (nuevo análisis de laboratorio de las propiedades de los constituyentes) o no.

25 Los ejemplos 1.1 a 1.5 permiten describir una familia de soluciones de representaciones particulares que introducen unas restricciones sobre las propiedades estimadas (ejemplos 1.2 a 1.5), siguiendo una orientación privilegiada sin alterar las propiedades de convergencia del conjunto del dispositivo.

30 Esta realimentación se completa en el ejemplo 2.1 de manera que permite la sincronización del control, en el caso de múltiples premezclas, en paralelo (en una misma etapa) o en serie (según varias etapas sucesivas de premezcla). Esto permite obtener un control más robusto en la práctica, porque está menos sujeto a las oscilaciones consecutivas y a eventuales defectos de sincronización entre medición y predicción, y ampliar la utilización para los casos de premezclas de constituyentes.

El ejemplo 2.2 es similar al ejemplo 2.1, pero corresponde a una solución particular de formalización y de implementación de una topología genérica con múltiples premezclas aguas arriba de la mezcladora.

35 Las realimentaciones presentadas en los ejemplos 1.1 a 1.5 o 2.1, 2.2 se utilizan para el cálculo de las previsiones de las propiedades de la mezcla. Estas predicciones se utilizan como ecuaciones de restricciones en unas secuencias de optimización, tales como las presentadas en el ejemplo 3, y que permiten el cálculo del control apropiado para alcanzar los objetivos fijados de mezcla.

40 Los ejemplos 1.1 a 1.5 o 2.1, 2.2 y 3 describen por tanto un ejemplo de cadena de tratamiento requerida en modo instantáneo.

45 El ejemplo 4 permite aportar un complemento específico del tratamiento en modo integrado, que utiliza el esquema de funcionamiento del modo instantáneo presentado con referencia a los ejemplos 1.1 a 1.5 o 2.1, 2.2 y 3, promediando las modificaciones sobre los umbrales (relajaciones de los valores de las restricciones instantáneas) y sobre las referencias (consignas modificadas por medio de trayectorias de referencia).

50 El ejemplo 5 describe una regulación mediante inyección de aditivo, que viene a añadirse a los mecanismos de los ejemplos 1.1 a 1.5 o 2.1, 2.2 y 3, y que puede utilizar unos mecanismos similares a los del modo de integración descrito en el ejemplo 4. Se ha mencionado un principio de conmutación de regulación hacia las bases, lo que corresponde a una pasarela del mecanismo descrito en el ejemplo 5 hacia el descrito en los ejemplos 1 a 3.

El ejemplo 6 describe por su parte diferentes opciones de optimización de la formulación.

55 En el caso de la mezcla de n bases (o constituyentes), se utilizan las notaciones siguientes:

- u, vector de dimensión n, es la formulación a calcular y \bar{u} es la formulación de referencia. La formulación representa las proporciones de las n bases diferentes que entran en la mezcla: $u \in [0,1]^n$ y $\sum_{i=1}^n u_i = 1$.

- y, vector de dimensión m, representa las m propiedades estimadas de la mezcla para la formulación u.

60 • y_j^{med} representa la medición de la propiedad j, con $y_j^{\text{med}} = B_j u$, suponiendo las leyes de mezcla lineales.

Se podrá observar aquí que la igualdad $y = Bu$ no se aplica más que en el caso sin premezcla (dinámico o fijo, es decir en régimen transitorio o en régimen estable) y en el caso estacionario si hay unas premezclas.

- B es la matriz m x n de las propiedades de los constituyentes de la mezcla,

- \hat{B} es la estimación de B utilizada en los cálculos, de tal manera que $y = Bu$.

Las propiedades actuales y de la mezcla a la salida de la mezcladora se denominan propiedades instantáneas. Se miden mediante los analizadores en línea.

5

Las propiedades actuales del producto vertido, indicadas por z , se denominan propiedades integradas.

Las propiedades actuales de una cubeta de destino de la mezcla, indicadas por z_{fb} , se denominan propiedades integradas de fondo de cubeta.

10

Ejemplo 1.1: Realimentación sin premezcla, control en modo instantáneo.

Este ejemplo viene a mostrar como la ecuación (1), utilizada para la implementación de la operación (2) de la etapa (ii) del procedimiento de elaboración y de control de la mezcla, permite calcular una matriz de estimación de las propiedades de las bases. Este ejemplo corresponde al caso en que las bases se mezclan directamente para elaborar la mezcla, sin premezcla.

15

Definiendo el sistema dinámico siguiente para la actualización de \hat{B}_j a partir de u y de la medición y_j^{med} :

20

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H u (y_j - y_j^{med}) \quad (1)$$

en la que

- la matriz H es una matriz simétrica definida positiva y vale en este ejemplo:

25

$$\frac{1}{\|u\|} \begin{pmatrix} \frac{1}{u_1} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{u_n} \end{pmatrix}$$

- B_j^t es la transpuesta de B_j ,
- β_j es un número real estrictamente positivo.

30

Es posible demostrar que la función $\Psi(\hat{B}_j) = \frac{1}{2} (\hat{B}_j - B_j) H^{-1} (\hat{B}_j - B_j)^t$ es una función de Lyapunov para el sistema dinámico (1). En efecto, es positiva y su derivada en función del tiempo es negativa:

35

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\beta_j (y_j - y_j^{med})^2$$

Por tanto \hat{B}_j^t tiende hacia la invariante mayor mediante el sistema dinámico (1), incluido en $\{\hat{B}_j^t \text{ tal que } d\Psi/dt = 0\}$. De ese modo, \hat{B}_j^t tiende hacia un valor tal que $y_j = y_j^{med}$, lo que equivale por definición a $\hat{B}_j^t u = B_j u$. Sin embargo, como los valores de u están ligados por la restricción $\sum_{i=1}^n u_i = 1$, no es posible concluir con la igualdad de \hat{B}_j^t y B_j .

40

En cualquier caso, cuando un problema de optimización comprende una restricción $\hat{B}_j^t u = y_j^{ref}$ y cuando existe una solución, entonces asintóticamente, $y_j^{med} = y_j^{ref}$. De manera análoga, las restricciones de desigualdades colocadas sobre la estimación y_i son respetadas por la medición y_i^{med} .

45

La utilización del sistema dinámico (1) para la actualización de las propiedades de la mezcla constituye así un sistema de realimentación que permite evitar, para las salidas, las desviaciones entre estimaciones y medidas.

Una variante en la utilización del sistema dinámico (1) sería utilizar un término de desviación e en la formulación inicial de referencia y no un término de formulación u en la ecuación diferencial de estimación.

Cuando la medición se retarda, y el retardo es conocido, es suficiente sincronizar las magnitudes y , y_j e y_j^{med} para que las propiedades de convergencia permanezcan válidas.

Además de los retardos de medida de los analizadores, la sincronización podrá tener en cuenta el o los retardos de las constituyentes aguas arriba de la mezcla.

Un retardo de este tipo se observa por ejemplo en caso de premezcla de constituyentes, tal como se describe en el presente documento a continuación.

10 Ejemplo 1.2: Realimentación con retorno de la estimación hacia el último análisis de laboratorio

A la estimación \hat{B}_j^t descrita en el ejemplo 1.1 se le pueden añadir unos términos correctores δ que no afectan al valor final de la propiedad prevista (predicción uniforme). Estas correcciones se introducen en este ejemplo para tener en cuenta unas nuevas mediciones del laboratorio.

Para cada propiedad, se llama \bar{B}_j a las nuevas mediciones de laboratorio de las bases. Para calcular el término corrector δ , se considera el problema de minimizado bajo las restricciones siguientes:

$$\begin{cases} \min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t + \hat{B}_j - \bar{B}_j\|^2 \\ \delta^t u = 0 \end{cases}$$

20 La restricción única garantiza la predicción uniforme: $\hat{y}_j = \hat{B}_j u = (\hat{B}_j + \delta^t)u$. Este problema de minimizado se puede resolver explícitamente con la ayuda de un Lagrangeano. La solución única del problema es:

$$\delta_{sol}^t = \bar{B}_j - \hat{B}_j - \frac{(\bar{B}_j - \hat{B}_j)u}{\|u\|^2} u^T$$

25 Es esta corrección de la matriz de las estimaciones de las propiedades de los constituyentes la que se aplica de manera sistemática a cada iteración o de vez en cuando según unos ensayos condicionales.

Ejemplo 1.3: Realimentación con toma en consideración de las restricciones sobre las estimaciones en la ley de adaptación

30 Subejemplo 1.3.A: gestión de límites

Se considera en este caso un conjunto de restricciones de desigualdades del tipo mínimo/máximo que se desea sean respetadas de manera asintótica por la matriz de estimaciones de las propiedades de los constituyentes. Para cada propiedad j , se da un intervalo admisible $[B_j^{min}, B_j^{max}]$, de interior no vacío, que se supone contiene el conjunto de los valores reales de las propiedades de los constituyentes: $\forall i \in \{\text{Espacio de bases}\}, B_j(i) \in [B_j^{min}, B_j^{max}]$, en la que $B_j(i)$ designa el i -ésimo componente del vector B_j . Se da también una función regular f_j que tiene un valor de entrada x real al que se hace corresponder un valor de salida $f_j(x)$ real que tiene las características siguientes:

$$f_j(x) = 0 \text{ si } x \in [B_j^{min}, B_j^{max}]$$

$$f_j(x) \leq 0 \text{ si } x \geq B_j^{max}$$

$$f_j(x) \geq 0 \text{ si } x \leq B_j^{min}$$

45 Se considera entonces la ecuación diferencial (1.11)

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu (\hat{B}_j u - y_j^{med}) + f(\hat{B}_j^t) \quad (1.11)$$

en la que f es el vector columna cuyas coordenadas (en este caso la i -ésima) se escriben $f(\hat{B}_j^t)(i) = f_j(\hat{B}_j^t(i))$.

50

Esta ecuación (1.11) corresponde a la ecuación (1.1) descrita más arriba en caso de que el factor de ponderación lambda sea igual a 1.

Entonces, para toda condición inicial, la solución de la ecuación diferencial (1.11) converge asintóticamente en el tiempo hacia el conjunto:

$$\{\hat{B}_j(i) \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}], \forall i \in \{\text{Espacio de bases}\}, \hat{B}_j u = B_j u\}$$

La convergencia se asegura mediante la función de Lyapunov siguiente:

$$\Psi(\hat{B}_j) = \frac{1}{2} (\hat{B}_j - B_j) H^1 (\hat{B}_j - B_j)^T$$

- $\Psi(B_j) = 0$

- $\Psi(\hat{B}_j) > 0$, para $\hat{B}_j \neq B_j$

- $\frac{d\Psi}{dt} = -\beta_j (\hat{y}_j - y_j)^2 + \lambda (\hat{B}_j - B_j) H^1 f(\hat{B}_j)^T \leq 0$

Por hipótesis, para todas las coordenadas i: $B_j(i) \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$ y:

$$(\hat{B}_j(i) - B_j(i)) f(\hat{B}_j(i)) = \begin{cases} 0 & \hat{B}_j(i) \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}] \\ \leq 0 & \hat{B}_j(i) < B_j^{\max} \\ \leq 0 & \hat{B}_j(i) < B_j^{\min} \end{cases}$$

Siendo H la matriz diagonal definida positiva, la solución de la ecuación diferencial converge en el conjunto siguiente:

$$\left\{ \hat{B}_j \mid \frac{d\Psi}{dt} = 0 \right\} = \{ \hat{B}_j \mid \hat{B}_j(i) \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}], \forall i \in \{\text{Espacio de bases}\}, \hat{B}_j u = B_j u \}$$

Subejemplo 1.3.B: gestión de las restricciones de igualdad

Se considera en este caso un conjunto de restricciones de igualdad que se desea ver respetadas de manera asintótica por la matriz de las estimaciones de las propiedades de los constituyentes.

Adición de un término complementario en la ecuación diferencial

La ecuación diferencial (1.11) en la que se habría elegido f idénticamente nulo no permite asegurar unas evoluciones idénticas para unas bases iguales.

Para cada propiedad, para el caso de dos bases inicialmente idénticas, la solución se basa en:

$$b_1 = b_2 \Leftrightarrow b_1 - b_2 = 0 \Leftrightarrow b_2 - b_1 \leq 0 \text{ y } b_1 - b_2 \leq 0$$

Entonces

$$b_1 = b_2 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -1 & 1 & (0) \\ 1 & -1 & (0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \leq 0$$

Con tres bases, se obtiene de la misma manera:

$$b_1 = b_2 = b_3 \Leftrightarrow \begin{cases} b_1 - b_2 = 0 \\ b_2 - b_3 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & (0) \\ 0 & -1 & 1 & (0) \\ 1 & 0 & -1 & (0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \end{pmatrix} = 0$$

De manera general, se denota por m el número de subconjuntos de constituyentes cuyas propiedades j son iguales. Un subconjunto de ese tipo se designa como un "juego de igualdades". Se denomina n_i al número de constituyentes asociados al juego de igualdades i y se denota por N_i calculado como sigue $N_i = \sum_{k=1}^{i-1} n_k$.

5 Se introduce la matriz A siguiente de tamaño $n \times n$: $A = \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_m \\ (0) \end{pmatrix}$ en la que:

$$R_i = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & (0) & \vdots \\ (0) & \vdots & (0) & \ddots & \ddots & 0 & (0) \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cada matriz R_i es de dimensión $n_i \times n$. A es una matriz diagonal por bloques.

10 Se considera la nueva ley de adaptación (1.12) particular:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu(\hat{B}_j u - y_j^{med}) + \lambda H A \hat{B}_j^t \quad (1.12)$$

en la que $\lambda \geq 0$.

15 Se considera un juego de igualdades con k bases iguales ($k > 1$). Aún cuando esto implica hacer permutaciones, se supone que estas son las k primeras bases. Se introduce la matriz cuadrada $n \times n$ A_k definida a partir de un bloque no nulo de dimensión $k \times k$ por:

20

$$A_k = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & (0) \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ 0 & (0) & & -1 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ & & & (0) & (0) \end{pmatrix}$$

Se tiene entonces la igualdad siguiente:

$$(\hat{B}_j - B_j) A_k \hat{B}_j^T = -\frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{k-1} (\hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i))^2 + (\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(k))^2 \right] \quad (33)$$

25 Se considera la función de Lyapunov

$$\Psi(\hat{B}_j) = \frac{1}{2} (\hat{B}_j - B_j) H^1 (\hat{B}_j - B_j)^T$$

30 • $\Psi(B_j) = 0$

• $\Psi(\hat{B}_j) > 0$, para $\hat{B}_j \neq B_j$

• $\frac{d\Psi}{dt} = -\beta_j (\hat{y}_j - y_j)^2 + \lambda (\hat{B}_j - B_j) A \hat{B}_j^T \leq 0$

35

Teniendo en cuenta (33), se tiene:

$$(\hat{B}_j - B_j) A_k \hat{B}_j^T = \sum_{i=1}^m (\hat{B}_j - B_j) R_i \hat{B}_j^T = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left[\left(\sum_{k=1}^{n_i-1} (\hat{B}_j(N_i+k+1) - \hat{B}_j(N_i+k))^2 \right) + (\hat{B}_j(N_i+1) - \hat{B}_j(N_i+n_i))^2 \right]$$

5 La solución de la ecuación diferencial converge por tanto en el conjunto siguiente:

$$\left\{ \hat{B}_j \left| \frac{d\Psi}{dt} = 0 \right. \right\} = \{ \hat{B}_j \mid \hat{y}_j = y_j \text{ y } \forall i \in \{1, \dots, m\}, \forall (k, 1) \in \{N_i+1, \dots, N_{i+1}\}^2, \hat{B}_j(k) = \hat{B}_j(l) \}$$

Subejemplo 1.3.C: gestión de las relaciones de orden

10 Se considera en este caso un conjunto de relaciones de orden que se desea ver respetadas de manera asintótica por la matriz de las estimaciones de las propiedades de los constituyentes.

15 Para cada propiedad j, se considera una relación de orden, llevada sin pérdida de generalidad (en una reordenación próxima) en las m primeras bases. Es parcial si $m < n$ y total si $m = n$, siendo n el número de bases. Esto quiere decir por tanto que: $B_j(1) \leq \dots \leq B_j(m)$.

Se dan m-1 funciones que tienen las características siguientes:

20 $\forall i \in \{1, \dots, m-1\}, f_i(x): \begin{cases} = 0 & \text{si } x \leq 0 \\ \geq 0 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$

Se denota por f la función vectorial de n componentes definida por:

$$f(\hat{B}_j) = \begin{pmatrix} 0 \\ f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ \vdots \\ f_{m-2}(\hat{B}_j(m-2) - \hat{B}_j(m-1)) \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ (0) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ f_2(\hat{B}_j(2) - \hat{B}_j(3)) \\ \vdots \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ 0 \\ (0) \end{pmatrix}$$

25 Se considera entonces la ecuación diferencial (1.13) particular

$$\boxed{\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H u (\hat{B}_j u - y_j^{med}) + \lambda H f(\hat{B}_j)} \quad (1.13)$$

30 en la que $\lambda \geq 0$.

Se pueden introducir fácilmente las restricciones de límites en el seno de la relación de orden añadiendo dos funciones positivas de valores reales positivos y si no nulos, dando esto entonces:

$$f(\hat{B}_j) = \begin{pmatrix} f_0(B_j^{\min} - \hat{B}_j(1)) \\ f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ \vdots \\ f_{m-2}(\hat{B}_j(m-2) - \hat{B}_j(m-1)) \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ (0) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_1(\hat{B}_j(1) - \hat{B}_j(2)) \\ f_2(\hat{B}_j(2) - \hat{B}_j(3)) \\ \vdots \\ f_{m-1}(\hat{B}_j(m-1) - \hat{B}_j(m)) \\ f_m(\hat{B}_j(m) - B_j^{\max}) \\ (0) \end{pmatrix}$$

35 Si no se considera más que la relación de orden, esto viene a decir que:

$$B_j^{\min} = -\infty \text{ y } B_j^{\max} = +\infty$$

40 La convergencia de este nuevo estimador se establece gracias a la función de Lyapunov siguiente:

- $$\Psi(\hat{B}_j) = \frac{1}{2} (\hat{B}_j - B_j) H^1 (\hat{B}_j - B_j)^T$$

- $$\Psi(B_j) = 0$$

5 •
$$\Psi(\hat{B}_j) > 0, \text{ para } \hat{B}_j \neq B_j$$

- $$\frac{d\Psi}{dt} = -\beta_j (\hat{y}_j - y_j)^2 + \lambda (\hat{B}_j - B_j) f(\hat{B}_j)^T \leq 0$$

Se expresa el segundo término de la derivada. Se convierte en

10

$$(\hat{B}_j - B_j) f(\hat{B}_j)^T = \sum_{i=1}^{m-1} ((\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1)) + (\hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i))) f_i(\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1))$$

$\forall i \in \{1, \dots, m-1\}$, los términos de la suma se escriben:

15

$$(\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1)) f_i(\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1)) + (\hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i)) f_i(\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1))$$

Por hipótesis, el primer término es siempre negativo porque $B_j(1) \leq \dots \leq B_j(m)$ y f_i es positivo. El segundo término de la suma es negativo o nulo:

20

$$(\hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i)) f_i(\hat{B}_j(i) - \hat{B}_j(i+1)) \rightarrow \begin{cases} = 0 & \text{si } \hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i) \geq 0 \\ \leq 0 & \text{si } \hat{B}_j(i+1) - \hat{B}_j(i) \leq 0 \end{cases}$$

La solución de la ecuación diferencial converge por tanto en un conjunto caracterizado por el principio de invarianza de Lasalle. Este conjunto es el siguiente:

25

$$\left\{ \hat{B}_j \mid \frac{d\Psi}{dt} = 0 \right\} = \{ \hat{B}_j \mid \hat{y}_j = y_j \text{ y } \hat{B}_j(1) \leq \dots \leq \hat{B}_j(m) \}$$

Observaciones a propósito de los subejemplos

30 La formulación que tiene en cuenta los límites da varios grados de libertad: los valores de los límites, la función f y el factor de ponderación λ . Un ejemplo de elección de función para los ejemplos 1.3.A viene dado por

$$f(\hat{B}_j) = \max(0, B_{\min} - \hat{B}_j) + \min(0, B_{\max} - \hat{B}_j)$$

El gráfico de esta función se reproduce en la figura 8 con $B_{\min} = 200$ y $B_{\max} = 400$.

35 El factor de ponderación λ se puede elegir en la lista siguiente, según la forma mantenida para la función f :

- Función lineal de la forma $f(\hat{B}_j) = \max(0, B_{\min} - \hat{B}_j) + \min(0, B_{\max} - \hat{B}_j)$ tal como se ha representado en la figura 8.

40

- $1/dt$
- $\beta_j \frac{H}{\max(H)} \frac{1}{dt}$
- $\frac{H}{\max(H)} \frac{1}{dt}$

45 - Función logarítmica de la forma $f(\hat{B}_j) = \ln \left(\frac{1 + \max(0, B_{\min} - \hat{B}_j)}{1 + \max(0, \hat{B}_j - B_{\max})} \right)$

- Función logarítmica de la forma

- $1/dt$
- $2/dt$
- 5 • $\beta_j \frac{H}{\max(H)} \frac{1}{dt}$
- $2\beta_j \frac{H}{\max(H)} \frac{1}{dt}$

Aplicación en refinería

10 La figura 9 representa la cantidad de azufre estimado (en ppm) en función del tiempo discretizado, correspondiente al número de iteraciones de corrección de la formulación desde el comienzo de la mezcla, obtenida por la implementación de la ecuación (1).

15 Se trata de una fabricación de fueloil, con una mezcla de tres constituyentes para regular dos cualidades y, como particularidad, el hecho de que uno de los constituyentes está asociado a un valor de cualidad inicial erróneo.

En esta figura:

- 20 - La curva C1 representa la estimación del azufre del constituyente 1 de la mezcla (valor inicial erróneo).
- La curva C2 representa la estimación del azufre del constituyente 2 de la mezcla.
- La curva C3 representa la estimación del azufre del constituyente 3 de la mezcla.

25 Se constata en este caso que el estimador de la ecuación (1) llega a detectar el valor erróneo (sobre-estimación) que se corrige a la baja, pero esta corrección es insuficiente y un reparto de la desviación residual sobre las otras cualidades estimadas conduce a tener unas estimaciones negativas de contenido de azufre (que por definición debe permanecer positivo o nulo).

30 La figura 10 representa la cantidad de azufre estimado (en ppm) en función del tiempo discretizado, que corresponde al número de iteraciones de corrección de la formulación desde el comienzo de la mezcla, utilizando la ley de adaptación implementada por la ecuación (1.1) corregida por el δ tal como se define por la ecuación (1.4), definido más arriba, y más precisamente descrito en el párrafo 1.4 C del ejemplo 1.4 que se proporciona a continuación.

35 Se constata en este caso que el estimador modificado llega a corregir el valor erróneo (sobre-estimación), mientras mantiene las otras cualidades estimadas positivas.

Se constata en definitiva que la adición del término δ asegura la convergencia de las curvas C1 a C3.

40 **Ejemplo 1.4: Realimentación con restricciones de reparto sobre las propiedades estimadas mediante delta correctivo.**

45 Este ejemplo se relaciona con el cálculo, en predicción uniforme, de un vector δ , para conferir a las estimaciones de las propiedades ciertas características. Este vector se añade a la matriz de las propiedades estimadas de los constituyentes, o bien de manera sistemática en cada iteración, o bien de manera condicional.

Subejemplo 1.4.A: Gestión de restricciones de igualdad

50 Para una propiedad considerada, que tiene el mismo valor para dos bases ($b_1 = b_2$), la solución se basa en

$$b_1 = b_2 \Leftrightarrow b_1 - b_2 = 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & (0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \leq 0$$

Con tres bases, se obtiene de la misma manera:

55
$$b_1 = b_2 = b_3 \Leftrightarrow \begin{cases} b_1 - b_2 = 0 \\ b_2 - b_3 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & (0) \\ 0 & 1 & -1 & (0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \end{pmatrix} = 0$$

Se integra una matriz A_j formada por 0, 1 y -1 a las restricciones. El índice j hace referencia a la propiedad j . No hay bucles en la secuencia de igualdades, para evitar las redundancias que son fuente de inestabilidades numéricas y de pérdida de intervalo en la matriz de las restricciones. Esto quiere decir, por ejemplo, que no hay una restricción suplementaria del tipo $b_3 - b_1 = 0$ para el caso precedente de tres bases.

Hay además $n-1$ líneas, siendo n el número de bases. La nueva restricción se escribe por tanto de la manera siguiente:

$$A_j(\hat{B}_j^T + \delta) = 0$$

En efecto, siendo diferentes las estimaciones después de la ecuación diferencial (1.1), las correcciones aportadas por δ permiten la conservación de las igualdades en el transcurso del tiempo. El problema modificado se enuncia entonces:

$$\min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2$$

$$\delta^t u = 0, A_j(\hat{B}_j^T + \delta) = 0$$

En ausencia de nuevos análisis de laboratorio \bar{B}_j , Δ es nulo. Si no, vale $(\bar{B}_j - \hat{B}_j)^t$. Se puede añadir eventualmente una matriz diagonal de ponderación W al criterio.

La matriz global de las restricciones $\begin{pmatrix} u^T \\ A_j \end{pmatrix}$ es de rango completo porque la primera línea está constituida por términos todos ellos positivos mientras que las otras contienen únicamente un par de 1 y -1. La aplicación lineal asociada a esta matriz es por tanto sobreyectiva, lo que garantiza la existencia de al menos un punto factible. Además, al formar las restricciones un conjunto convexo y al ser el criterio una función convexa, hay unicidad y existencia de la solución.

Esta solución se puede escribir de manera explícita introduciendo el Lagrangeano y poniendo las condiciones de optimización. El Lagrangeano se escribe

$$L(\delta, \lambda, \mu) = \frac{1}{2} \|(\delta - \Delta)W\|^2 + \lambda \delta^t u + \mu^T A_j(\delta + \hat{B}_j^T)$$

Sus derivadas se anulan por la solución y se obtiene la expresión explícita de δ :

$$\lambda = \frac{u^T \Delta^T - u^T W^{-1} A_j^T (A_j W^{-1} A_j^T)^{-1} A_j (B_j^T + \Delta^T)}{u^T W^{-1} u - u^T W^{-1} A_j^T (A_j W^{-1} A_j^T)^{-1} A_j u}$$

$$\mu = (A_j W^{-1} A_j^T) A_j [(B_j^T + \Delta^T) - \lambda W^{-1} u]$$

$$\delta = W^{-1} (W \Delta^T - \lambda u - A_j^T \mu)^T$$

Subejemplo 1.4.B: Gestión de la relación de orden total

Para una propiedad dada, consideremos por ejemplo una mezcla de cuatro bases ordenadas en este orden: $b_2 \leq b_3 \leq b_1 \leq b_4$. Se puede escribir:

$$b_2 \leq b_3 \leq b_1 \leq b_4 \Leftrightarrow \begin{cases} b_2 - b_3 \leq 0 \\ b_3 - b_1 \leq 0 \\ b_1 - b_4 \leq 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} \leq 0$$

El problema a resolver es entonces el siguiente:

$$\min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2$$

$$\delta^t u = 0, A_j(\hat{B}_j^t + \delta) \leq 0$$

A diferencia del caso de igualdad, la matriz A_j contiene siempre $n-1$ líneas y hace intervenir todos los pares de bases. La existencia de un punto factible proviene del resultado del caso de igualdad. En efecto, se sabe que existe δ tal que $\begin{pmatrix} u^T \\ A_j \end{pmatrix} \delta = \begin{pmatrix} 0 \\ -A_j \hat{B}_j^t \end{pmatrix}$. La convexidad da la unicidad de la solución. Este problema no tiene por el contrario solución explícita y necesita el recurso de una rutina de optimización numérica.

Subejemplo 1.4.C: Gestión de límites

Con el fin de conservar unas escalas físicas en las estimaciones de las propiedades de constituyentes calculadas en línea, se pueden utilizar nuevas restricciones. La adición de límites en las propiedades estimadas se realiza en el espacio de búsqueda de las δ admisibles. El problema es entonces:

$$\min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2$$

$$\delta^t u = 0, B_j^{\min} \leq \hat{B}_j + \delta \leq B_j^{\max}$$

Se recuerda el lema de Farkas, útil para la demostración de los resultados de la existencia de soluciones a los diferentes problemas propuestos.

Lema de Farkas:

Una y solamente una de las dos propiedades siguientes puede ser verdadera:

- existe un x que verifica $Ax \leq b$, o
- existe un $v \geq 0$ tal que $vA = 0$ y $vb < 0$.

Con la ayuda del lema de Farkas, se puede demostrar que el problema precedente tiene siempre una solución, con la condición de que $\hat{B}_j u \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$.

Subejemplo 1.4.D: Gestión de las restricciones de igualdad y de límites

El problema se plantea así:

$$\min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta^t u = 0 \\ \text{juego de igualdades} \\ \text{límites} \end{array} \right.$$

Con la ayuda del lema de Farkas, se puede demostrar que el problema precedente tiene siempre una solución, con la condición de que $\hat{B}_j u \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$.

Subejemplo 1.4.E: Gestión de límites y de relaciones de orden total

El problema se plantea de la manera siguiente:

$$\min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta^t u = 0 \\ A_j(\hat{B}_j^t + \delta) \leq 0 \\ B_j^{\min} \leq \hat{B}_j^t + \delta \leq B_j^{\max} \end{array} \right.$$

La matriz de las restricciones no es sobreyectiva. No se asegura por tanto la existencia de al menos un punto factible: el conjunto de las restricciones puede no ser factible.

- 5 Con la ayuda del lema de Farkas, se puede demostrar que el problema precedente tiene siempre una solución, con la condición de que $\hat{B}_j u \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$.

Subejemplo 1.4.F: Gestión de límites y de relaciones de orden parcial

- 10 Se consideran n bases en total. Se llama $m < n$ al número de bases sometidas a la relación de orden y se supone que son las m primeras y que están ordenadas en el orden creciente de los índices. Esto es siempre posible con la condición de realizar unas permutaciones. Esto nos da el problema siguiente:

$$\begin{array}{l} \min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2 \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \delta^t u = 0 \\ lb \leq \hat{b}_1 + \delta_1 \leq \dots \leq \hat{b}_m + \delta_m \leq ub \\ lb \leq \hat{b}_{m+1} + \delta_{m+1} \leq ub \\ \vdots \\ lb \leq \hat{b}_n + \delta_n \leq ub \end{array} \right. \end{array}$$

- 15 Con la ayuda del lema de Farkas, se puede demostrar que el problema precedente tiene siempre una solución, con la condición de que $\hat{B}_j u \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$.

Subejemplo 1.4.G: Restricciones de reparto

- 20 El problema general que permite introducir los diferentes tipos de restricciones de reparto (igualdad, límites, relaciones de orden entre las estimaciones de las propiedades de los constituyentes) se plantea de la manera siguiente:

$$\begin{array}{l} \min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2 \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \delta^t u = 0 \\ \text{juego de igualdades} \\ \text{relación de orden parcial} \\ \text{límites} \end{array} \right. \end{array}$$

- 25 Con la ayuda del lema de Farkas, se puede demostrar que el problema precedente tiene siempre una solución, con la condición de que $\hat{B}_j u \in [B_j^{\min}, B_j^{\max}]$.

Una ilustración práctica de este subejemplo se proporciona en este caso, para un espacio de diez bases. Se da la formulación y el valor inicial de la matriz \hat{B} siguientes, relacionados en la tabla 1.1:

30

Tabla 1.1

Base	1	2	3	4	5
U	0,0542	0,1124	0,0577	0,1385	0,1354
\hat{B}	3	-5	8	12	50
Base	6	7	8	9	10
U	0,0386	0,1203	0,1601	0,0835	0,0993
\hat{B}	40	45	16	10	100

Se desea respetar:

$$\begin{cases} lb \leq \hat{B}_1 \leq \hat{B}_3 = \hat{B}_4 \leq \hat{B}_8 \leq \hat{B}_9 \leq ub \\ lb \leq \hat{B}_5 = \hat{B}_6 = \hat{B}_7 \leq ub \\ lb \leq \hat{B}_2 \leq ub \\ lb \leq \hat{B}_{10} \leq ub \end{cases}$$

5 Los límites son los siguientes:

$$lb = 0 \text{ y } ub = 90$$

Se verifica que: $U^* \hat{B} = 28,7783$ está comprendido entre los dos límites.

10 La solución se calcula con una función de resolución mediante mínimos cuadrados. Los resultados se presentan en la tabla 1.2:

Tabla 1.2

Bases	Igual.	Desig.	Bmin	Bmax	\hat{B}	δ	$\hat{B} + \delta$
1	-	1	0	90	3	0,8771	3,8771
2	-	-	0	90	-5	5,0000	0
3	1	2	0	90	8	3,5876	11,5876
4	1	2	0	90	12	-0,4124	11,5876
5	2	-	0	90	50	-3,4124	46,5876
6	2	-	0	90	40	6,5876	46,5876
7	2	-	0	90	45	1,5876	46,5876
8	-	3	0	90	16	-1,0289	14,9711
9	-	4	0	90	10	4,9711	14,9711
10	-	-	0	90	100	-10,0000	90,0000

15 La estimación corregida ($\hat{B} + \delta$) respeta las restricciones planteadas.

Subejemplo 1.4.H: Gestión de cubetas en vertido-descarga

20 La corrección mediante un vector δ se utiliza en este caso para diferenciar las propiedades estimadas de las cubetas en vertido-descarga de las de las cubetas aisladas. Las propiedades de las cubetas aisladas no varían en el transcurso de la mezcla (salvo homogeneización adecuada), contrariamente a las de las cubetas alimentadas continuamente, susceptibles de evolución en el transcurso de la mezcla.

25 El problema se enuncia de la manera siguiente

$$\begin{aligned} \min_{\delta} \frac{1}{2} \|\delta^t - \Delta\|^2 \\ \delta^t u = 0 \end{aligned}$$

en la que

30
$$\Delta(i) = \bar{B}_j(i) - \hat{B}_j(i) = \begin{cases} 0 \\ B_0(i) - \hat{B}_j(i) \end{cases}$$

Se dejan las cubetas en vertido-descarga libres y se trata de restablecer las estimaciones de las propiedades de las otras cubetas a sus análisis de laboratorio.

35 **Subejemplo 1.4.I: Caso particular de unos constituyentes con objetivos de incorporación (minimizado/maximizado)**

Se podrá aplicar ventajosamente el respeto de una relación de orden parcial en las propiedades de los constituyentes, asociados por otra parte a un objetivo de tendencia al minimizado o al maximizado. El orden parcial de las estimaciones referidas se puede respetar según el orden definido al comienzo por los valores iniciales de calidad de constituyentes (generalmente proporcionados mediante análisis de laboratorio).

Subejemplo 1.4.J: Caso particular de estimaciones en saturación alta o baja

Los límites mínimos y máximos utilizados en la ley de adaptación y eventualmente en el cálculo del vector de corrección δ , son inciertos. Para una propiedad dada, cuando todas las estimaciones se encuentran saturadas en el límite mínimo o máximo, se puede sospechar razonablemente un valor de límite erróneo. Es por lo tanto útil una fase de detección de dichas situaciones, para a continuación relajar los valores de los límites incriminados.

Detección

10 Para un límite máximo, por ejemplo:

$$\begin{aligned} \forall i, \text{ base activa, } \hat{B}_j(i) &= B_j^{\max} \\ \Downarrow \\ \sum_{\text{baseactiva}} \hat{B}_j(i) u_i &= B_j^{\max} \quad \sum_{\text{baseactiva}} u_i = B_j^{\max} \end{aligned}$$

15 Se puede suponer en este caso que el valor real de la propiedad es superior a B_j^{\max} . Se puede detectar también esta situación constatando que $B_j^{\max} \leq y_j^{\text{med}}$. De manera similar, se detecta un mal límite mínimo mediante $B_j^{\min} \geq y_j^{\text{med}}$.

20 **Relajación**

En caso de saturación detectada sobre las estimaciones, conviene relajar los límites. Se define el nuevo límite de una de dos maneras siguientes:

25 Tabla 1.3

límite mínimo	límite máximo
$B_j^{\min} = \min_{i \text{ baseactiva}} (\hat{B}_j(i)) - tol$	$B_j^{\max} = \max_{i \text{ baseactiva}} (\hat{B}_j(i)) + tol$
$B_j^{\min} = y_j^{\text{med}} - tol$	$B_j^{\max} = y_j^{\text{med}} + tol$

Ejemplo 1.5: Realimentación con valores medios de control sobre medidas esporádicas

30 La matriz corregida \hat{B} se puede determinar utilizando la ecuación siguiente, que permite aprovechar una media histórica que integra unos controles pasados, en el caso de medición esporádica no renovada en cada periodo de cálculo:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H \frac{1}{\delta t} \int_{t-\delta t}^t u(\hat{B}_j u - y_j^{\text{med}}) ds \quad (1.2)$$

La solución de esta ecuación converge y verifica $\lim_{t \rightarrow +\infty} (\hat{B}_j u - y_j) = 0$.

35 Se introduce la función siguiente:

$$\Psi(\hat{B}_j) = \frac{1}{2} (\hat{B}_j - B_j) H^1 (\hat{B}_j - B_j)^T$$

40 Verifica las propiedades siguientes:

- $\Psi(B_j) = 0$
- $\Psi(\hat{B}_j) > 0$, para $\hat{B}_j \neq B_j$

45 Su derivada vale:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} (\hat{B}_j - B_j) \int_{t-\delta t}^t u(\hat{B}_j u - y_j^{\text{med}}) dt$$

Dada la elección de la longitud del intervalo, no hay nuevas estimaciones calculadas en el intervalo de tiempo $[t-\delta t, t]$. Se puede escribir entonces:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} \int_{t-\delta t}^t u(\hat{B}_j u - y_j^{med})^2 dt$$

5 La derivada temporal de la función Ψ es negativa. La función introducida es por lo tanto una función de Lyapunov para el sistema. La solución converge por tanto hacia el conjunto de Lasalle, lo que demuestra el resultado enunciado.

10 En el caso de mediciones esporádicas, se puede ventajosamente no calcular una nueva estimación más que cuando está disponible una nueva medición, y no sistemáticamente en cada iteración. Se puede por otro lado promediar el control alrededor del momento en el que se extrae y se mide la muestra. El cálculo de la media permite limitar los efectos de eventuales imprecisiones sobre el retardo de la medición. Se propone la implementación siguiente:

$$\frac{d\hat{B}_j}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} H \int_{t-\frac{\Delta+\delta t}{2}}^{t-\frac{\Delta-\delta t}{2}} u(s)(\hat{B}_j u(s) - y_j^{med}) ds \quad (1.3)$$

15 en la que Δ es el retardo de la medición asociada a la propiedad j .

Parametrizado e implementación

20 Es necesario elegir la amplitud de la ventana deslizante. Esto debe depender del retardo. Para la base de errores de datación del orden del 20%, se propone el siguiente parametrizado:

$$\delta t = \frac{\Delta}{5}$$

25 Ejemplo 2.1: Realimentación con premezcla, control en modo instantáneo.

Este ejemplo es similar al ejemplo 1.1, pero corresponde al caso en el que ciertas bases están premezcladas antes de su mezcla con otras bases para formar la mezcla deseada.

30 La figura 2 representa un ejemplo de topografía con una mezcla de 6 bases.

Consideremos una instalación que comprende p premezclas numeradas de 1 a p . Tengamos en cuenta que:

- $Q_i(t)$ el caudal volumétrico de la base i en el tiempo t , con $i \in \{1, \dots, n\}$;
- 35 - $Q_{n+i}(t)$ del caudal volumétrico total que atraviesa el volumen muerto asociado a la premezcla i en el tiempo t , con $i \in \{1, \dots, p\}$ (el caudal entrante es siempre igual al caudal saliente);
- $Q(t)$ el caudal volumétrico total de la mezcladora en el tiempo t , $Q(t) = \sum_{i=1}^n Q_i(t)$,
- V_i , el volumen muerto asociado a la premezcla i ,
- b_i , el vector de las propiedades de la base i , $b_i^E(t)$ (respectivamente $b_i^S(t)$) el vector de las propiedades a la entrada (respectivamente a la salida) de la premezcla j en el momento t . Por convención, para una base b_i : $b_i^E(t) = b_i^S(t)$.

A cualquier base i , asociamos un camino Π_i , definido a continuación por p_i volúmenes muertos atravesados a partir de esta base para alcanzar la mezcladora. Este camino es un conjunto de p_i enteros diferentes que se relacionan con los índices de numeración de las premezclas, $\Pi_i = \{ \pi_i^1, \pi_i^2, \dots, \pi_i^{p_i} \}$, con $\pi_i^j \in \{1, \dots, p\}$ para todo $j \in \{1, \dots, p_i\}$. $\Pi_i = \emptyset$, $p_i = 0$, significa que la base i se inyecta directamente en la mezcladora.

En el caso de la figura 2, tenemos:

50 $\Pi_1 = \{3\}, p_1 = 1$

$\Pi_2 = \{2,3\}, p_2 = 2$

55 $\Pi_3 = \{2;3\}, p_3 = 2$

$$\Pi_4 = \emptyset, \rho_4 = 0$$

$$\Pi_5 = \{1\}, \rho_5 = 1$$

5 $\Pi_6 = \{1\}, \rho_6 = 1$

Para toda premezcla i , definamos el conjunto Γ_i de sus q_i caudales entrantes. Este es un conjunto de q_i enteros diferentes que se relacionan con los índices de numeración de los caudales volumétricos, $\Gamma_i = \{\gamma_i^1, \gamma_i^2, \dots, \gamma_i^{q_i}\}$, con $\gamma_i^j, \in \{1, \dots, n + p\}$ para todo $j \in \{1, \dots, q_i\}$.

10 En el caso de la figura 2, tenemos:

$$\Gamma_1 = \{5,6\}, q_1 = 2$$

15 $\Gamma_2 = \{2,3\}, q_2 = 2$

$$\Gamma_3 = \{1,6 + 3\} = \{1,9\}, q_3 = 2.$$

20 Para $\Pi_i = \emptyset$, las propiedades b_i intervienen en la forma ponderada $Q_i(t) / Q(t)b_i$ en la expresión de las propiedades de la mezcla en la forma de combinación lineal de las propiedades de las bases.

Consideremos ahora el caso $\Pi_i \neq \emptyset$.

Para la premezcla π_i^j , el caudal total es $Q_{\pi_i^j}(t) = \sum_{k \in \Gamma_{\pi_i^j}} Q_k(t)$. La propiedad en la entrada $b_{\pi_i^j}^E(t)$ se escribe:

25
$$b_{\pi_i^j}^E(t) = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{\pi_i^j}} b_j^E Q_j(t)}{\sum_{j \in \Gamma_{\pi_i^j}} Q_j(t)}$$

En esta entrada, el término b_i interviene en la forma:

30
$$\frac{Q_i(t)}{\sum_{j \in \Gamma_{\pi_i^j}} Q_j(t)} b_i = \frac{Q_i(t)}{Q_{\pi_i^j}(t)} b_i$$

En la salida, tenemos $b_{\pi_i^j}^S(t) = b_{\pi_i^j}^E(t - \delta_{\pi_i^j}(t))$, siendo definido el retardo puro $\delta_{\pi_i^j}(t)$ por:

35
$$V_{\pi_i^j} = \int_{t - \delta_{\pi_i^j}}^t Q_{\pi_i^j}(\tau) d\tau.$$

El término b_i interviene por lo tanto en $b_{\pi_i^j}^S(t)$ en la forma

40
$$\frac{Q_i(t - \delta_{\pi_i^j}(t))}{Q_{\pi_i^j}(t - \delta_{\pi_i^j}(t))} b_i.$$

De forma similar, tenemos para la premezcla π_i^2 :

$$b_{\pi_i^2}^E(t) = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{\pi_i^2}} b_j^E Q_j(t)}{\sum_{j \in \Gamma_{\pi_i^2}} Q_j(t)},$$

45 O sea, para el término b_i en $b_{\pi_i^2}^S(t)$

$$\frac{Q_{\pi_i}(t) Q_i(t - \delta_{\pi_i}(t))}{Q_{\pi_i^2}(t) Q_{\pi_i^1}(t - \delta_{\pi_i^1}(t))} b_i.$$

Para $b_{\pi_i^2}^S(t) = b_{\pi_i^2}^E(t - \delta_{\pi_i^2}(t))$ el término b_i interviene en la forma:

5
$$\frac{Q_{\pi_i^1}(t - \delta_{\pi_i^2}(t)) Q_i(t - \delta_{\pi_i^2}(t) - \delta_{\pi_i^1}(t - \delta_{\pi_i^2}(t)))}{Q_{\pi_i^2}(t - \delta_{\pi_i^2}(t)) Q_{\pi_i^1}(t - \delta_{\pi_i^2}(t) - \delta_{\pi_i^1}(t - \delta_{\pi_i^2}(t)))} b_i$$

Veremos surgir unas composiciones de retardos en los caminos Π_i . Definamos las funciones:

$\Delta_i^j(t) : t \mapsto t - \delta_{\pi_i^j}(t)$, para todo π_i^j en Π_i . La composición de estas funciones con j fijado se define por:

10
$$\Delta_i^{k,j}(t) \triangleq \Delta_i^k(\Delta_i^j(t)) : t \mapsto t - \delta_{\pi_i^k}(t) - \delta_{\pi_i^k}(t - \delta_{\pi_i^j}(t))$$

y

15
$$\Delta_i^{l,k,j}(t) \triangleq \Delta_i^l(\Delta_i^{k,j}(t))$$

Con estas definiciones, la fórmula para el término b_i en $b_{\pi_i^2}^S(t)$ se escribe

$$\frac{Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^2(t)) Q_i(\Delta_i^{1,2}(t))}{Q_{\pi_i^2}(\Delta_i^2(t)) Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^{1,2}(t))} b_i.$$

20

A la salida de la última premezcla $\pi_i^{p_i}$, tenemos para $b_{\pi_i^{p_i}}^S(t)$ en b_i

$$\frac{Q_{\pi_i^{p_i-1}}(\Delta_i^{p_i}(t)) Q_{\pi_i^{p_i-2}}(\Delta_i^{p_i-1,p_i}(t)) \dots Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^{2,\dots,p_i}(t)) Q_i(\Delta_i^{1,2,\dots,p_i}(t))}{Q_{\pi_i^{p_i}}(\Delta_i^{p_i}(t)) Q_{\pi_i^{p_i-1}}(\Delta_i^{p_i-1,p_i}(t)) \dots Q_{\pi_i^2}(\Delta_i^{2,\dots,p_i}(t)) Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^{1,2,\dots,p_i}(t))}$$

25 Y finalmente la mezcla, indicando $U_i(t)$ el término en el factor de b_i

$$U_i(t) = \frac{Q_{\pi_i^{p_i}}(t) Q_{\pi_i^{p_i-1}}(\Delta_i^{p_i}(t)) Q_{\pi_i^{p_i-2}}(\Delta_i^{p_i-1,p_i}(t)) \dots Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^{2,\dots,p_i}(t)) Q_i(\Delta_i^{1,2,\dots,p_i}(t))}{Q(t) Q_{\pi_i^{p_i}}(\Delta_i^{p_i}(t)) Q_{\pi_i^{p_i-1}}(\Delta_i^{p_i-1,p_i}(t)) \dots Q_{\pi_i^2}(\Delta_i^{2,\dots,p_i}(t)) Q_{\pi_i^1}(\Delta_i^{1,2,\dots,p_i}(t))} \quad (4)$$

Entonces $U_i(t) = u_i(t) = Q_i(t) / Q(t)$ para $\Pi_i \neq \emptyset$, en la salida se escribe:

30

$$y(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t) b_i \quad (5)$$

De ese modo, para los casos de premezcla, la ecuación (1) del sistema dinámico se convierte en:

35
$$\frac{d\hat{B}_i^t}{dt} = -\beta_j H U(t) (y_j - y_j^{med}(t)), \quad (2)$$

En la que $U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))t$, estando definidas las $U_i(t)$ por la ecuación (4) e $y(t) = (y_1(t), \dots, y_m(t))t$ por la ecuación (5).

40 La función utilizada del caso sin premezcla continúa siendo una función de Lyapunov para esta nueva dinámica y permite demostrar la convergencia de $\hat{B}U$ hacia BU .

Ejemplo 2. 2: Realimentación con premezclas, ejemplo de formalización y de implementación

45 Este ejemplo es similar al ejemplo 2.1, pero corresponde a una solución genérica particular de formalización y de implementación de la topología con múltiples premezclas aguas arriba de la mezcladora.

Se tomará la notación dV para un retardo de premezcla asociado a un volumen V de premezcla.

A Matriz de topología de múltiples premezclas

5 Una matriz de descripción de topología genérica permite en este caso definir los volúmenes muertos asociados a un vector de n bases máximo para una serie de k etapas de premezclas máximas posibles en serie, sabiendo que para una etapa dada, se pueden definir varias premezclas en paralelo.

10 Las dimensiones máximas de la matriz de topología (n bases y k etapas) son unos parámetros modificables por configuración.

Cada línea de la matriz corresponde a una base de constituyente dado.

15 Cada columna de esta matriz comprende la descripción de una etapa de premezcla, con los volúmenes muertos asociados a las bases de constituyentes que participan en la premezcla considerada, o a las reagrupaciones de bases premezcladas, resultantes de las premezclas de etapas precedentes.

Un ejemplo de topología real comprende en este caso 3 etapas de premezcla descritas de la manera siguiente:

20

Tabla 1.4: Matriz de topología de premezcla múltiple

Bases	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Cubetas
1	V1	V1'	V1''	B1
2	V1	V1'	V1''	B2
3	0	0		
4	0	0	V2''	B4
5	0	0	V2''	B5
6	V2	V1'	V1''	B6
7	V2	V1'	V1''	B7
8	0	0	0	
9	0	0	0	
10	0	0	V1''	B10
11	0	0	0	

Esta matriz descriptiva de la topología de múltiples premezclas permite identificar las premezclas en serie (en varias etapas diferentes) y en paralelo (en una misma etapa de premezcla), las bases referidas y los volúmenes muertos asociados.

25

Esta formulación tiene la ventaja de ser compacta, completa, clara y genérica.

30 En función de la formulación actual (con tal o cual cubeta, para los casos donde se cambia a la cubeta de socorro...), la topología de premezcla tenida en cuenta sabrá adaptarse automáticamente teniendo en cuenta la formulación.

El ejemplo de matriz proporcionado más arriba es una ilustración de la topología representada en la figura 11.

35 La primera etapa comprende dos premezclas en paralelo de volumen muerto $V1$ y $V2$.

La segunda etapa comprende una única premezcla de volumen muerto V' .

La tercera etapa comprende dos premezclas en paralelo de volúmenes muertos respectivos $V1''$ y $V2''$.

40 La lectura de esta matriz de topología se realiza por tanto de izquierda a derecha.

Para una línea dada (un constituyente dado i), y para una etapa dada (columna k).

45 Si todos los elementos de la línea i de índice $<k$ (parte izquierda de la línea) son nulos, entonces la base considerada no participa en ninguna premezcla en las etapas precedentes.

Si uno de los elementos de la línea i de índice $<k$ (parte izquierda de la línea) es no nulo, entonces la base considerada participa en una premezcla en las etapas precedentes, por lo que se asocia a un retardo de premezcla asociado a un volumen muerto correspondiente al valor no nulo del elemento considerado.

50

En este caso, es necesario volver a subir al conjunto de las bases de constituyentes asociados al mismo volumen muerto, para la etapa considerada (sobre la columna considerada de la matriz): este subconjunto de constituyentes que pertenece a la misma premezcla es un reagrupamiento de bases premezcladas a la entrada de la etapa

considerada.

La única restricción de esta descripción matricial es la siguiente: para esta descripción, no se pueden tener 2 premezclas diferentes, en paralelo (en la misma etapa), asociadas a un valor de volumen muerto idéntico. En ese caso, no hay ningún medio de diferenciar las bases que participan en cada una de las dos premezclas: se reagrupan en una misma premezcla.

B Premezcla única

1/ Sin premezcla, el modelo lineal en volumen utilizado después de la transformación en índice de las propiedades de constituyentes proporciona el valor de la propiedad j de la mezcla:

$$y_j(t) = \sum_i b_i * u_i(t)$$

Esta ecuación permite el cálculo de una predicción de calidad de la mezcla y_j a partir de una matriz de las calidades de los constituyentes B (de componente vector en línea b_i para una propiedad j) y de un vector de control U (componente u_i, dependiente del tiempo t).

2/ Para una única premezcla, esta ecuación se convierte para dV, retardo de premezcla, en la fórmula general siguiente denotada por [2.2B2]

$$y(t) = \sum_{i \in PM} b_i * u_i(t - dV) * \left(\frac{\sum_{i \in PM} u_j(t)}{\sum_{i \in PM} u_j(t - dV)} \right) + \sum_{i \notin PM} b_i u_i(t)$$

PM es el subconjunto de los índices de los constituyentes que pertenecen a la premezcla.

Los constituyentes que no pertenecen a la premezcla se incorporan directamente a la mezcladora.

Consideremos el ejemplo siguiente, con las bases 1 y 2 premezcladas y las bases 3 y 4 no premezcladas, cuya topología se representa en la figura 12.

El caudal total F(t) en la salida de la mezcladora es la suma de los caudales parciales de las vías aguas arriba F_i(t) correspondientes a las relaciones u_i(t).

Los constituyentes i de la premezcla están asociados a las relaciones u_i, que corresponden a los caudales parciales de las vías premezcladas incorporadas al caudal total de las vías premezcladas, en este caso F₁(t).

Este caudal total de las vías premezcladas es relativo a un producto de premezcla caracterizado por un valor de propiedad y₁(t).

El producto a la salida de la mezcladora se caracteriza por el valor de la propiedad y.

Los constituyentes i en la entrada tienen un valor de propiedad q_i.

dV es el retardo de la premezcla.

La cualidad y(t) del producto vale en el tiempo t:

$$y(t) = (F_1(t)/F(t)) y_1(t) + q_3 * u_3 + q_4 * u_4$$

Se tiene también y₁(t) = u₁'(t-d) q₁ + u₂'(t-dV) q₂.

Por otro lado,

$$F_1(t) = (u_1(t) + u_2(t)) F(t)$$

y

$$u_i'(t) F_1(t) = u_i(t) F(t), i = 1 \text{ o } 2.$$

Por tanto

$$u_i'(t-dV) = u_i(t-dV) / (u_1(t-dV) + u_2(t-dV)).$$

Finalmente,

$$y(t) = q_1 * u_1(t-dV) (u_1(t) + u_2(t)) / (u_1(t-dV) + u_2(t-dV))$$

$$+ q_2 * u_2(t-dV) (u_1(t) + u_2(t)) / (u_1(t-dV) + u_2(t-dV))$$

$$+ q_3 * u_3 + q_4 * u_4$$

Se encuentra una expresión que corresponde a la fórmula general [2.2B2] para una única premezcla.

C Premezclas múltiples en paralelo

Para varias premezclas en paralelo en una única etapa, la ecuación precedente se convierte en:

$$y(t) = \sum_{k \in PM(e)} \left(\sum_{i \in PM(e,k)} b_i * u_i(t - dV(k,e)) * \left(\sum_{j \in PM(e,k)} u_j(t) \right) / \left(\sum_{j \in PM(e,k)} u_j(t - dV(k,e)) \right) + \sum_{i \in PM(e,k)} b_i u_i(t) \right) + \sum_{i \in PM(e,k) \forall k \in PM(e)} b_i u_i(t)$$

En efecto, se supone que la misma base no participa en 2 premezclas diferentes en paralelo al mismo nivel: se tiene por tanto una yuxtaposición de los términos que se refieren a las bases premezcladas para las diferentes premezclas sucesivas.

PM(e) es el conjunto de los índices k de premezclas en paralelo para la etapa considerada e.

PM(e,k) es el conjunto de los índices k' (designados por i o j en las sumas) de las bases que pertenecen a la premezcla k de la etapa e actual.

dV = dV(k,e) es el retardo, de la premezcla actual k para la etapa e considerada.

D Premezclas múltiples en serie y en paralelo

Para varias premezclas en serie y en paralelo, se va a proceder de manera progresiva, etapa por etapa, partiendo de las bases de salida asociadas al vector de control actual no retardado, y calculando un vector de control retardado en la salida de cada etapa y propagando este vector a la etapa siguiente.

El vector de control retardado a la salida de la última etapa será el vector de control retardado que se utilizará para asegurar una sincronización de los controles en la ecuación de estimación de propiedades.

Para nuestro ejemplo descrito en la tabla 1.4,

Las bases que no participan en ninguna premezcla en la primera etapa son las bases 3, 4, 5, 8, 9 y 10.

La contribución para estas bases es la siguiente:

$$\sum_{i \in PM(k) \forall k \in PM(1)} b_i u_i(t) = b_3 u_3(t) + b_4 u_4(t) + b_5 u_5(t) + b_8 u_8(t) + b_9 u_9(t) + b_{10} u_{10}(t)$$

Las bases que participan en la premezcla premezV1 son: u1 y u2

Las bases que participan en la premezcla premezV2 son: u6 y u7

La contribución para estas bases es la siguiente:

$$\sum_{i \in premezV1} b_i * u_i(t - dV1) * \left(\sum_{j \in premezV1} u_j(t) \right) / \left(\sum_{j \in premezV1} u_j(t - dV1) \right) +$$

$$\sum_{i \in premezV2} b_i * u_i(t - dV2) * \left(\sum_{j \in premezV2} u_j(t) \right) / \left(\sum_{j \in premezV2} u_j(t - dV2) \right)$$

Para esta primera etapa, los retardos de premezcla δV1 y δV2 están asociados respectivamente a los volúmenes muertos V1 y V2 de las dos premezclas a considerar respectivamente sobre las bases 1, 2 y sobre las bases 6, 7.

El vector de control retardado VR(t) que se desea calcular será de la siguiente forma:

$$y_i(t) = \sum_j b_{ij} * VR_j(t)$$

El vector de control retardado en la salida de la etapa 1 se expresará entonces de la manera siguiente:

Este vector de control retardado para la etapa 1 se designa por VR1.

5 Las componentes de este vector, asociadas a las bases que no participan de ninguna premezcla serán las componentes correspondientes del vector de control actual inalterado: $VR1_i(t) = u_i(t)$

10 Por el contrario, las componentes de este vector, asociadas a las bases que participan en una premezcla "premez" de retardo dV, sufrirán un tratamiento de sincronización del tipo:

$$VR1_i(t) = u_i(t - dV) * \left(\frac{\sum_{i \in \text{premez}} u_j(t)}{\sum_{i \in \text{premez}} u_j(t - dV)} \right)$$

15 El cálculo de VR1 utiliza el vector de control actual u(t). Para el ejemplo de la tabla 1.4, VR1 estará por tanto definido mediante:

- 1 $u_1(t-dV1) * [U1+U2(t)] / [U1+U2(t-dV1)]$
- 2 $u_2(t-dV1) * [U1+U2(t)] / [U1+U2(t-dV1)]$
- 3 $u_3(t)$
- 20 4 $u_4(t)$
- 5 $u_5(t)$
- 6 $u_6(t-dV2) * [U6+U7(t)] / [U6+U7(t-dV2)]$
- 7 $u_7(t-dV2) * [U6+U7(t)] / [U6+U7(t-dV2)]$
- 8 $u_8(t)$
- 25 9 $u_9(t)$
- 10 $u_{10}(t)$

El vector de control retardado calculado para la etapa 2 (designado por VR2) utilizará en la entrada de etapa como control actual el vector de control retardado en la salida de la etapa precedente (designado por VR1, de componente $VR1_i = VR1(i)$).

Esta segunda etapa se define por una premezcla de volumen muerto V1' y de retardo correspondiente dV1' para las bases 1, 2, 6 y 7.

35 VR2 se definirá por lo tanto por las componentes siguientes:

- 1 $VR11(t-dV1') * [VR11+VR12(t)+VR16+VR17(t)] / [VR11+VR12+VR16+VR17(t-dV1')]$
- 2 $VR12(t-dV1') * [VR11+VR12(t)+VR16+VR17(t)] / [VR11+VR12+VR16+VR17(t-dV1')]$
- 40 3 $VR13(t)$
- 4 $VR14(t)$
- 5 $VR15(t)$
- 6 $VR16(t-dV1') * [VR11+VR12(t)+VR16+VR17(t)] / [VR11+VR12+VR16+VR17(t-dV1')]$
- 7 $VR17(t-dV1') * [VR11+VR12(t)+VR16+VR17(t)] / [VR11+VR12+VR16+VR17(t-dV1')]$
- 8 $VR18(t)$
- 45 9 $VR19(t)$
- 10 $VR110(t)$

El vector de control retardado calculado para la etapa 3 (designado por VR3) utilizará en la entrada de etapa como control actual el vector de control retardado en la salida de la etapa precedente (designado por VR2, de componente $VR2_i = VR2(i)$).

Esta tercera etapa se define por una premezcla de retardo dV1" de volumen muerto V1" para las bases 1, 2, 6, 7 y 10 por un lado y de una segunda premezcla de retardo dV2" de volumen muerto V2" para las bases 4, 5 por otro lado.

55 VR3 se definirá por tanto mediante:

- 1 $VR21(t-dV1'') * [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t)] / [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t-dV1'')]$
- 2 $VR22(t-dV1'') * [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t)] / [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t-dV1'')]$
- 60 3 $VR23(t)$
- 4 $VR24(t-dV2'') * [VR24+VR25(t)] / [VR24+VR25(t-dV2'')]$
- 5 $VR25(t-dV2'') * [VR24+VR25(t)] / [VR24+VR25(t-dV2'')]$
- 6 $VR26(t-dV1'') * [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t)] / [VR21+VR22+VR26+VR27+VR210(t-dV1'')]$

$$\begin{aligned}
 &7 \text{ VR}_{27}(t-dV1'') * [\text{VR}_{21} + \text{VR}_{22} + \text{VR}_{26} + \text{VR}_{27} + \text{VR}_{210}(t)] / [\text{VR}_{21} + \text{VR}_{22} + \text{VR}_{26} + \text{VR}_{27} + \text{VR}_{210}(t-dV1'')] \\
 &8 \text{ VR}_{28}(t) \\
 &9 \text{ VR}_{29}(t) \\
 &10 \text{ VR}_{210}(t-dV1'') * [\text{VR}_{21} + \text{VR}_{22} + \text{VR}_{26} + \text{VR}_{27} + \text{VR}_{210}(t)] / [\text{VR}_{21} + \text{VR}_{22} + \text{VR}_{26} + \text{VR}_{27} + \text{VR}_{210}(t-dV1'')]
 \end{aligned}$$

5 Para esta topología de 3 etapas, el vector retardado final utilizado a continuación en la ley de adaptación de la matriz B de los constituyentes, será el calculado en la salida de la etapa 3, es decir VR3 definido anteriormente.

E Formulación general recursiva del control retardado

10 En la salida de la etapa k, se obtiene una fórmula recursiva del vector de control retardado de la forma: $\text{VR}_k = f(\text{VR}_{k-1})$, con:

15 VR_k vector retardado en la salida de la etapa k
 VR_{k-1} vector retardado en la salida de la etapa k-1
 VR_k se definirá por tanto por:

$$\left[\begin{array}{l} \text{VR}_{(k-1)}i(t-dV(k, p_k)) * \left(\sum_{j \in PM(k, p_k)} \text{VR}_{(k-1)}j(t) \right) / \left(\sum_{j \in PM(k, p_k)} \text{VR}_{(k-1)}j(t-dV(k, p_k)) \right) \text{ si } i \in PM(k, p_k) \\ \text{VR}_{(k-1)}i(t) \text{ si } i \notin PM(k, p_k) \quad \forall p_k \in P_k \end{array} \right]$$

20 $dV(k, p_k)$ es el retardo de premezcla para la premezcla p_k , entre las P_k premezclas de la etapa k, con un total de K etapas a considerar para la topología a tratar.
 $PM(k, p_k)$ Este subconjunto de las bases de la premezcla p_k de la etapa k.

F Utilización implícita del retardo variable

25 El retardo variable: $dV(k, p_k)$ se calcula a partir del volumen muerto asociado a la premezcla p_k de la etapa k y del caudal.

30 Para la gestión del retardo variable, puede utilizarse en este caso ventajosamente una fórmula implícita que permita obtener por interpolación el valor de control retardado (y no el retardado) asociado a un volumen muerto dado en el horizonte.

35 De la expresión recursiva del control retardado para unas cascadas de premezclas en serie/paralelo se deduce que este retardo variable es una composición de retardos relacionados con los volúmenes muertos de las diferentes premezclas de las etapas "anteriores", teniendo en cuenta la topología definida.

G Topologías equivalentes

40 La topología propuesta en este caso con la premezcla V2'' en la etapa 3 es equivalente a si se desplaza esta premezcla a la etapa 1 (V3) o a la etapa 2 (V2')

Tabla 1.5 : Matriz con V2'':

Bases	Etap 1	Etap 2	Etap 3	Cubetas
1	V1	V1'	V1''	B1
2	V1	V1'	V1''	B2
3	0	0		
4	0	0	V2''	B3
5	0	0	V2''	B4
6	V2	V1'	V1''	B5
7	V2	V1'	V1''	B6
8	0	0	0	
9	0	0	0	
10	0	0	V1''	B7
11	0	0	0	

Matriz equivalente con V3 (= V2'')

45 La topología real comprende 3 etapas de premezcla:

Tabla 1.6

Bases	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Cubetas
1	V1	V1'	V1''	B1
2	V1	V1'	V1''	B2
3	0	0		
4	V3	0	0	B4
5	V3	0	0	B5
6	V2	V1'	V1''	B6
7	V2	V1'	V1''	B7
8	0	0	0	
9	0	0	0	
10	0	0	V1''	B10
11	0	0	0	

Matriz equivalente con V2' (=V3= V2''):

5 La topología real comprende 3 etapas de premezcla:

Tabla 1.7

Bases	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Cubetas
1	V1	V1'	V1''	B1
2	V1	V1'	V1''	B2
3	0	0		
4	0	V2'	0	B4
5	0	V2'	0	B5
6	V2	V1'	V1''	B6
7	V2	V1'	V1''	B7
8	0	0	0	
9	0	0	0	
10	0	0	V1''	B10
11	0	0	0	

Ejemplo 3: Secuencias de optimización

10 El procedimiento de control según la invención utiliza un procedimiento de optimización para determinar la
 formulación u durante la subetapa (3) de la etapa (ii). Este procedimiento de optimización comprende las etapas (a)
 a (d) enunciadas más arriba. El procedimiento de optimización se implementa mediante el optimizador 14 y
 15 suministra una formulación u optimizada al estimador 13 para la determinación de la formulación a aplicar a los
 medios de control 10 del dispositivo.

A continuación se describe en el presente documento, con referencia a la figura 3, un ejemplo de funcionamiento del
 procedimiento de optimización utilizado para optimizar la formulación u.

20 Notaciones: Se consideran los subconjuntos siguientes de $M = \{1,2,\dots,m\}$, conjunto de los índices atribuidos a las
 salidas:

- R, el subconjunto de los índices de salida para los que se especifican unas referencias calculadas en modo
 integrado o unas consignas en modo instantáneo,
- 25 • H_m , el subconjunto de los índices de salida para los que se especifican unos límites mínimos denominados
 “duros” es decir que deben ser respetados prioritariamente,
- H_M , el subconjunto de los índices de salida para los que se especifican unos límites máximos duros,
- S_m , el subconjunto de los índices de salida para los que se especifican unos límites máximos denominados
 “suaves”, es decir no prioritarios,
- 30 • S_M , el subconjunto de los índices de salida para los que se especifican unos límites máximos suaves.

A cada salida, se supone poder asociar al menos una referencia (o consigna), un límite mínimo (duro o suave) y un
 límite máximo (duro o suave). Implícitamente por tanto, $H_m \cap S_m = \emptyset$ y $H_M \cap S_M = \emptyset$.

35 Por otro lado, se supone que los efectos estimados de los aditivos se tienen en cuenta en el valor de las referencias
 y de las restricciones.

Las igualdades que se deben tener en cuenta para las referencias y_i^{ref} son:

$$y = y_i^{ref}, \forall i \in R.$$

5 Sea \hat{B}_R la matriz extraída de \hat{B} que no conserva más que las líneas que corresponden a los índices que pertenecen a R . Introduciendo los vectores y_R e y_i^{ref} , este subconjunto de desigualdades se reescribe $y_R = \hat{B}_R u = y_i^{ref}$. Lo que es una restricción sobre la incógnita u .

El conjunto de las restricciones sobre la salida se escribe:

$$\begin{cases} y_i \geq y_i^{\min} & \forall i \in H_m \\ y_i \leq y_i^{\max} & \forall i \in H_M \\ y_i \geq y_i^{\min} & \forall i \in S_m \\ y_i \leq y_i^{\max} & \forall i \in S_M \end{cases}$$

10

Sea \hat{B}_{Hm} la matriz extraída de \hat{B} que no conserva más que las líneas relativas a los índices que pertenecen a Hm . Introduciendo los vectores y_{Hm} e y_{Hm}^{\min} , este subconjunto de desigualdades se reescribe $y_{Hm} = \hat{B}_{Hm} u \geq y_{Hm}^{\min}$. Lo que es una restricción sobre la incógnita u . A través de unas notaciones similares,

15

$$\begin{cases} \hat{B}_{H_m} u \geq y_{H_m}^{\min} \\ \hat{B}_{H_M} u \leq y_{H_M}^{\min} \\ \hat{B}_{S_m} u \geq y_{S_m}^{\min} \\ \hat{B}_{S_M} u \leq y_{S_M}^{\min} \end{cases}$$

Este conjunto de desigualdades es por supuesto equivalente a

$$\begin{cases} -\hat{B}_{H_m} u \leq -y_{H_m}^{\min} \\ \hat{B}_{H_M} u \leq y_{H_M}^{\min} \\ -\hat{B}_{S_m} u \leq -y_{S_m}^{\min} \\ \hat{B}_{S_M} u \leq y_{S_M}^{\min} \end{cases}$$

20

Tengamos en cuenta que:

$$B_H = \begin{pmatrix} -B_{H_m} \\ B_{H_M} \end{pmatrix} \quad B_S = \begin{pmatrix} -B_{S_m} \\ B_{S_M} \end{pmatrix} \quad y_H^{\max} = \begin{pmatrix} -y_{H_m}^{\min} \\ y_{H_M}^{\max} \end{pmatrix} \quad y_S^{\max} = \begin{pmatrix} -y_{S_m}^{\min} \\ y_{S_M}^{\max} \end{pmatrix}$$

25 El conjunto de desigualdades se escribe finalmente:

$$\begin{cases} \hat{B}_H u \leq y_H^{\max} \\ \hat{B}_S u \leq y_S^{\max} \end{cases}$$

30 A continuación, de acuerdo con las notaciones enunciadas más arriba, se utilizan, para un conjunto cualquiera P de índices asociados a estas salidas, las notaciones $y_p = \hat{B}_p u \leq y_p^{\max}$. Para una única salida del índice j , la notación es simplemente $y_j = \hat{B}_j u$.

35 El problema de optimización inicial P0 (problema completo), consiste en encontrar la formulación u más próxima a una formulación de referencia \bar{u} , mientras se respeta el conjunto de las restricciones sobre u . Este problema no tiene forzosamente una solución. Si no la hay, es necesario como mínimo producir una nueva formulación, que se obtiene según la invención resolviendo secuencialmente varios problemas de optimización sucesivos:

- en un primer tiempo (problema P1), se buscan los valores admisibles para las restricciones duras sobre las salidas, procediendo de manera iterativa desde las restricciones duras más prioritarias hasta las restricciones duras menos prioritarias;
- en un segundo tiempo (problema P2), se buscan los valores admisibles para las referencias;
- finalmente (problema P3), se buscan los valores admisibles para las restricciones suaves sobre las salidas,

40

procediendo de manera iterativa desde las restricciones suaves más prioritarias hacia las restricciones suaves menos prioritarias.

La tabla 1 describe un ejemplo de las secuencias de optimización.

5

Tabla 1: secuencias de optimización P0 a P3.

		→			
		P0	P1	P2	P3
Optimización de la formulación		criterio			
Min / Max analizador	Suave	restricción			Criterio
	Duro	restricción	Criterio	→ restricción obtenible	
Consignas analizadores		restricción		Criterio	→ referencia obtenible
Velocidad / Min / Max de bases		restricción	restricción	restricción	restricción
Suma de vías = 100%		restricción	restricción	restricción	restricción

10 Los mínimos/máximos de las bases utilizadas como restricciones prioritarias permanentes se disponen en unos valores en proporciones, sabiendo que los mínimos/máximos hidráulicos se expresan en m³/h, utilizando el caudal total de la mezcladora.

Las velocidades de evolución (ROC) son típicamente del orden del 25%.

15 Para la realización de una mezcla del tipo gasolina, los mínimos duros son típicamente la densidad, el índice de octano, los porcentajes destilados, mientras que los máximos duros son típicamente el contenido de azufre, la densidad, la tensión de vapor, la volatilidad, el contenido de benceno, el contenido en olefinas y el contenido en aromáticos; e inversamente para los mínimos y máximos suaves, excepto para la densidad que tiene sus umbrales mínimo y máximo como unos umbrales duros.

20

Para la realización de una mezcla de tipo gasóleo, los mínimos suaves son típicamente el contenido de azufre, la densidad, la filtrabilidad y el punto de turbidez, y los máximos suaves son típicamente el punto de inflamación, el índice de cetano y el porcentaje destilado, e inversamente para los mínimos y máximos duros.

25 Para la realización de la mezcla de tipo fueloil, los mínimos duros son típicamente la viscosidad, y los máximos duros son típicamente, la viscosidad, el contenido de azufre y la densidad.

Se pueden utilizar los diferentes problemas sucesivos detallados a continuación.

30 **Problema inicial P0**

El problema inicial P0 se utiliza en la implementación de la etapa (a) del procedimiento de optimización descrito anteriormente. La solución de este problema de regulación completo P0 consiste en una formulación u optimizada teniendo en cuenta unas restricciones sobre las proporciones de los constituyentes y unas restricciones sobre las propiedades de la mezcla.

35

Este problema consiste en respetar el conjunto de las restricciones sobre la formulación y sobre las salidas, así como las referencias sobre las salidas, mientras se aleja lo menos posible de la formulación de referencia, en el sentido de los mínimos cuadrados.

40

El problema a resolver es así:

$$\min_u \|u - u^{\text{ref}}\|^2$$

45

$$\begin{cases} u^{\text{min}} \leq u \leq u^{\text{max}} \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_R u = y_R^{\text{ref}} \\ \hat{B}_H u = y_H^{\text{max}} \\ \hat{B}_S u = y_S^{\text{max}} \end{cases}$$

El problema de optimización formulado en este caso hace aparecer como variable de optimización un vector u de formulación que se desea calcular.

Una alternativa consiste en plantear un problema de optimización similar, con un vector de desviación e como variable de optimización, entre la formulación inicial de referencia y la formulación u de las proporciones de los constituyentes.

5 Cuando este problema posee una solución u^* , se aplica. En caso contrario, se resuelven sucesivamente los tres problemas P1 a P3 descritos en el presente documento a continuación.

Para el problema P0, las restricciones a respetar son:

- 10 (1) unas restricciones sobre las proporciones de las bases:
- Restricciones hidráulicas (desigualdades): cada vía i puede suministrar un caudal comprendido entre F_i^{\min} y F_i^{\max} . Para un caudal de velocidad actual F , es necesario, para cada base:

15

$$u_i^{p,\min} = \frac{F_i^{\min}}{F} \leq u_i \leq u_i^{p,\max} = \frac{F_i^{\max}}{F}$$

- Restricciones de ordenación (desigualdades): corresponden a las incorporaciones mínimas y máximas para cada base (proporciones cuya suma es igual a 1). Para el modo instantáneo, esto se traduce en unas restricciones mínimas $u_i^{o,\min}$ y máximas $u_i^{o,\max}$.

- 20
- Restricciones de variación de incorporación (desigualdades): la proporción de cada base i no puede evolucionar en proporción por encima de δu_i^b a la baja y por encima de δu_i^h al alza. De este modo, si la proporción en la llamada anterior valía u_i , el control actual debe ser superior a $u_i^{\delta,\min} = u_i(1 - \delta u_i^b)$ e inferior a $u_i^{\delta,\max} = u_i(1 + \delta u_i^h)$.

- 25
- Restricción de igualdad de caudal total constante (la suma de las proporciones de las bases debe ser igual a 1).

(2) unas restricciones sobre las propiedades de la mezcla:

- 30
- Restricciones de desigualdades asociadas a las ecuaciones de regulación que expresan que el valor y la medición deben desembocar en su consigna y_{sp} (al poder formularse eventualmente bajo la forma de restricciones de desigualdades que promedian la introducción de tolerancias, se requiere una formulación del tipo de restricción de igualdad, si no se tiene recurso a estas tolerancias).

- 35
- Restricciones de desigualdades para mantener los valores de las propiedades medidas en el interior de una horquilla mínimo/máximo, con el fin de respetar las especificaciones y limitar la sobre-especificación.

En este problema, el criterio pretendido se puede expresar como una desviación respecto a la formulación inicial que se desea minimizar mientras se asegura que se han respetado todas las restricciones precisadas anteriormente.

40 Cuando el problema P0 no es resoluble (no factibilidad de la mezcla para tener el conjunto de las especificaciones solicitadas), se desencadena una secuencia de optimización en tres etapas P1, P2, P3.

Problema P1: gestión de las restricciones duras

45 El problema P1 se implementa en el transcurso de la etapa (b) del procedimiento de optimización descrito anteriormente.

Se determina de ese modo una formulación u para la que se resuelve el problema de regulación mínimo P1, que no tiene en cuenta más que las restricciones del problema P0 definidas como prioritarias. Este problema P1 implementa una sucesión de problemas de optimización, normalmente factibles, cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas restricciones prioritarias con el fin de definir los nuevos valores alcanzables para estas restricciones prioritarias.

55 Estos criterios corresponden a unas restricciones jerarquizadas prioritarias del tipo desigualdades sobre las propiedades supervisadas, preferentemente unas restricciones jerarquizadas de rango duro, prioritarias con relación a los objetivos de regulación, y que inducen unos costes de no respeto de las especificaciones de calidad.

60 Este problema P1 se refiere a la gestión de las restricciones duras (restricciones sobre las proporciones de las bases y restricciones prioritarias sobre las propiedades de la mezcla), de manera iterativa, mediante prioridades decrecientes. Pudiendo tener la misma prioridad varias restricciones, la gestión iterativa trabaja para el conjunto de restricciones de iguales prioridades.

A cada restricción se asocia un rango. Por convención, cuanto más reducido sea el rango asociado a la restricción, menos prioritaria será la restricción. Los rangos denominados positivos están asociados a unas restricciones prioritarias, mientras que los rangos denominados negativos están asociados a unas restricciones no prioritarias.

5 Sea una partición de $H = H_m \cap H_M$ en p subconjuntos H_i todos no vacíos, que reagrupan cada uno unos índices que corresponden a unas salidas sujetas a unas restricciones duras de igualdades prioritarias. Por construcción, $p \leq \text{card}(H)$, $\bigcup_{i=1}^p H_i = H$ y $H_i \cap H_j = \emptyset, \forall j \neq i$. Las restricciones relativas a H_j son menos prioritarias que las relativas a H_i ya que $i < j$. Debe tenerse en cuenta también que $H_{ij} = \bigcup_{i=1}^j H_i$.

10 Iteración 1: tratamiento de las restricciones más prioritarias, asociadas a H_1 .

Es necesario resolver:

15

$$\min_{u, \zeta} \left\| \hat{B}_{H_1} u + \zeta - y_{H_1}^{\max} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \zeta \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \end{cases}$$

20 correspondiendo ζ , vector de variables de desviación (vector “slack”) que permite incrementar la dimensión del vector de optimización (u, ζ) y calcular un rebosamiento óptimo, a las relaciones de las restricciones.

Este problema tiene una solución cuando el valor inicial de u cumple los límites y la restricción de igualdad sobre la suma de sus elementos, lo que es siempre el caso.

25 La solución (u^*, ζ^*) permite relajar el problema de optimización llegado el caso.

E iterando sobre los $\text{card}(H_1)$ elementos de ζ , los valores alcanzables $y_{H_1}^{\max, \text{obt}}$ se definen de la manera siguiente:

- 30
- si $\zeta > 0$, entonces el valor alcanzable es el valor inicial de la restricción,
 - si $\zeta = 0$, entonces el valor alcanzable es $\hat{B}_j u^*$.

Iteración k+1:

35 En la $(k+1)$ -ésima iteración, se resuelve el problema siguiente:

$$\min_{u, \zeta} \left\| \hat{B}_{H_{k+1}} u + \zeta - y_{H_{k+1}}^{\max} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \zeta \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_{H_{1k}} u \leq y_{H_{1k}}^{\max, \text{alc}} \end{cases}$$

40 Este problema tiene siempre una solución, puesto que se han definido los valores alcanzables en las k interacciones precedentes para las restricciones relativas a los conjuntos H_1 a H_k .

Como en las iteraciones precedentes, la solución (u^*, ζ^*) permite relajar el problema de optimización llegado el caso. E iterando sobre los $\text{card}(H_{k+1})$ elementos de ζ_j de ζ , los valores alcanzables $y_{H_{k+1}}^{\max, \text{alc}}$ se definen de la manera

45 siguiente:

- si $\zeta > 0$, entonces el valor alcanzable es el valor inicial de la restricción,
- si $\zeta = 0$, entonces el valor alcanzable es $\hat{B}_j u^*$.

50

El problema se resuelve completamente cuando los p subconjuntos de restricciones de prioridades decrecientes han sido abordados durante p iteraciones.

De ese modo, la secuencia P1 permite, mediante optimizaciones sucesivas, resolver las restricciones duras (restricciones sobre las proporciones de las bases y restricciones de rango positivo sobre las propiedades de la mezcla). En caso de no factibilidad, las restricciones de rango menos prioritarias se relajan. Los rangos se utilizan cuando no se puede cumplir todo lo que se solicita. Las restricciones duras tienen un peso más importante que los objetivos de regulación sobre consigna fija. Las restricciones suaves de rango negativo se ignoran. La optimización de la formulación permanece inactiva en esta secuencia.

Problema P2: gestión de las referencias

El problema P2 se implementa en el transcurso de la etapa (c) del procedimiento de optimización descrito anteriormente.

Se determina de ese modo una formulación u para la que se resuelve el problema de regulación P2, que tiene en cuenta dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones prioritarias del problema P0 así como las restricciones no prioritarias del problema P0. Este problema P2 implementa un problema de optimización cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas restricciones no prioritarias, con el fin de definir nuevos valores alcanzables para estas restricciones no prioritarias.

Estos criterios corresponden a unas restricciones de igualdad sobre las propiedades reguladas sobre consigna fija, preferentemente unas restricciones de rango suave no prioritario con relación a los objetivos de regulación, pero que inducen una calidad excesiva.

Esta secuencia comprende el conjunto de restricciones duras, con unos límites cuyo valor se ha relajado eventualmente durante la secuencia P1. El problema P2 busca cumplir en el mejor de los casos las ecuaciones de la regulación, e incluso, llegado el caso, relajar la consigna en una consigna alcanzable. Estas ecuaciones se tratan todas simultáneamente (esta secuencia P2 no es iterativa).

Es sin embargo posible una orientación de las relajaciones, introduciendo en el criterio un vector de ponderación que utiliza unos pesos relativos característicos de la importancia relativa de las propiedades, con el fin de relajar de manera preferente las propiedades menos importantes.

Las restricciones suaves de rango negativo se ignoran, y la optimización de la formulación permanece inactiva.

Se trata de resolver:

$$\min_u \|\hat{B}_R u - y_R^{ref}\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_H u \leq y_H^{\max,alc} \end{cases}$$

Este problema tiene siempre una solución u* puesto que todas las restricciones duras se han relajado durante la resolución del problema P1. Las referencias alcanzables se calculan como $y_R^{ref,alc} = \hat{B}_R u^*$.

Problema P3: Gestión de las restricciones suaves

El problema P3 se implementa en el transcurso de la etapa (d) del procedimiento de optimización descrito anteriormente.

Se determina una formulación u para la que se resuelve el problema de regulación P3, que tiene en cuenta dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones prioritarias del problema P0 obtenidas en la etapa (b), dichos nuevos valores alcanzables de las restricciones no prioritarias obtenidas en la etapa (c), así como todas las otras restricciones no prioritarias del problema P0 y no tratadas por los problemas P1 y P2. Este problema P3 implementa una sucesión de problemas de optimización, normalmente factibles, cuyos criterios consisten en penalizar la violación de dichas otras restricciones no prioritarias, con el fin de definir nuevos valores alcanzables para estas otras restricciones no prioritarias.

Estos criterios corresponden a unas restricciones jerarquizadas, no prioritarias de tipo desigualdad sobre las propiedades supervisadas.

Este problema se refiere a la gestión de las restricciones suaves de manera iterativa, se trata de una gestión secuencial por paquetes de restricciones de prioridades decrecientes. De manera análoga al problema P1, se introducen los subconjuntos S_i de $S = S_m \cup S_M$.

5 Iteración 1: tratamiento de las restricciones más prioritarias, asociadas a S_1 .

Es necesario resolver:

10

$$\min_{u, \zeta} \left\| \hat{B}_{S_1} u + \zeta - y_{S_1}^{\max} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \zeta \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_H u \leq y_H^{\max, alc} \\ \hat{B}_R u \leq y_R^{\max, alc} \end{cases}$$

La solución (u^*, ζ^*) permite relajar el problema de optimización llegado el caso. Al iterar sobre los $\text{card}(S_1)$ elementos de ζ_j de ζ , los valores alcanzables $y_{S_1}^{\max, alc}$ se definen de la manera siguiente:

- 15
- si $\zeta > 0$, entonces el valor alcanzable es el valor inicial de la restricción,
 - si $\zeta = 0$, entonces el valor alcanzable es $\hat{B}_j u^*$.

20 Iteración k+1:

En la $(k+1)$ -ésima iteración, se resuelve el problema siguiente:

25

$$\min_{u, \zeta} \left\| \hat{B}_{S_{k+1}} u + \zeta - y_{S_{k+1}}^{\max} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \zeta \geq 0 \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_H u \leq y_H^{\max, alc} \\ \hat{B}_R u = y_R^{\text{ref}, alc} \\ \hat{B}_{S_{1k}} u \leq y_{S_{1k}}^{\max, alc} \end{cases}$$

Como en las iteraciones precedentes, la solución (u^*, ζ^*) permite relajar el problema de optimización llegado el caso. E iterando sobre los $\text{card}(S_{k+1})$ elementos de ζ_j de ζ , los valores alcanzables $y_{S_{k+1}}^{\max, alc}$ se definen de la manera siguiente:

- 30
- si $\zeta > 0$, entonces el valor alcanzable es el valor inicial de la restricción,
 - si $\zeta = 0$, entonces el valor alcanzable es $\hat{B}_j u^*$.

35 El problema se resuelve completamente cuando los subconjuntos de restricciones de prioridades decrecientes han sido todos abordados.

Esta secuencia P3 permite tener en cuenta, si es posible, la restricciones suaves, según su rango, mientras se respetan las ecuaciones de regulación (eventualmente relajadas), bajo restricciones sobre las proporciones de las bases y restricciones duras eventualmente relajadas sobre las propiedades de la mezcla.

40 Las restricciones de rango idéntico se tratan simultáneamente en las secuencias de optimización. La optimización de la formulación permanece inactiva.

45 La resolución global del problema de optimización se termina después de la última iteración del problema P3, cuya parte u^* de la solución es el control calculado, a aplicar en la mezcladora.

Preferentemente, para cada problema, se garantiza la no violación de las restricciones sobre las proporciones de las bases así como la no violación de la restricción sobre la suma de las proporciones de las bases, que debe valer 1. Estas restricciones siempre son tenidas en cuenta.

5 La figura 3 representa la secuenciación de los problemas de optimización P0 a P3 definidos en el presente documento anteriormente.

10 Si la resolución numérica del problema inicial P0 no ha proporcionado una solución, se lanza la resolución secuencial de los problemas P1, P2, P3. Aunque estos problemas tienen teóricamente siempre una solución, su resolución numérica puede fracasar. La formulación aplicada sobre el procedimiento en función de los fracasos de resolución es la siguiente (véase la figura 3):

- 15
- Caso 1: la formulación aplicada es el resultado del problema de optimización inicial,
 - Caso 2: la formulación aplicada es la formulación actual,
 - Caso 3: la formulación aplicada es el resultado del cálculo de P1
 - Caso 4: la formulación aplicada es el resultado del cálculo de P2
 - Caso 5: la formulación aplicada es el resultado del cálculo de P3

20 Durante un fracaso de la resolución numérica para los problemas P1 a P3, y durante una relajación persistente de una restricción dura durante la solución del problema P1, se activa una supervisión de las salidas. Esta supervisión consiste en verificar que:

- 25
- las salidas y_i asociadas a una consigna y_i^c permanecen en la zona comprendida entre $y_i^c - t^c$ e $y_i^c + t^c$, donde t^c es una tolerancia definida por el usuario,
 - las salidas únicamente asociadas a unos límites mínimo y^{\min} y/o máximo y^{\max} no sobrepasan los valores $y^{\min} - t^{\min}$ y/o $y^{\max} + t^{\max}$, donde t^{\min} y t^{\max} son unos umbrales definidos por el usuario.

Si se supera un umbral, el control de la mezcla se detiene.

30 Se observará que los problemas de optimización se codifican utilizando la desviación e con relación a la formulación inicial u^0 , y no directamente en la variable u .

35 Por el contrario, el estimador de propiedades se codifica utilizando una codificación en u y no en la desviación e , lo que permite liberarse del recurso a las medidas iniciales de caudal de mezcla, frecuentemente sujeta a imprecisiones.

Además, la codificación en la variable u según la invención es perfectamente compatible con la realimentación según la invención descrita más arriba.

40 Se observará que una colocación a escala de las ecuaciones que intervienen en los problemas de optimización planteados permite liberarse de los problemas de acondicionamiento numérico, teniendo en cuenta los órdenes de magnitud eventualmente diferentes de las propiedades consideradas.

45 Esta puesta a escala consiste en utilizar un factor de escalado multiplicativo aplicado sobre los miembros a derecha e izquierda de las diferentes restricciones.

Este factor se ajusta en función de la propiedad considerada:

50 Esta puesta a escala se realiza en efecto utilizando como valor de normalización una media entre los valores extremos (mínimos y máximos) de las cualidades de los constituyentes (cuando la propiedad no está asociada a un valor de consigna).

55 Se utilizará además como valor de normalización una media entre la media de los valores extremos (mínimos y máximos) de las cualidades de los constituyentes, por una parte, y un valor de consigna eventual (cuando la propiedad se asocia a un valor de consigna).

Además, se aplica igualmente una normalización en los criterios de optimización P1, P2, P3.

60 La norma utilizada corresponde a una forma cuadrática definida mediante una matriz diagonal, cuyos términos diagonales son los cuadrados de las inversas de los factores de escala calculados.

Ejemplo 4: Optimización en modo integrado

a. Restricciones sobre las propiedades de la mezcla

5 Cuando el modo de control es el modo instantáneo, las restricciones sobre las propiedades de la mezcla definidas por el usuario son las utilizadas para la optimización, particularmente los objetivos son directamente unas consignas proporcionadas por el usuario.

10 En modo de control integrado, el usuario puede considerar que lo que cuenta es la gestión de las restricciones no sobre las características de la mezcla instantánea, sino sobre las características del volumen total vertido en la cubeta desde el comienzo de la mezcla en el modo integrado de la mezcla, y sobre las características del volumen total de la cubeta en modo integrado sobre la cubeta. Esto permite la libertad sobre la definición de las restricciones instantáneas utilizadas para la optimización.

15 Es posible evidentemente tomar los valores definidos por el usuario para las restricciones asociadas al volumen total vertido, pero estas se pueden relajar, como lo detallan las líneas que siguen.

20 Si el valor integrado actual de la propiedad de la mezcla se indica por z^k , y la de la iteración $k+1$, z^{k+1} , para un volumen actual V^k , un caudal actual F^k y un periodo de paso T (o varios periodos asimilados a un horizonte deslizante), el valor actual y^k de la propiedad de la salida de la mezcladora permite vincular z^k a z^{k+1} según:

$$V^k z^k + F^k T y^k = (V^k + F^k T) z^{k+1}$$

25 Si la restricción proporcionada por el usuario es z^{\max} (el tratamiento descrito es similar para las restricciones mínimas), es necesario que en la iteración actual:

$$y^k \leq \frac{(V^k + F^k T)z^{\max} - V^k z^k}{F^k T}$$

30 El segundo miembro de esta desigualdad proporciona un límite máximo para y^k que puede ser muy diferente de z^{\max} , pero puede, sin embargo, servir para evitar forzar excesivamente el control instantáneo eligiendo $y^{\max} = z^{\max}$. Por el contrario, no es deseable aplicar este límite cuando es demasiado diferente de z^{\max} : no se autoriza una relajación de y^{\max} mayor que $z^{\max} + t$, siendo z^{\max} la restricción mantenida por el usuario y t una tolerancia definida también por el usuario.

35 **b. Gestión de las referencias**

En modo instantáneo, las propiedades reguladas son las propiedades a la salida de la mezcladora. En este caso las referencias utilizadas durante la optimización son iguales a las consignas definidas por el usuario.

40 En modo integrado de fondo de cubeta, las propiedades reguladas son las propiedades de la cubeta de destino en la que se vierte la mezcla. Las consignas definidas por el usuario se relacionan con las propiedades de la cubeta. Para la optimización, las referencias se calculan a partir de estas consignas.

También es posible regular ciertas propiedades en modo instantáneo y otras en modo integrado.

45 - Caso en el que la cubeta de destino de la mezcla está vacía al comienzo de la mezcla (o modo integrado de "mezcla", para distinción del modo "integrado sobre cubeta").

Notaciones:

- 50
- $y_j(t)$, valor de la propiedad j en la salida de la mezcladora en el tiempo t ;
 - $z_j(t)$, valor de la propiedad j integrada en el volumen vertido, correspondiente en este caso a la propiedad j integrada de la mezcla en el tiempo t ;
 - $V(t)$, volumen vertido desde el comienzo de la mezcla, correspondiente en este caso al volumen de la mezcla en el tiempo t ;
 - $F(t)$, caudal volumétrico total de la mezcladora en el tiempo t .
- 55

Por simple balance de materia,

60

$$\frac{dV(t)}{dt} = F(t) \quad \text{y} \quad \frac{d(V(t)z_j(t))}{dt} = F(t) y_j(t)$$

Sean los tiempos t_0 y t_1 , $t_1 \geq t_0$, si y_j y F son constantes entre t_0 y t_1 , entonces:

$$V(t_1) = V(t_0) + F(t_0) (t_1 - t_0),$$

5 y

$$F(t_0) (t_1 - t_0) y_j(t_0) + V(t_0) z_j(t_0) = (V(t_0) + F(t_0) (t_1 - t_0)) z_j(t_1)$$

Definir una referencia se convierte en calcular el valor constante y_j^{ref} que debe tomar la propiedad en la salida de la mezcladora, para que al cabo del tiempo H (horizonte deslizante elegido por el usuario) a partir del tiempo actual t , la propiedad integrada z_j pase de su valor actual $z_j(t)$ a su valor de consigna z_j^c .

De ese modo, es necesario que

$$15 \quad F(t) H y_j^{ref} + V(t) z_j(t) = (V(t) + F(t) H) z_j^c$$

O sea

$$y_j^{ref} = z_j^c + \frac{V(t)}{F(t)H} (z_j^c - z_j(t))$$

20

En cada iteración, la referencia se actualiza a partir de esta fórmula (horizonte deslizante).

- Caso en el que la cubeta de destino de la mezcla no está vacía al comienzo de la mezcla.

25 El cálculo de las trayectorias se debe modificar.

Sea V_0 el volumen inicial y z_{j0} el valor inicial de la propiedad j en la cubeta, entonces:

$$F(t) H y_j^{ref} + V(t) z_j(t) + V_0 z_{j0} = (V_0 + V(t) + F(t) H) z_j^c$$

30

donde $V(t)$ es el volumen vertido después del comienzo de la mezcla, correspondiente en este caso al volumen de la mezcla en el momento t .

35 Con el fin de evitar un salto de la referencia, es preferible tener en cuenta progresivamente, y no una sola vez, el volumen del fondo de la cubeta.

Para esto, se define una consigna virtual z_j^{cv} , tal que:

$$z_j^{cv} = z_j^c + a \frac{V_0}{V(t) + F(t)H} (z_j^c - z_{j0})$$

40

Cuando a vale 0, no hay fondo de cubeta.

Cuando a vale 1, se tiene en cuenta el conjunto del fondo de cubeta. Es suficiente por tanto hacer pasar a de 0 a 1 siguiendo una cierta trayectoria, predefinida, para tener en cuenta progresivamente el fondo de la cubeta.

45

Ejemplo 5: Gestión de los aditivos.

Los aditivos (o dopantes), inyectados en cantidad reducida, actúan esencialmente, pero fuertemente, sobre una de las propiedades de la mezcla. Cuando no hay restricción sobre el caudal de aditivo, la propiedad dopada se puede separar completamente del problema de control multivariable de las secuencias de optimización. Se utiliza entonces un regulador monovariable actuando sobre el caudal del aditivo para regular esta propiedad. Se trata por ejemplo del controlador de inyección de aditivo 18 del dispositivo descrito más arriba. El funcionamiento de un regulador de ese tipo se describe en el presente documento a continuación.

55 Se han de tener en cuenta las observaciones preliminares siguientes:

- el efecto sobre la propiedad afectada de la inyección de un dopante se considera instantáneo. No obstante, para cualquier propiedad existe un retardo de medición, que puede depender del valor medido. Se supondrá, lo que es el caso en la práctica, que es posible ligar el retardo de medición al valor medido,

- el efecto de un dopante sobre la propiedad está bastante mal cuantificado. Es variable en función del valor actual de la propiedad dopada. Se supondrá que es posible vincular, incluso de manera poco precisa y para cada valor tomado por la propiedad dopada, la variación del caudal de dopante con la variación del valor de la propiedad dopada.

5

El modelo utilizado se escribe:

$$\frac{dy}{dt} = K(y) \frac{dv}{dt},$$

10 donde

- y es el valor medido de la propiedad dopada
- v es el caudal de dopante,
- K es una ganancia que depende del valor actual de la propiedad dopada. Se supondrá que se dispone de una función de y constante por fragmentos para describir esta ganancia.

15

Desde un punto de vista discreto, en la iteración k :

$$\Delta y^k = K(y^k) \Delta v^k.$$

20

Para que la salida, cuyo valor actual es y^k , tienda hacia su valor de referencia $y^{ref,r}$, es suficiente que $\Delta v^k = (y^{ref,r} - y^k)/K(y^k)$. Sin embargo, el valor de la salida disponible en k no es el valor actual, debido al retardo de la medición. Es necesario entonces basarse para el cálculo del control en una estimación \hat{y}^k de la salida, y calcular el control mediante:

25

$$\Delta v^k = (y^{ref,r} - y^k)/K(\hat{y}^k)$$

La estimación \hat{y}^k es la suma de dos términos:

30

- una estimación en bucle abierto \hat{x}^k (que utiliza $K(\hat{y}^k)$),
- un resultado filtrado \bar{b}^k , resultante del filtrado de primer orden de un resultado instantáneo, desviación sincronizada entre medición y predicción en bucle abierto.

35

A toda medida y^k le corresponde un retardo de medición δT , donde T es el periodo de muestreo del control. Se supone que una función de y constante por fragmentos describe este retardo. La medida y^k corresponde así a una predicción en bucle abierto $\hat{x}^{k-\delta}$, que permite calcular el resultado instantáneo $b^k = y^k - \hat{x}^{k-\delta}$. El coeficiente de filtrado se fija de manera automática en función del retardo de la medida.

40

Para el control, se generan las restricciones siguientes:

- variación máxima de la intención por paso, al alza o a la baja,
- inyecciones mínima y máxima.

45

En caso de regulación de valor instantáneo, no es posible obtener una consigna en el exterior de los extremos fijados por el usuario.

50

En caso de regulación del valor integrado, la trayectoria de referencia, que incluye eventualmente la toma en consideración de los fondos de las cubetas, se calcula de manera análoga a las implementadas para el control multivariable. En particular, la referencia instantánea calculada a partir de la consigna no puede salirse de los extremos fijados por el usuario. En la práctica, esto permite respetar las restricciones fijadas sobre la propiedad regulada.

55

Es posible, cuando el caudal de dopante se satura (cuando el control permanece igual al mínimo o al máximo durante un tiempo determinado), conmutar hacia una regulación de la propiedad dopada por las bases.

En este caso, el caudal de dopante permanece igual al valor tomado antes de la conmutación.

60

Para una salida dopada, el efecto acumulado debido al dopante entre los momentos 0 del comienzo de la mezcla y el momento t , se escribe:

$$d = \int_0^t K(y(\tau)) \frac{dV}{d\tau}(\tau) d\tau$$

o sea, desde un punto de vista discreto,

5
$$d^k = d^{k-1} + K(\hat{y}^k) \Delta V^k$$

Durante la conmutación hacia una regulación de la propiedad j por las bases, el modelo de control tiene en cuenta este efecto y se escribe:

10
$$y_j = \hat{B}_j u + d$$

Esta expresión se utiliza a la vez en las optimizaciones sucesivas y en la dinámica de \hat{B}_j del sistema de realimentación.

15 **Ejemplo 6:** Optimización de la formulación

Cuando quedan unos grados de libertad en la resolución de las ecuaciones utilizadas en la optimización, es posible optimizar la preparación de la mezcla modificando la formulación, es decir las proporciones respectivas de cada base. Se describen en este ejemplo diferentes opciones de optimización de la formulación, para las secuencias de optimización descritas en el ejemplo 3.

En el problema de optimización inicial P0 descrito en el ejemplo 3, es cuestión de minimizar el término $\|u - \bar{u}\|^2$.

25 El valor de la formulación de referencia \bar{u} en esta expresión depende del modo de optimización elegido por el usuario.

(a) En ausencia de optimización

30 \bar{u} es simplemente igual al valor inicial, es decir la formulación proporcionada por el usuario para el comienzo de la mezcla.

\bar{u} puede definirse igualmente como una formulación "seguidora", su valor es entonces igual al valor medio de u desde el comienzo de la mezcla.

35 (b) Optimización de la incorporación de ciertas bases

Es posible maximizar o minimizar la incorporación de ciertas bases, en exceso o, por el contrario, poco disponibles en el lugar de producción. En este caso, es necesario asociar a la formulación u un vector π de prioridades.

40 Esto comprende unas entradas positivas para las bases a maximizar y unas entradas negativas para las bases a minimizar. Las bases para las que no es deseable maximizar o minimizar la incorporación tienen una prioridad nula.

Sea por tanto $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)^t$ y $|\pi_i| = \max_{i=1, \dots, n} |\pi_i|$, supuesto no nulo.

45 Denotando como u^f el valor filtrado de u, utilizamos $\bar{u} = u^f + \pi^f$, siendo π^f el valor filtrado de:

$$\pi^f = (\pi_1/|\pi_1|, \dots, \pi_n/|\pi_n|)^t$$

Este filtro de π^f permite tener en cuenta de manera progresiva las variaciones de formulación durante la mezcla.

50 (c) Optimización del coste de la mezcla

Se asocia a u un vector de precio, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^t$. En cada paso se define un coste de la formulación, a partir de la formulación filtrada u^f : $c = \xi^t u^f$.

55 A continuación, (c: no nulo) se define un vector ξ' mediante:

$$\xi' = ((1 - \xi_1/c), \dots, (1 - \xi_n/c))^t.$$

De ese modo ξ'_i , definido mediante $\xi'_i = (1 - \xi_i/c)$, es positivo si el coste de la base es inferior al coste de la formulación filtrada actual: en este caso, es necesario buscar incorporar esta base para limitar el coste de la formulación. Inversamente, ξ'_i es negativo si el coste de la base es superior al coste de la formulación.

5 Para la optimización, $\bar{u} = u^f + \xi'$.

(d) Saturación de las especificaciones en las salidas

10 En este caso, δ es igual a la formulación inicial, pero de hecho no tiene más que una escasa importancia. En efecto, si el problema inicial P0 tiene una solución, entonces se lanza el problema iterativo descrito a continuación.

Consideremos $M = \{1, 2, \dots, m\}$, el conjunto de los índices atribuidos a las salidas, y P, el subconjunto de los índices que indican las salidas implicadas en el proceso de optimización.

15 A cada elemento j de P están asociados:

- un elemento de H, dicho de otra manera:
 - o bien un valor máximo a no sobrepasar,
 - o bien un valor mínimo a no sobrepasar.
- un umbral d_j con relación a la restricción.

25 Sea una partición de P en p subconjuntos P_i todos no vacíos, reagrupando cada uno índices correspondientes a unas salidas sometidas a unas necesidades de optimización de iguales prioridades. Por construcción, $p \leq \text{card}(P)$, $\cup_{i=1}^p P_i = P$ y $P_i \cap P_j = \emptyset, \forall j \neq i$.

Las optimizaciones relativas a P_i son menos prioritarias que la relativas a P_i , dado que $i < j$. Debemos tener en cuenta también que $P_{ij} = \cup_{i=1}^j H_j$.

30 Iteración 1

En la primera iteración, se busca acercar las salidas correspondientes a P_1 a sus valores de restricción:

35
$$\min_u \left\| \hat{B}_{P_1} u - y_{P_1}^{\max} + d_{P_1} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_R u = y_R^{\text{ref}} \\ \hat{B}_H u \leq y_H^{\max} \\ \hat{B}_S u \leq y_S^{\max} \end{cases}$$

La solución u^* permite calcular $y_{P_1}^{\min} = \hat{B}_{P_1} u^*$.

40 Iteración k+1

En la (k+1)-ésima iteración, se resuelve el problema siguiente:

45
$$\min_u \left\| \hat{B}_{P_{k+1}} u - y_{P_{k+1}}^{\max} + d_{P_{k+1}} \right\|^2$$

$$\begin{cases} u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \\ \sum_{i=1}^n u_i = 1 \\ \hat{B}_R u = y_R^{\text{ref}} \\ \hat{B}_H u \leq y_H^{\max} \\ \hat{B}_S u \leq y_S^{\max} \\ \hat{B}_{P_k} u \geq y_{P_k}^{\min} \end{cases}$$

El problema se resuelve completamente cuando los p subconjuntos de restricciones de prioridades decrecientes se han abordado durante p iteraciones. Entonces, las salidas son las más aproximadas posibles a sus restricciones.

Ejemplo 7: Control de la mezcladora de carga de hidrodesulfuración en continuo

5 El ejemplo 7 muestra la regulación del valor instantáneo del contenido de azufre para una mezcla elaborada a partir de varias bases.

10 Se podrá observar en este caso que esta regulación del azufre se acompaña en paralelo con la regulación y la supervisión en la zona de otras propiedades de la mezcla, en un contexto de control multivariable.

15 Este ejemplo ilustra la capacidad del dispositivo para asegurar un control instantáneo y continuo, para actuar sobre la composición de carga de una unidad de hidrodesulfuración de los gasóleos, con el fin de controlar las propiedades de la mezcla en la salida de la unidad.

Ilustra igualmente la capacidad del dispositivo para generar unos esquemas aguas arriba de las mezcladoras complejas, con varias premezclas de constituyentes.

Se tienen en cuenta los elementos siguientes:

- retardos de analizadores: 5 minutos para la densidad, el contenido de azufre (estimador rechazado sobre el analizador correspondiente), el porcentaje destinado (calculado), 10 minutos para el punto de inflamación y 15 minutos para el punto de turbidez.
- volúmenes muertos de tránsito de la unidad: 96 m³,
- 25 - volúmenes muertos de premezcla: 16,8 m³ y 10,9 m³ en la primera etapa, 4,5 m³ en la segunda etapa, 10,8 m³ y 1,4 m³ en la tercera etapa de premezcla.

Los constituyentes de carga son los siguientes:

- 30 Base 1: queroseno
- Base 2: queroseno de bajo contenido de azufre
- Base 3: gasóleo ligero de bajo y alto contenido de azufre, procedente de una destilación atmosférica
- Base 4: gasóleo medio procedente de destilaciones atmosféricas y bajo vacío
- Base 5: base olefínica LLCO de FCC, procedente de una cubeta intermedia
- 35 Base 6: gasolina pesada de FCC

Son susceptibles de intervenir en la carga de la unidad otras bases: inyección directa de LLCO, HLCO, HCCS de FCC, inyección directa de gasóleo de reducción de viscosidad GOSV (flujo director de la unidad), reciclado de la unidad.

40 Las características medidas en laboratorio de las bases 1 a 5 se dan en la tabla 2 siguiente:

Tabla 2: características de las bases del ejemplo 7

	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 5
Densidad (a 15°C)	0,7995	0,8279	0,8558	0,883	0,835
Punto de inflamación (°C)	42,5	66	77	52,5	50
Punto de turbidez (°C)	-48,09	-19,9	8,401	-29,96	-30,97
Índice de cetano	45,97	54,8	57,77	25,3	23,5
Porcentaje destilado (a 360°C) (%)	100	100	89,8	100	100
Contenido de azufre (ppm)	-19,39	54,9	99,71	40,08	30,03

45 Los umbrales mínimos son suaves para el conjunto de las propiedades salvo para el punto de inflamación y el índice de cetano.

Los umbrales máximos son duros para el conjunto de las propiedades, salvo para el índice de cetano, el punto de inflamación y el porcentaje destilado.

50 Los valores de estos umbrales máximos y mínimos utilizados para las diferentes propiedades son los siguientes:

Tabla 3: valores de los umbrales máximo y mínimo de las propiedades de la mezcla del ejemplo 7:

Propiedad:	umbral máximo	umbral mínimo
Densidad	0,844	0,82
Punto de inflamación (°C)	65	57
Punto de turbidez (°C)	-6	-15
Índice de cetano	53	46,5
Porcentaje destilado (%)	100	95
Contenido de azufre (ppm)	48	30

5 Los horizontes de trayectoria de referencia utilizados se definen como iguales a dos veces el retardo del analizador, incrementado por los valores parametrizables denominados horizontes reducidos. Los horizontes reducidos utilizados son los siguientes: 10 minutos para la densidad, el índice de cetano, el contenido de azufre y el porcentaje destilado, 20 minutos para el punto de inflamación, y 30 minutos para el punto de turbidez.

10 Los coeficientes de filtrado utilizados para la regulación del estimador son los siguientes: 15 minutos para la densidad, el índice de cetano, el porcentaje destilado y el contenido de azufre, 30 minutos para el punto de inflamación y 45 minutos para el punto de turbidez. Estos coeficientes de filtrado, (inversos a los β_i que aparecen en las fórmulas (1) y (2) definidas más arriba), corresponden a los parámetros componentes del vector β utilizados en las ecuaciones diferenciales del estimador, que permiten controlar la dinámica de convergencia (más o menos rápida), propiedad a propiedad.

15 Se utilizan igualmente unos objetivos de optimización de formulación para maximizar la utilización de las bases 1 (keroseno) y 4 (gasóleo medio de destilación).

20 Al comienzo de la mezcla, los valores mínimo y máximo del contenido de azufre son respectivamente de 30 y de 48 ppm. Los umbrales se modifican a continuación pasando respectivamente a 2 y a 8 ppm. El azufre se regula “en zona” en el interior de sus límites mínimo y máximo. Es este paso de los umbrales de [30, 48] a [2, 8] lo que permite la conmutación de la marcha de 50 ppm (se desea a en este caso un contenido de azufre próximo a 48 ppm para tener un margen de fabricación de 2 ppm) hacia la marcha de 10 ppm (se desea en este caso un contenido de azufre próximo a 8 ppm para tener un margen de fabricación de 2 ppm).

25 La topología de la mezcla se precisa en la tabla 4.

Tabla 4: topología de la mezcla del ejemplo 7:

Base 1 (75)	Mezcla A = bases 1 + 2	Mezcla C = B + base 5	Mezcla final = A + C + Base 6
Base 2 (121)			
Base 3 (79)	Mezcla B = bases 3 + 4		
Base 4 (74)			
Base 5 (63)			
Base 6 (8)			

30 La figura 4 muestra la evolución del contenido de azufre de la mezcla durante una transición rápida de marcha de 50 ppm a 10 ppm en función del número de pasos, correspondiendo cada paso a 5 minutos. Cada paso corresponde a un nuevo lanzamiento del dispositivo según la invención (y por tanto a una nueva iteración del procedimiento de control según la invención), y particularmente a la emisión de una nueva formulación calculada por el dispositivo y aplicada en los equipos.

35 Esta transición de consigna se asegura de hecho por la modificación de los umbrales, mínimo y máximo, sabiendo que la regulación del azufre se realiza en este caso en zona, es decir entre su mínimo y su máximo: esta cualidad del contenido de azufre no tiene por tanto un objetivo fijo del tipo consigna, sino que son las restricciones de límites altos y bajos sobre esta cualidad del contenido de azufre las que se tienen en cuenta en este caso por el optimizador, y las que definen un campo de evolución del objetivo para esta cualidad.

40 Se constatará que el contenido de azufre de la mezcla permanece en todo momento próximo al valor deseado, y sigue rápidamente el control de disminución de la consigna, sin sufrir grandes desviaciones bruscas de valor.

45 El estimador según la invención permite asegurar no solamente la regulación del azufre en la salida de la unidad, sino igualmente la regulación en zona de la densidad, del punto de inflamación, de la turbidez, del cetano, porcentaje de destilación (el punto de inflamación es restricción de mínimo, el azufre y la turbidez son restricciones de máximo).

50 La figura 5 muestra por su parte la evolución del consumo de las bases 2 a 4 utilizadas en el transcurso de la modificación del control de contenido de azufre, no siendo inyectadas las bases 1, 5 y 6 para la realización de la mezcla. Los perfiles de proporción calculados sobre los constituyentes que están representados en la figura permiten obtener los resultados deseados sobre las propiedades en la salida de la unidad.

Ejemplo 8: Mezcla de gasolina en modo integrado con fondo de cubeta (sin premezcla)

Las figuras 6a-e muestran la evolución en el tiempo de las relaciones de las bases (figura 6a), de las regulaciones sobre la búsqueda del índice de octano (RON: Research Octane Number) y sobre la tensión de vapor (RVP: Reid Vapor Pressure) (figuras 6b y 6c, respectivamente), y la supervisión en zona del porcentaje destilado a 100 °C (figura 6d) y del contenido de benceno (figura 6e).

En las figuras 6a a 6c, se representan los valores integrados en la cubeta, los valores instantáneos, así como las consignas.

En la tabla siguiente se indican los valores relativos al contenido de benceno, al porcentaje destilado a 100 °C, al índice de octano motor (MON) al índice de octano de investigación (RON) y a la tensión de vapor (RVP) para las diferentes bases del constituyente:

Tabla 5: valores de las propiedades de las bases del ejemplo 8

	Base 1	Base 4	Base 5	Base 6	Base 7
Contenido de benceno (%)	1,050	0	1,130	0	0
Porcentaje destilado a 100 °C (%)	64,9	29,6	6,9	100,0	125,0
MON	80,0	93,0	91,5	101,0	86,0
RON	89,90	95,10	102,40	113,00	96,00
RVP (mbar)	565,89	454,00	186,37	551,90	4000,59

Este ejemplo pone en evidencia el funcionamiento de la regulación con compensación de fondo de cubeta: hay convergencia de dos cualidades, tensión de vapor en vez de octano, y mantiene las dos otras cualidades: porcentaje destilado a 100 °C y contenido de benceno, dentro de su campo admisible.

Los valores mínimos y máximos de las cualidades reguladas y supervisadas se proporcionan en la forma de [mínimo, máximo] y son las siguientes:

- Contenido de benceno (%): [0, 0,95],
- Porcentaje destilado a 100°C (%): [47, 70]
- RON: [95,199, 96,50] con como consigna el valor mínimo 95,199
- RVP (mbar): [459,99, 599,86] con una consigna igual a 598,86.

Se puede constatar hacia el paso 70 en la segunda mitad de la mezcla una actividad incrementada en las bases, porque al alcanzar la cualidad del porcentaje destilado a 100 °C su límite base (mínimo), la formulación se modifica automáticamente para poder superar su valor y mantenerlo por encima de su umbral mínimo, mientras se mantienen las otras propiedades reguladas y supervisadas en su objetivo.

Este ejemplo ilustra la capacidad del dispositivo para asegurar un control de la mezcla en modo integrado con compensación de fondo de cubeta, permitiendo controlar a la vez unas cualidades reguladas con consigna fija y unas cualidades supervisadas en su zona de mínimo/máximo.

Ejemplo 9: Mezcla de gasóleo, regulación de los dopantes (sin premezcla)

Figura 7

Este ejemplo pone en evidencia el funcionamiento de la regulación mediante inyección de aditivos o dopantes.

En este caso se regulan dos propiedades: el índice de cetano y la filtrabilidad mediante dopantes. Una tercera propiedad (contenido de azufre) se regula paralelamente mediante la mezcla de dos bases, estando bloqueada una tercera base en una relación fija.

La tabla siguiente proporciona los valores relativos al contenido de azufre, la filtrabilidad y el índice de cetano de las tres bases.

Tabla 6: propiedades de las bases del ejemplo 9

	Base 1	Base 3	Base bloqueada
Contenido de azufre (ppm)	30	246	3
Filtrabilidad (°C)	0	-30	-12
Índice de cetano	52	52	-1e+6

La base denominada "bloqueada" se inyecta en una relación constante del 1,5%.

ES 2 459 045 T3

El contenido de azufre se regula con una consigna de 45 ppm, la filtrabilidad sobre una consigna a -16 °C y el índice de cetano a 52.

Tal como se representa en las figuras 7a-f:

5 La figura 7a muestra que se baja la inyección de pro-cetano, hasta cortar esta inyección en mitad de la mezcla, para hacer bajar la integración del cetano (figura 7d), que se reúne gradualmente con su consigna y se mantiene en ella.

10 La figura 7b muestra las inyecciones de dopante de filtrabilidad, con 3 picos correspondientes a las pequeñas oscilaciones sobre la filtrabilidad integrada, constatadas en la figura 7e, lo que denota una regulación controlada de manera reactiva.

15 La figura 7c da los perfiles de las bases utilizados para la regulación del azufre: estos perfiles son bastante estables, excepto un pico en mitad de la mezcla consecutivo al pico constatado en la medida instantánea del azufre en la figura 7f, vinculado a una perturbación puntual.

El azufre integrado se confunde con su consigna en la figura 7f y no ha sido afectado por la perturbación puntual de mitad de la mezcla.

20 Este ejemplo ilustra la capacidad del dispositivo para asegurar un control en la integral de la mezcla, simultánea para los constituyentes de la mezcla y mediante inyección de varios aditivos para controlar diferentes propiedades de la mezcla.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de la elaboración de una mezcla M de n constituyentes, que comprende:

5 en un tiempo t=0 una etapa (i) de estimación de una formulación de referencia \bar{u} a partir de las propiedades de los n constituyentes reunidos en una matriz \hat{B} de valor inicial B_0 que utiliza una ley de adaptación correspondiente a la siguiente ecuación (1)

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu (y_j - y_j^{med}) \quad (1)$$

10 siendo j el índice de las propiedades de la mezcla que varía de 1 a m, en la que

- β_j , un número real estrictamente positivo, es una constante de regulación del tiempo de convergencia que permite diferenciar la rapidez de convergencia de la estimación, propiedad a propiedad
- la matriz H es una matriz simétrica definida positiva que se utiliza para asegurar una normalización al tener en cuenta la desviación medición-predicción que permite el cálculo de la desviación de la predicción de calidad de los constituyentes, con el fin de asegurar las propiedades de convergencia del procedimiento.
- \hat{B}_j^t es la transpuesta de \hat{B}_j , en la que j es el índice de las propiedades de la mezcla,

20 y tal que las propiedades $\hat{B} \bar{u}$ de la mezcla estén comprendidas entre unos umbrales mínimo y máximo predeterminados, y/o para al menos una parte de entre las mismas iguales a los valores objetivo predeterminados, y la aplicación de ésta a una mezcla real de los constituyentes, en un tiempo $t' = t + \Delta t$, siendo Δt el período de paso entre dos iteraciones de cálculo consecutivas, una etapa (ii) de corrección de la matriz B a partir de las propiedades medidas y^{med} de la mezcla M fabricada, para establecer el cálculo de una nueva formulación u correspondiente a la matriz corregida B de las propiedades estimadas de los constituyentes de la mezcla, y posteriormente la aplicación de esta nueva formulación u a los constituyentes para la fabricación de la mezcla M, comprendiendo esta etapa (ii) las siguientes operaciones

- (1) se miden las propiedades y^{med} de la mezcla M obtenida aplicando la formulación calculada en el tiempo precedente,
- (2) se establece una matriz corregida \hat{B} a partir de las propiedades y^{med} de (1), representando esta matriz la estimación de las propiedades de los constituyentes tal como en (i),
- (3) se determina una nueva formulación u a partir de la matriz \hat{B} establecida en la etapa (2), de manera que las propiedades $\hat{B}u$ de la mezcla estén comprendidas entre dichos umbrales predeterminados y/o, para m' de entre las mismas, iguales a dichos valores objetivo predeterminados,
- (4) esta nueva formulación u se aplica a los constituyentes, en un tiempo $t'' = t' + \Delta t$ en una etapa (iii) idéntica a la etapa (ii), repitiéndose esta etapa (ii) de modo idéntico a lo largo de la duración de la elaboración de las mezclas de los constituyentes,

40 estando el procedimiento **caracterizado por que** la matriz B de la etapa (ii) se corrige mediante el menos una operación de corrección complementaria que introduce al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad sobre el menos una de las propiedades de los constituyentes.

45 2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por que** para corregir la matriz \hat{B} , el valor inicial de \hat{B} , es decir B_0 , se modifica reemplazando la ecuación (1) por una ecuación que corresponde a una nueva ley de adaptación y/o por la adición de un término complementario δ .

50 3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica reemplazando la ecuación (1) inicial por una ecuación que comprende la adición de una función complementaria a la ecuación (1) según:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j Hu (y_j - y_j^{med}) + \lambda f(\hat{B}_j^t), \quad (1.1)$$

55 siendo j el índice de las propiedades de la mezcla que varía de 1 a m en la que

- f es una función no nula, elegida según un perfil que permite introducir al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad,
- λ es un coeficiente de ponderación que permite ajustar la rapidez de retorno de las propiedades estimadas de

los constituyentes en un campo admisible definido por unas limitaciones, y

- H es la matriz diagonal con el fin de asegurar las propiedades de convergencia del procedimiento.

5 4. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica reemplazando la ecuación inicial (1) por una ecuación que corresponde a la ley de adaptación según la siguiente ecuación:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j H \frac{1}{\delta t} \int_{t-\delta t}^t U(\hat{B}_j U - y_j^{med}) ds \quad (1.2)$$

siendo j el índice de las propiedades de la mezcla que varía de 1 a m en la que δt es la ventana de integración temporal y s la variable temporal bajo la integral.

10

5. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica reemplazando la ecuación inicial (1) por una ecuación que corresponde a la ley de adaptación según la siguiente ecuación:

$$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\frac{\beta_j}{\delta t} H \int_{t-\Delta-\frac{\delta t}{2}}^{t-\Delta+\frac{\delta t}{2}} u(s) (\hat{B}_j u(s) - y_j^{med}) ds \quad (1.3)$$

15 6. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica reemplazando la ecuación inicial (1) por una ecuación que corresponde a la ley de adaptación según la siguiente ecuación: siendo j el índice de las propiedades de la mezcla que varía de 1 a m en la que δt es la ventana de integración temporal y Δ el retardo de la medición y s la variable temporal bajo la integral.

20 7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica añadiendo un término complementario δ a al menos una de las ecuaciones (1), (1.1), (1.2) o (1.3) y que corresponde al siguiente cálculo:

$$\hat{B}_{completa_j} = (\hat{B}_j + \delta^h) \quad (1.4)$$

25 8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** la matriz \hat{B} se modifica añadiendo un término complementario δ a al menos una de las ecuaciones (1), (1.1), (1.2) o (1.3) y que corresponde al siguiente cálculo: en la que el vector δ cumple la ecuación $\delta^t * u = 0$, con el fin de que las predicciones permanezcan inalteradas (predicción uniforme) en virtud de la ecuación:

$$y = \hat{B}_j * u = (\hat{B}_j + \delta^h) * u \quad (1.5)$$

30 9. Procedimiento según la reivindicación 6, **caracterizado por que** el vector δ se define o bien mediante un cálculo algebraico directo o bien mediante optimización secuencial bajo restricción.

35 10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que las propiedades y^{med} de la mezcla, medidas durante la etapa (ii), se miden mediante un proceso de medición continuo sobre la mezcla elaborada.

40 11. Procedimiento de control según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, **caracterizado por que** cuando hay al menos una premezcla de al menos dos de los constituyentes antes de la preparación de la mezcla, se modifica la variable u determinada durante la operación (3) de la etapa (ii) para tener en cuenta los retardos debidos a los volúmenes muertos presentes en la instalación en las zonas de premezcla.

45 12. Procedimiento de control según la reivindicación 9, **caracterizado por que** en la corrección de la matriz \hat{B} durante la etapa (ii), la variable u utilizada para la implementación de la ley de adaptación según una de las ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3) y (1.4) se reemplaza por una variable U en la que $U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))^t$, en el tiempo t, vector formulación que tiene en cuenta los volúmenes muertos.

50 13. Procedimiento de control según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado por que** la formulación u determinada al final de la etapa (ii) se obtiene mediante un procedimiento de optimización que comprende etapas secuenciales durante las cuales se busca la solución de un problema mínimo que respete un mínimo de restricciones prioritarias si no es factible un problema completo que respete todas las restricciones, aumentando en cada etapa el número de restricciones prioritarias a respetar, hasta obtener una formulación u que respete el máximo de restricciones prioritarias.

55 14. Procedimiento de control según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, destinado a una instalación de preparación de una mezcla de n constituyentes y de aditivos, **caracterizado por que**, para una propiedad j de la

mezcla sobre la que influye el aditivo, el modelo de control tiene en cuenta el efecto d de la adición del aditivo durante las operaciones (2) y (3) de la etapa (ii) según: $y = \hat{B}_j u + d$.

- 5 13. Dispositivo de elaboración y de control de una mezcla de constituyentes, que comprende vías de transporte (4, 5, 6) de los constituyentes (1, 2, 3) a mezclar hacia una vía principal (7) unida al emplazamiento (9) de recepción de la mezcla, medios (10) para controlar los caudales de los constituyentes en cada vía de transporte, medios (11) de medida continua en la vía principal de los parámetros representativos de la mezcla durante la elaboración, y medios de cálculo (12) de las proporciones de los diferentes constituyentes que entran en la mezcla, un estimador (13) unido a los medios de cálculo, comprendiendo el estimador medios programados para producir una estimación de las propiedades de los constituyentes utilizando las medidas de las propiedades de la mezcla medidas por los medios de medición (11), comprendiendo los medios de cálculo medios programados para calcular por medio de esta estimación las proporciones de los diferentes constituyentes que entran en la mezcla con el fin de obtener una mezcla que comprenda unas propiedades predeterminadas, estando este dispositivo **caracterizado por que** el estimador (13) comprende medios programados para introducir al menos una restricción correspondiente a restricciones de límites, de relación de orden y/o de igualdad, sobre al menos una de las propiedades de los constituyentes, para corregir la matriz \hat{B} de la etapa (ii) del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
- 10
- 15
- 20 14. Dispositivo según la reivindicación 13, **caracterizado por que** el estimador (13) comprende medios de sincronización programados para tener en cuenta los retardos debidos a los volúmenes muertos en las zonas de premezcla, estando programados dichos medios de sincronización para implementar la ecuación (2)
- $$\frac{d\hat{B}_j^t}{dt} = -\beta_j HU(t) (y_j(t) - y_j^{med}(t))$$
- siendo $U(t) = (U_1(t), \dots, U_n(t))^t$, de la operación (3) de la etapa (ii) de dicho procedimiento.
- 25 15. Dispositivo según la reivindicación 13 o 14, **caracterizado por que** comprende un optimizador (14) unido a medios de cálculo (12) y a un medio de almacenamiento (15) de objetivos de mezcla, comprendiendo el optimizador medios programados para optimizar la formulación u de las proporciones de los constituyentes, determinada por los medios de cálculo (12) en función de objetivos de mezcla almacenados en dicho medio de almacenamiento (15).
- 30 16. Dispositivo según la reivindicación 15, **caracterizado por que** comprende al menos una cubeta (16) de aditivo unida mediante una vía de transporte (17) a la vía principal (7), aguas abajo de la zona de mezcla de los constituyentes (1, 2, 3), un medio de control (10) del caudal de aditivo asociado a la cubeta (16) previsto sobre la vía de transporte (17), y un controlador de inyección de aditivo (18) unido a dicho medio de control (10), al optimizador (14) y al medio de almacenamiento de objetivos de mezcla (15), siendo adecuado el controlador de inyección de aditivo (18), para una propiedad j de la mezcla sobre la que influye un aditivo, para optimizar la proporción del aditivo con el fin de regular dicha propiedad j correspondiente de la mezcla, teniendo en cuenta un objetivo proporcionado por el medio de almacenamiento de objetivos de mezcla.
- 35

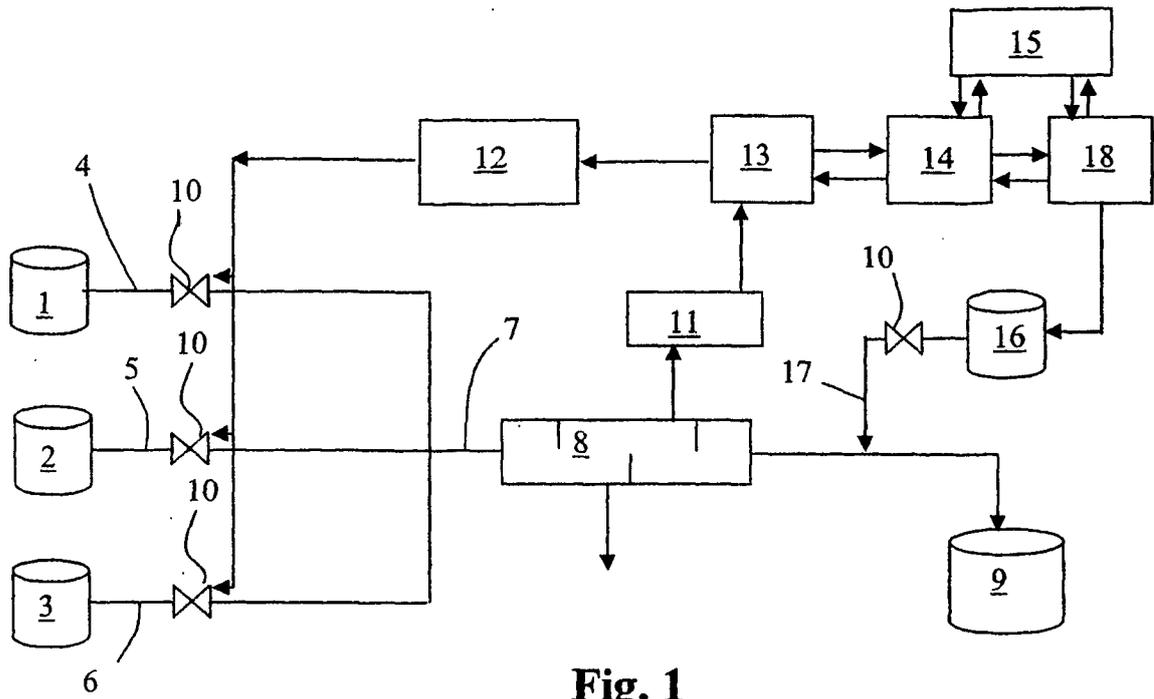


Fig. 1

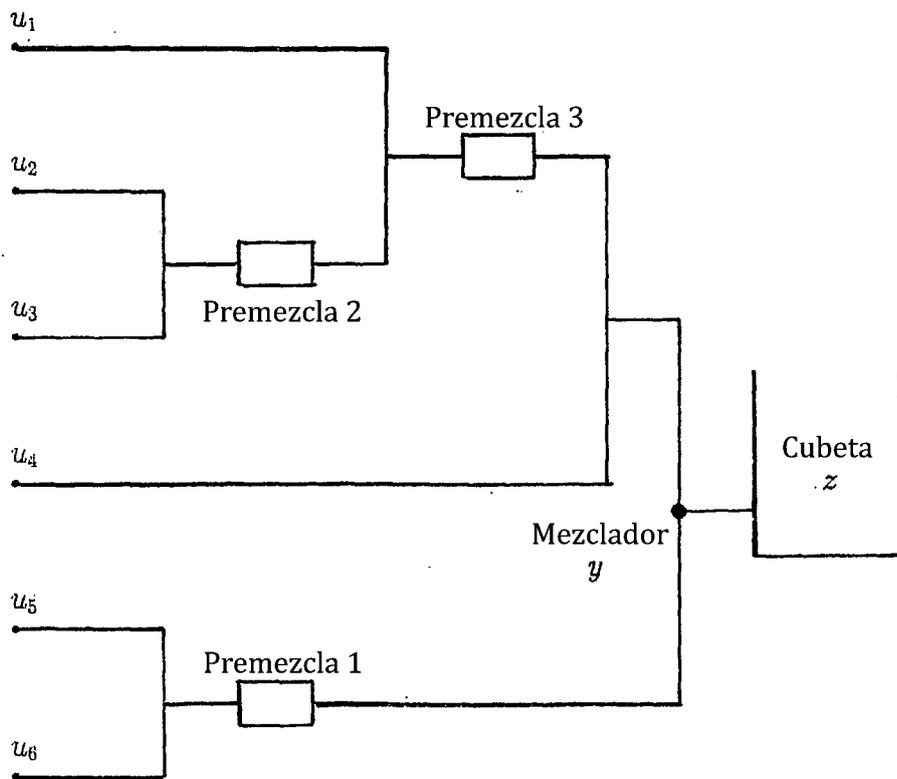


Fig. 2

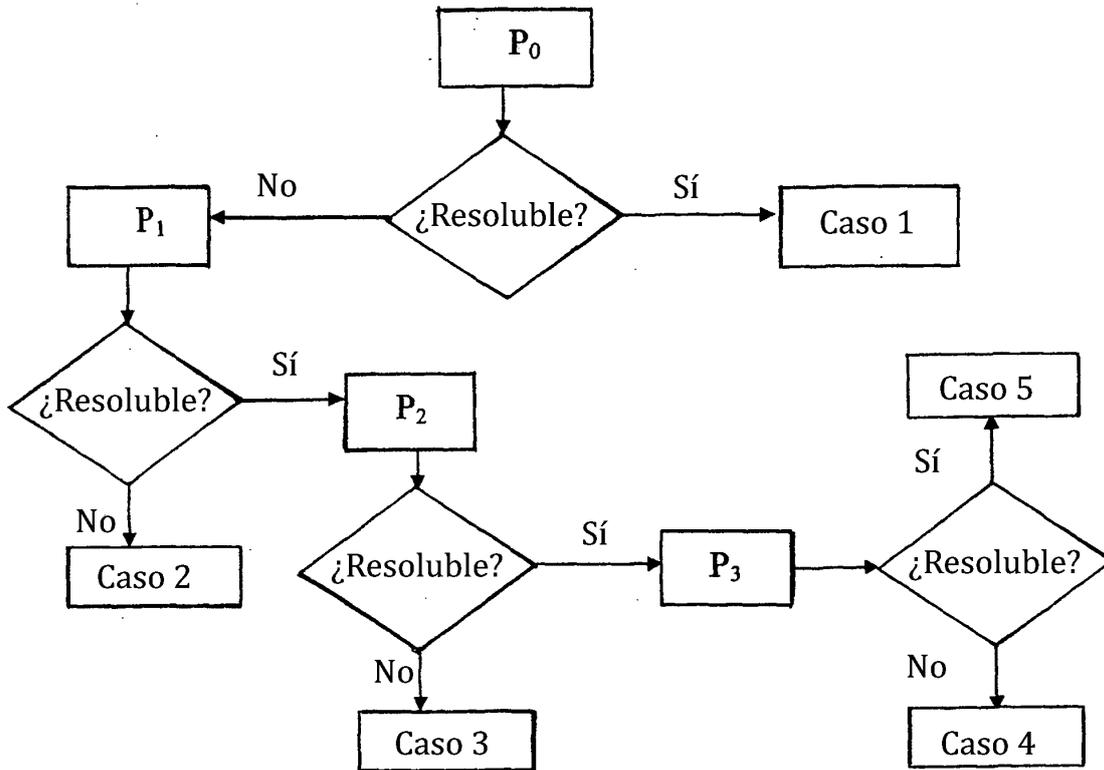


Fig. 3

fig. 4

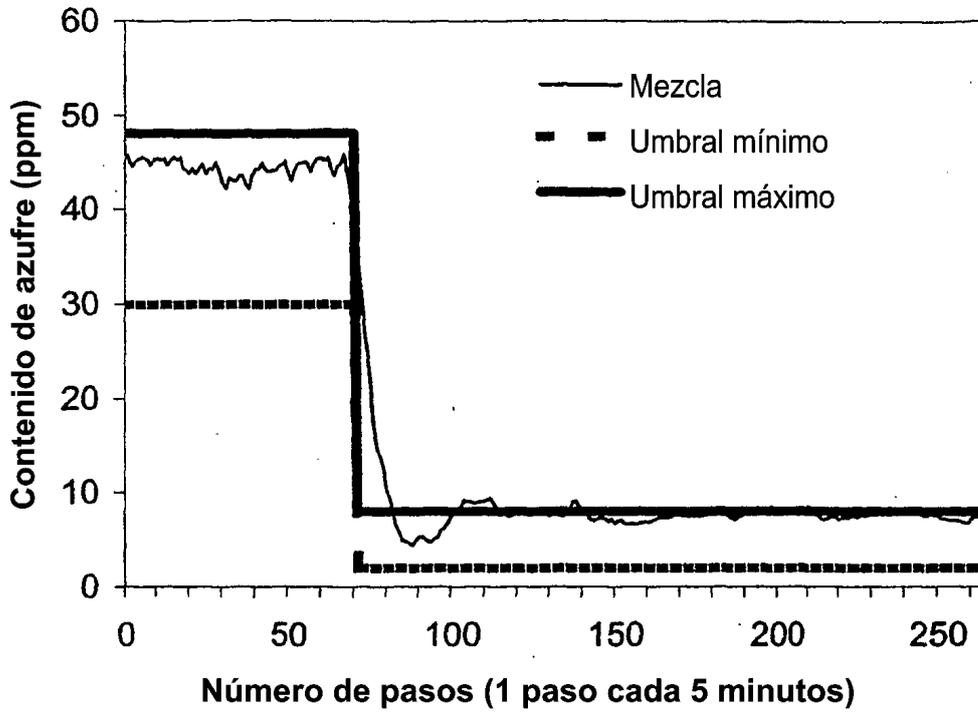


fig. 5

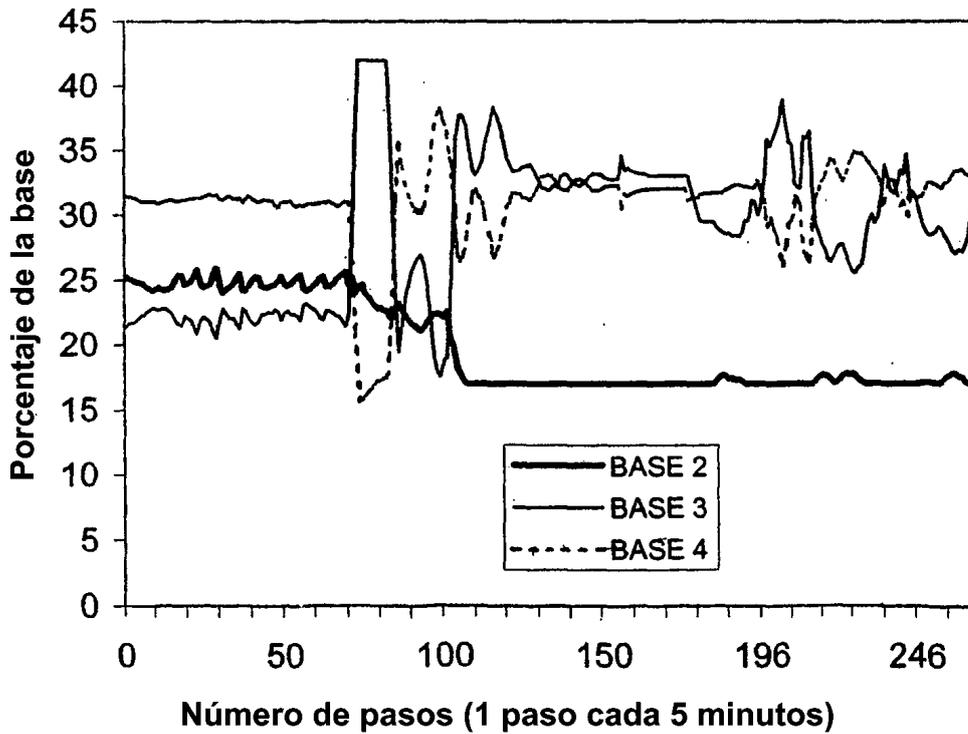


fig. 6a

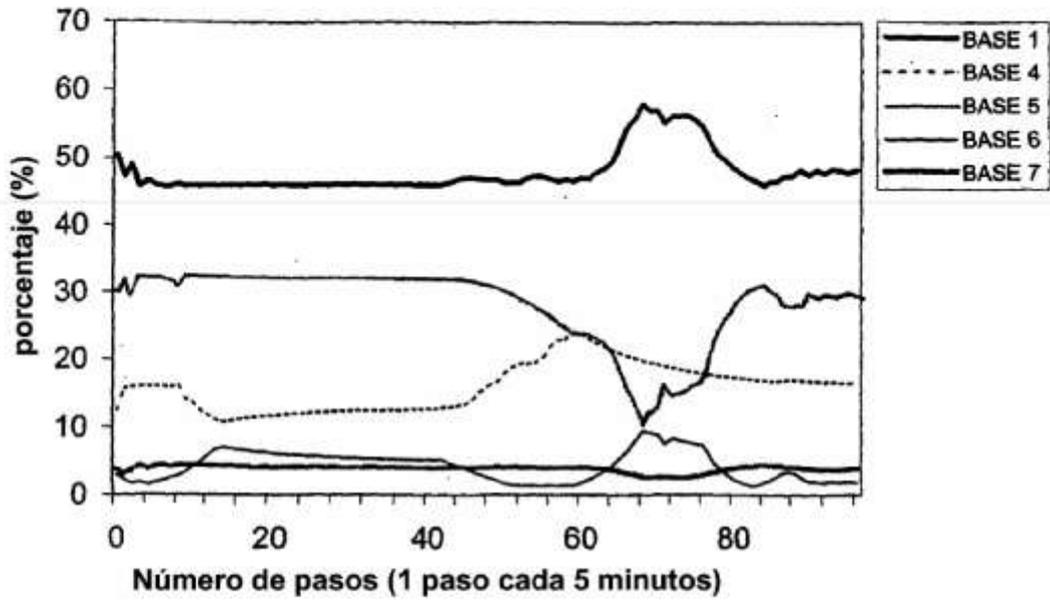


fig. 6b

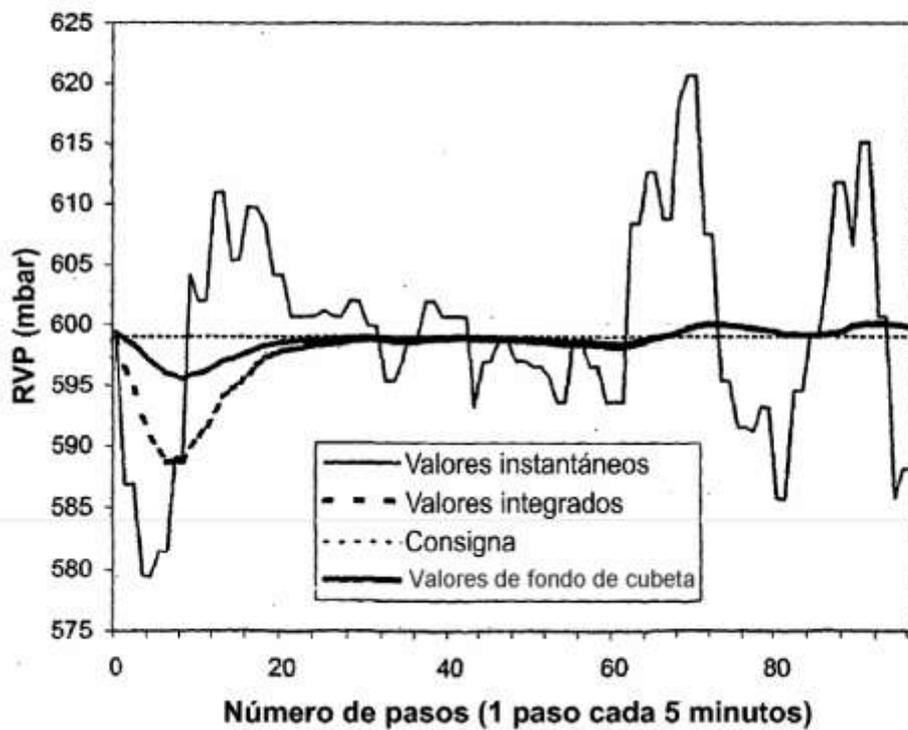


fig. 6c

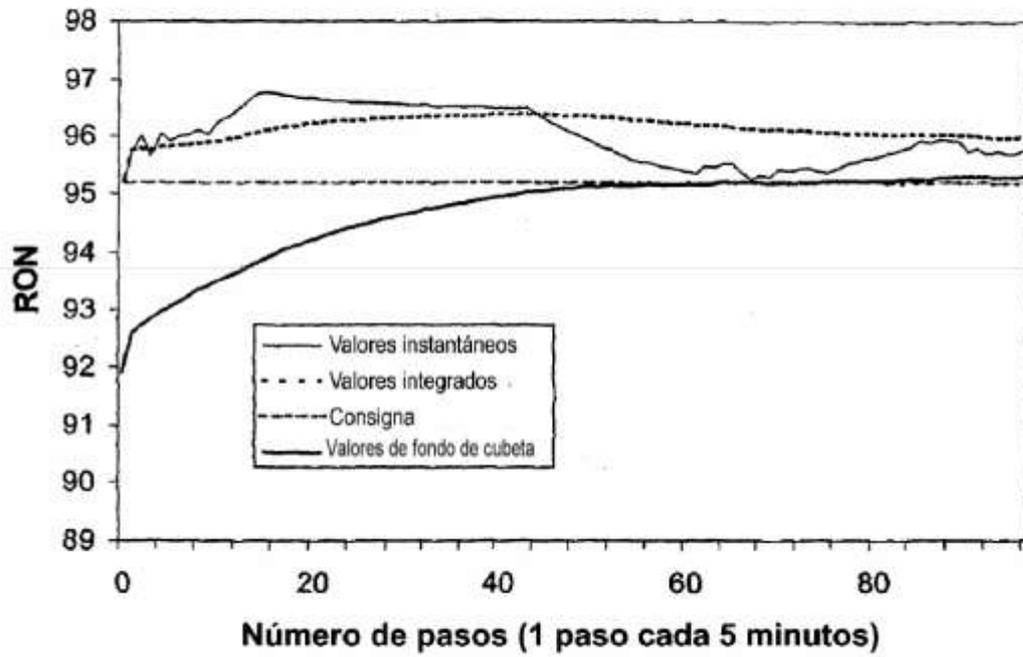
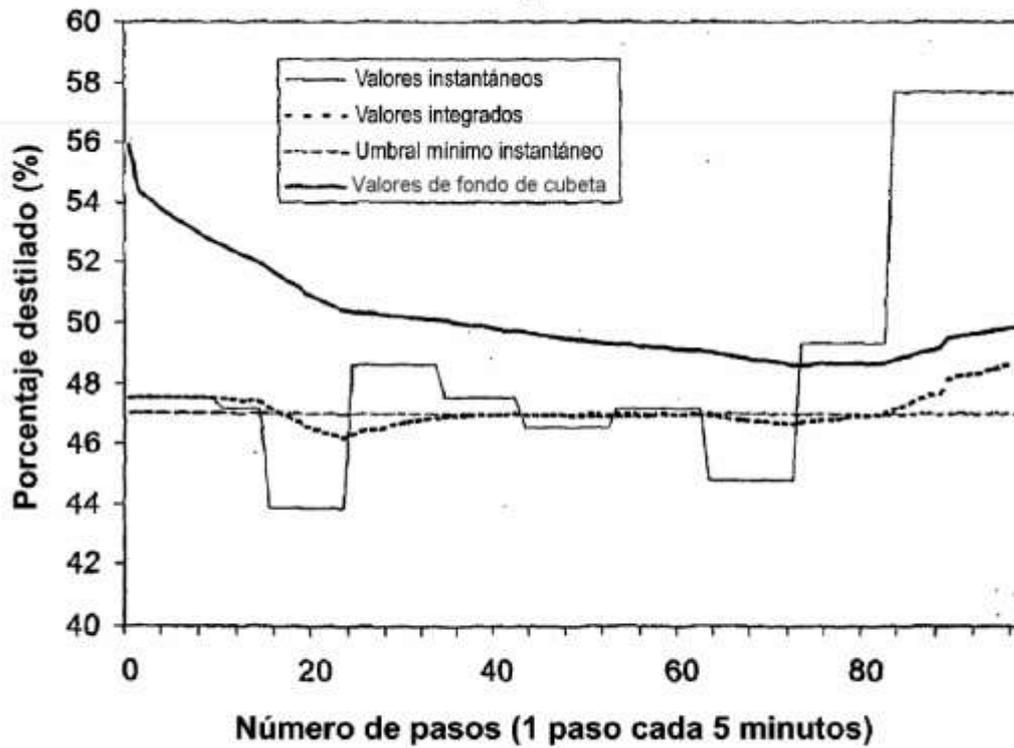


fig. 6d



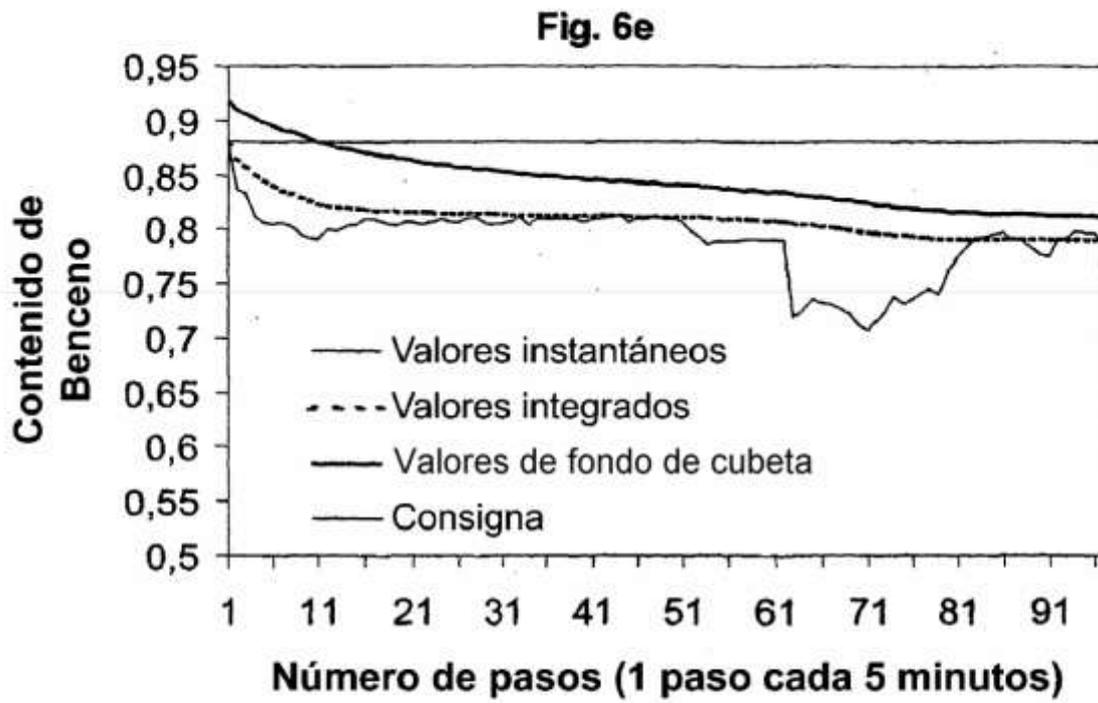


Fig. 7a

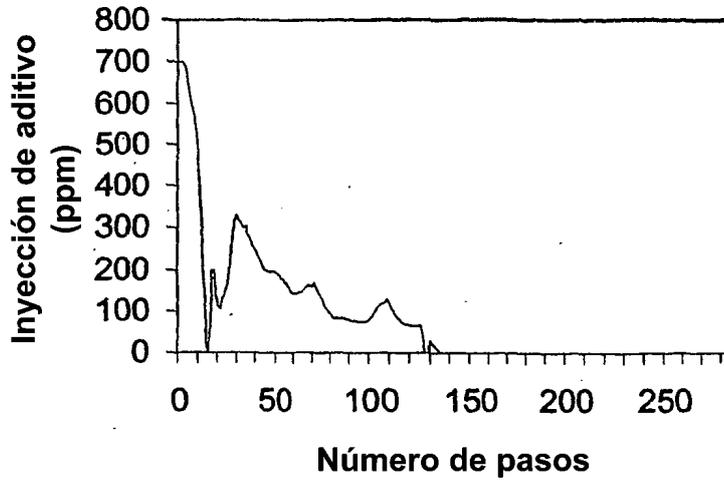


Fig 7b

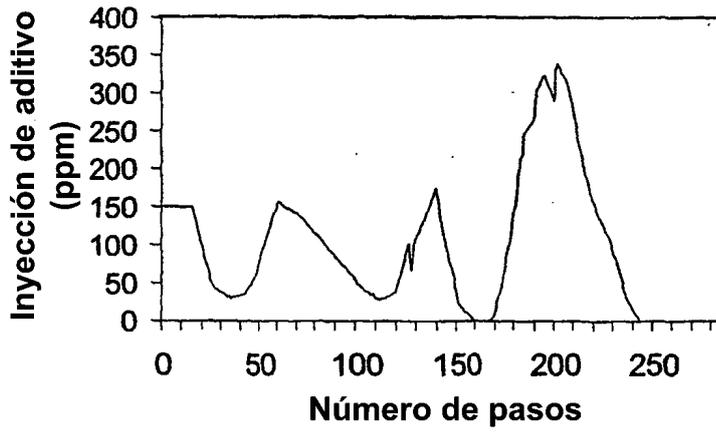


Fig 7c

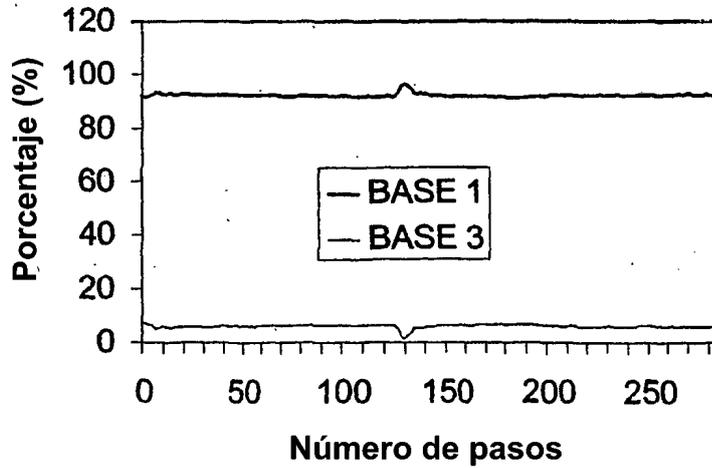


Fig 7d

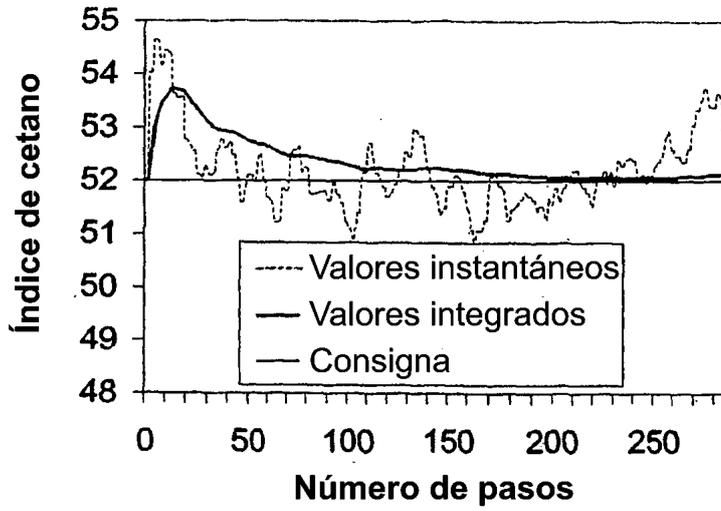


Fig 7e

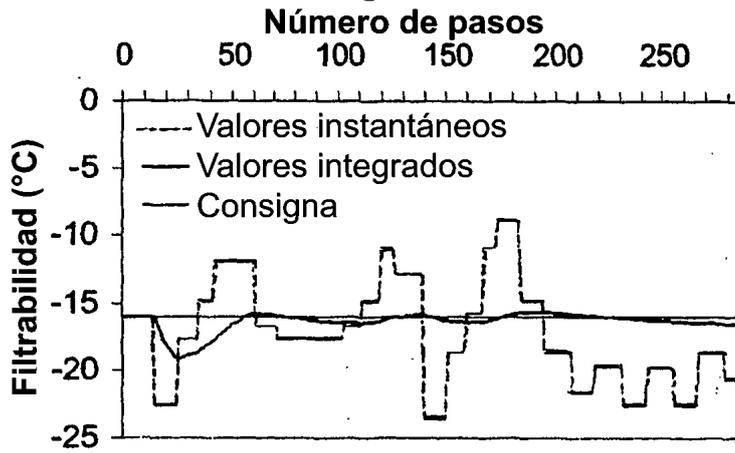
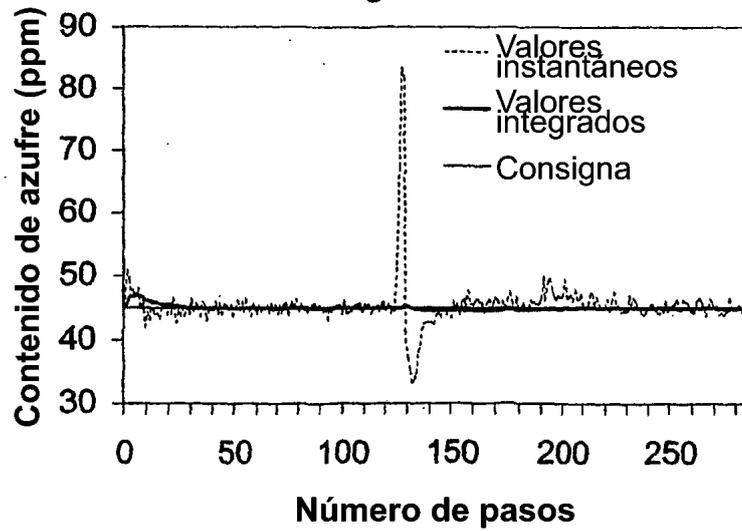


Fig. 7f



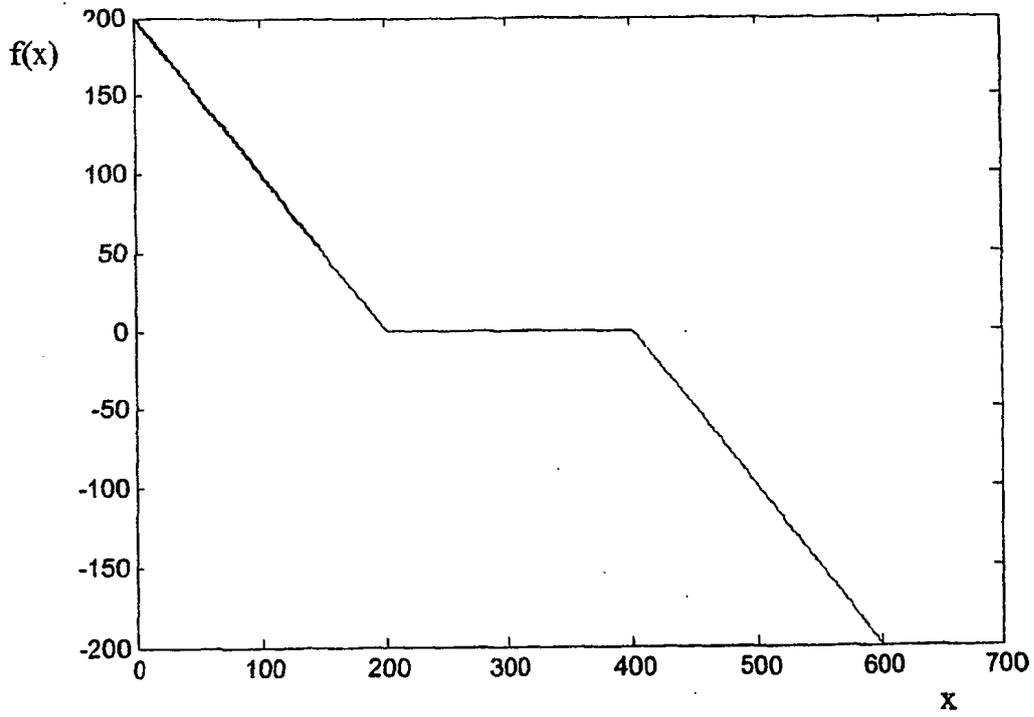


Figura 8

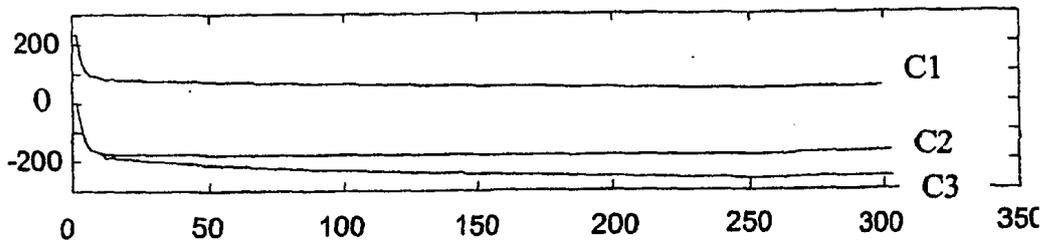


Figura 9

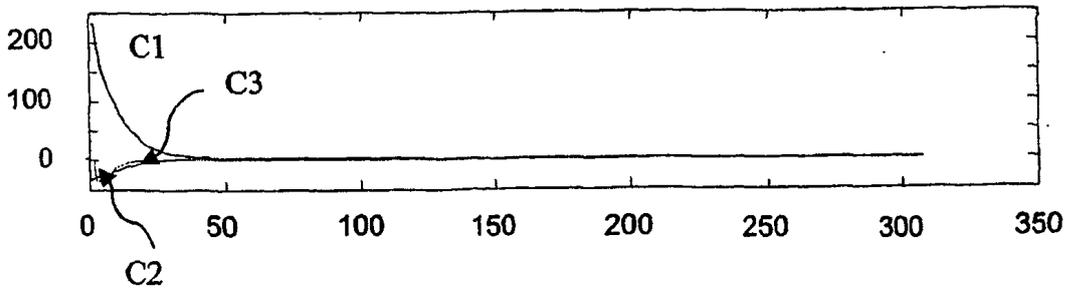


Figura 10

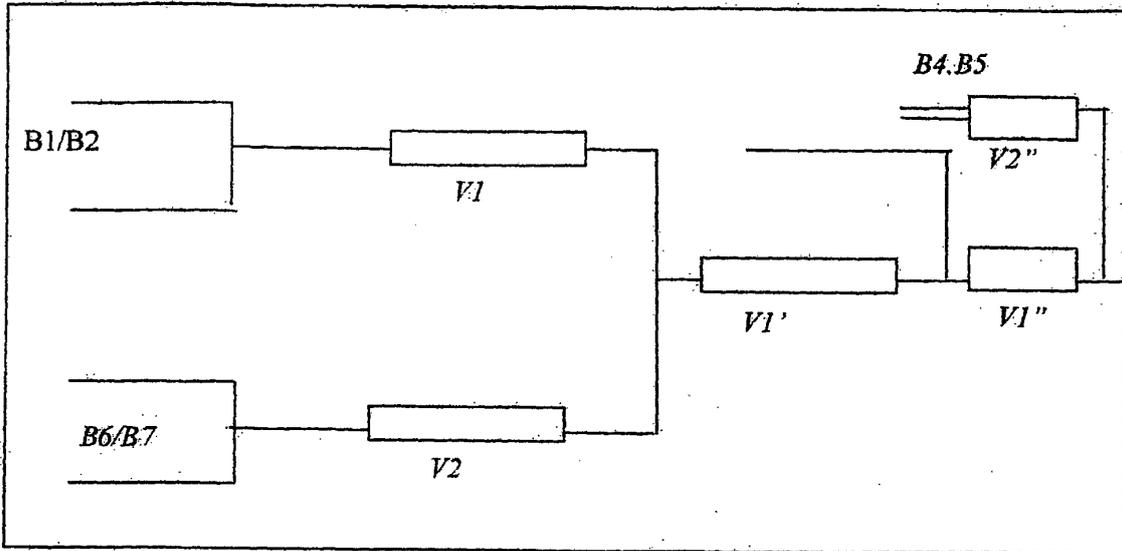


Figura 11

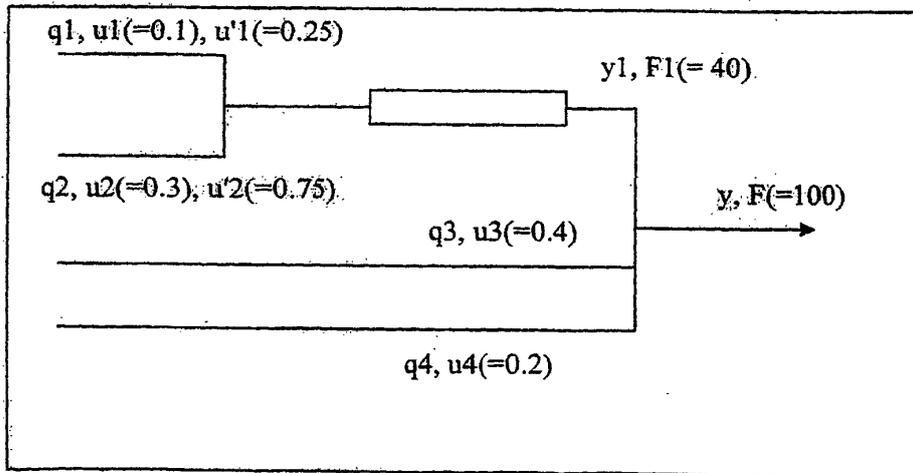


Figura 12