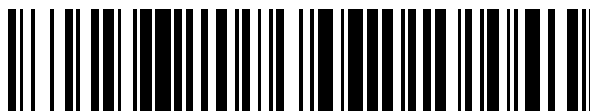


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 565 819**

51 Int. Cl.:

C02F 1/52 (2006.01)

C02F 1/56 (2006.01)

G05D 11/13 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.08.2004 E 04767015 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.01.2016 EP 1658534**

54 Título: **Método y configuración de dispositivo para el control automático de la dosificación de productos químicos**

30 Prioridad:

29.08.2003 FI 20031220

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

07.04.2016

73 Titular/es:

**KEMIRA OYJ (100.0%)
PORKKALANKATU 3
00180 HELSINKI, FI**

72 Inventor/es:

**PIIRONEN, EILA;
JUUSO, ESKO;
JOENSUU, IIRIS y
SORSA, AKI**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 565 819 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y configuración de dispositivo para el control automático de la dosificación de productos químicos

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método para el control automático de la dosificación de productos químicos en un sistema de tratamiento de líquidos, particularmente para el control automático de la dosificación de productos químicos para el tratamiento del agua, aguas residuales y aguas industriales.

10 La presente invención se refiere también a una configuración de dispositivo para el control automático de la dosificación de productos químicos en un sistema de tratamiento de líquidos.

15 **Antecedentes de la invención**

Varios fenómenos a corto y largo plazo que aparecen en procesos de tratamiento de líquidos afectan a la dosificación de productos químicos para el tratamiento de líquidos. Frecuentemente hay grandes variaciones en la cantidad de líquido que se va a tratar. Por ejemplo, el consumo de agua industrial o de agua corriente y la cantidad de agua residual varían mucho dependiendo de la capacidad de la planta, horario, estación, clima, etc. La calidad del agua de entrada, por ejemplo, turbidez, sólidos en suspensión, pH, fósforo, temperatura, varían también rápidamente algunas veces.

20 Actualmente, los productos químicos se dosifican a menudo sobre la base del caudal de entrada en las plantas de tratamiento de líquidos. Esto no garantiza la eficacia del tratamiento, si la calidad del líquido cambia mucho. Esto conduce fácilmente a dosificar en exceso o por defecto los productos líquidos dependiendo de la calidad del líquido. Muchos fenómenos complejos, tales como la coagulación y la floculación tienen lugar en el tratamiento de líquidos. El efecto de los productos químicos sobre el resultado del tratamiento no es lineal.

30 La dosificación mediante alimentación directa sobre la base del caudal de entrada no garantiza resultados de tratamiento suficientes debido a que la calidad del líquido está cambiando. El control de la retroalimentación con un controlador PID (proporcional, integral y derivado) proporciona una mejora si las fluctuaciones son bastante pequeñas. Las variaciones en las condiciones de funcionamiento requieren la adaptación de los controladores. Se puede llevar a cabo una adaptación gradual de los parámetros PID con una mejor programación, pero está limitado a una estructura de control fija. Se puede realizar una estructura de control flexible mediante estrategias de conmutación. Sin embargo, tanto la mejora en la programación como las estrategias de conmutación requieren una lógica compleja para su adaptación a sistemas multivariados. Análogamente también es difícil conseguir un funcionamiento suave y fiable. Los parámetros PID pueden también ajustarse en línea, por ejemplo, mediante controladores PID autoajustables.

40 Se describe un ejemplo de control PID autoajutable diseñado de forma adaptativa en el documento WO 0198845 y se puede caracterizar mediante valores paramétricos derivados de la interpolación de los parámetros de modelización del proceso. Los parámetros caracterizan cada uno de los modelos. Se selecciona un valor del parámetro entre un conjunto de valores de inicialización predeterminados. Para cada valor de parámetro denominado, se calcula lo que se denomina el valor Norm acumulado (que se deriva de un error cuadrático del modelo calculado para los modelos) a medida que se llevan a cabo evaluaciones repetidas de los modelos. Para cada parámetro, se calcula también un valor paramétrico adaptativo (un promedio ponderado de los valores de inicialización). El conjunto de valores paramétricos adaptativos de proceso se usa a continuación para rediseñar un controlador de proceso. El controlador parametrizado se aplica al control PID adaptativo de alimentación directa/retroalimentación.

50 Los controladores PID autoajustables son eficaces para adaptarse solamente a cambios lentos en las condiciones de funcionamiento, y dicho mecanismo de adaptación es bastante lento. Las perturbaciones durante la adaptación pueden producir graves problemas. Las limitaciones se vuelven más importantes en sistemas multivariados.

55 El control difuso adaptativo es menos sensible a las perturbaciones que el controlador PID autoajutable. Se describe un ejemplo de sistema de control de lógica difusa multirregional en el documento US 6041320. El sistema utiliza una variable auxiliar del proceso para determinar en cuáles de las diversas regiones de diferente ganancia está funcionando un proceso no lineal. El área de funcionamiento de un proceso se divide por adelantado en diferentes regiones. Cada región tiene su propio controlador, que se implementa mediante un conjunto lineal de funciones y reglas de pertenencia. Las variables auxiliares de cada una de las reglas se utilizan en la selección de la región adecuada. La solución se convierte en poco práctica con un número creciente de regiones y variables de proceso auxiliares ya que cada región tiene su propio controlador. Esto conduce a un gran número de parámetros y a dificultades para generalizar el sistema de control a nuevas aplicaciones.

65 Todas estas metodologías conducen a estructuras de control extremadamente complicadas que contienen múltiples parámetros interactivos y dependientes que son difíciles de manipular. La lógica de la adaptación se vuelve

complicada a medida que aumenta el número de parámetros manipulables. En determinadas condiciones de proceso, el funcionamiento de diferentes controladores puede presentarse con superficies de control bastante similares. Sin embargo, es esencial la forma en que se lleva a cabo el mecanismo de adaptación. Es necesaria una estructura adaptativa compacta en condiciones de funcionamiento cambiantes y la implementación de controladores en nuevos procesos. Los presentes inventores han publicado una conferencia que se refiere al estado general de la técnica (Esko Juuso, Katja Virret y Marjatta Piironen "Intelligent methods in dosing control of water treatment", en: Proceedings of Workshop on Applications in Chemical and Biochemical Industry, ERUDIT, 15 de septiembre de 1999). El artículo describe un experimento de modelización preliminar para el tratamiento del agua mediante un método de ecuación lingüística (EL) pero no el control basado en la EL para el tratamiento del agua. En el artículo se menciona que el controlador EL puede ser adaptativo, análogamente a cualquier otro controlador.

La presente invención se basa en un nuevo enfoque, donde el control de la dosificación se basa en un sistema de control compacto con características adaptativas y no lineales. Una adaptación suave y veloz a las variaciones rápidas aumenta el rendimiento del control de la dosificación. Los controladores EL adaptativos puede funcionar en un amplio intervalo de condiciones de proceso ya que la adaptación se basa en la detección por adelantado del estado del proceso. Los enfoques adaptativos predefinidos resueltos por el método inventivo para el control de la dosificación no requieren la identificación laboriosa de modelos o parámetros. Un conjunto de parámetros compacto es también beneficioso para el ajuste de los controladores EL. En la presente invención, el número de parámetros es pequeño en comparación con los actuales controles adaptativos conocidos en la materia, y todos los parámetros son comprensibles proporcionando una visión del funcionamiento del proceso.

Sumario de la invención

La presente invención proporciona un método y un dispositivo o una configuración de dispositivo para el control de la dosificación de productos químicos. Esto se lleva a cabo utilizando las propiedades del líquido para modificar la superficie de control de un controlador de ecuación lingüística (EL) de forma adaptativa por medio de un modelo de adaptación predefinido, por ejemplo, un modelo desarrollado antes del uso del control, para controlar la dosificación de uno o más productos químicos al líquido mediante uno o más de dichos controladores. El controlador de ecuación lingüística (EL) manipula siempre condiciones de funcionamiento no lineales. Las características no lineales se modifican con transformaciones no lineales. La adaptación amplía adicionalmente el intervalo de funcionamiento de los controladores sin cambiar la estructura de control que comprende controladores EL y modelos de adaptación. Por tanto, los controladores EL adaptativos pueden funcionar en intervalos amplios de condiciones de proceso.

Es una característica de la invención que se reivindica en las reivindicaciones independientes. Algunas de las realizaciones preferidas se reivindican en las reivindicaciones dependientes.

Es un objeto de la presente invención proporcionar un nuevo método para el control de la dosificación de productos químicos.

Es otro objeto de la presente invención proporcionar un nuevo dispositivo y una configuración de dispositivo para el control de la dosificación de productos químicos.

Es otro objeto más de la presente invención proporcionar un nuevo método para el control de la dosificación de productos químicos en situaciones donde el entorno, tal como la calidad o el caudal del líquido, está cambiando rápidamente.

Es otro objeto más de la presente invención proporcionar un nuevo método para controlar la dosificación de productos químicos en el tratamiento del agua.

En la presente invención, la cantidad de uno o más productos químicos se vigila y controla con controladores multivariables adaptativos no lineales sobre la base de medidas realizadas el sistema de tratamiento de líquidos. Preferentemente, el sistema de tratamiento de líquidos se refiere a aplicaciones de tratamiento de agua o de aguas residuales. Los controladores básicos, que son preferentemente controladores de alimentación directa y/o de retroalimentación, se pueden combinar en diferentes estrategias de control. Por ejemplo, el controlador de alimentación directa predice los cambios en el proceso y puede optimizar el consumo de productos químicos. Se puede llevar a cabo el ajuste fino de la dosificación de productos químicos mediante el controlador de retroalimentación. Los controladores funcionan adaptativamente en amplios intervalos de las condiciones de proceso. El cambio de un área de funcionamiento a otra se lleva a cabo mediante el modelo de adaptación. La selección del sistema de control adecuado depende de los requisitos del proceso: un único controlador de retroalimentación o de alimentación directa puede ser suficiente; en el otro extremo, se puede incluir un controlador de cascada para adaptar el punto de consigna a condiciones de funcionamiento especiales. Preferentemente, cada tarea de control puede realizarse como un único controlador que comprende un controlador EL y un modelo de adaptación.

Las medidas pueden ser medidas directas o indirectas en tiempo real o fuera de línea. Se obtienen medidas directas mediante instrumentos en línea, que miden propiedades tales como la turbidez, sólidos en suspensión,

conductividad, demanda catiónica, etc. Las medidas indirectas (denominadas también sensores blandos) se calculan a partir de medidas en línea y/o fuera de línea mediante, por ejemplo, el modelo EL o el modelo de regresión. Las medidas indirectas pueden sustituir instrumentos caros o inexistentes en línea midiendo las propiedades del líquido. Estas medidas pueden utilizarse en modo predictivo indicando el cambio del área de funcionamiento.

5 En una realización, la configuración del dispositivo para el control de la dosificación automática de productos químicos en el tratamiento de líquidos comprende uno o más modelos y controladores de adaptación, y se usa un índice que describe las propiedades del líquido para modificar la superficie de control de un controlador de ecuación lingüística (EL), y la adaptación se define con un modelo de ecuación lingüística, para controlar la dosificación de
10 productos químicos mediante uno o más controladores.

En otra realización, la configuración del dispositivo para el control de la dosificación automática de productos químicos para el tratamiento de líquidos comprende también un analizador inteligente para vigilar el proceso. El analizador inteligente es un módulo de software o dispositivo implementado que representa la medida de las rutinas de gestión.
15

En otra realización, el sistema comprende también medios registradores de datos y medios de conexión con la red de datos (por ejemplo, internet o LAN) para seguimiento de los controladores, vigilancia, control y optimización del proceso, y la actualización de los programas o medios para conectar con la red telefónica. En otra realización
20 adicional, el sistema se configura para enviar un mensaje de alarma a un sistema remoto, por ejemplo, a un teléfono móvil, correo electrónico, terminal remoto o cualquier otro sistema adecuado, cuando sea necesario, por ejemplo, si aparece un problema o para la solución de problemas. En otra realización adicional, el sistema de adaptación se basa en un funcionamiento remoto, llevado a cabo, por ejemplo, utilizando una red de datos. Los parámetros de los modelos y controladores de adaptación se pueden evaluar y actualizarse cuando sea necesario en un ordenador
25 remoto. Los parámetros nuevos se envían mediante la red de datos a un sistema controlador que comprende por ejemplo una comprobación rutinaria para evaluar la exactitud de los parámetros.

El método de acuerdo con la invención también se puede usar para el control de la dosificación de productos químicos en aplicaciones de retención, control de depósitos, y prevención de espumas. La retención se refiere a la
30 eficacia con la cual pequeñas partículas (o aditivos) permanecen en el papel durante su formación en lugar de permanecer en el agua blanca. Los depósitos se refieren a la acumulación de material, que procede del agua o de las partículas en suspensión, sobre superficies humedecidas en un sistema de máquina de papel o sobre cartoncillo. El método optimiza la eficacia del tratamiento químico y la cantidad de productos químicos. Además, los residuos se minimizan en las aplicaciones. Como resultado, disminuyen los costes del proceso.
35

El objetivo de la propia eficacia del tratamiento químico depende de los requisitos del proceso. El tratamiento puede afectar además a la productividad de los procesos y a la calidad del producto. La dosis en exceso de productos químicos puede producir un producto inaceptable en el proceso. El objetivo es añadir la cantidad de producto o
40 productos químicos que sean necesarios para optimizar el proceso y evitar problemas.

Los productos químicos que se van a usar en el método de la presente invención pueden ser cualesquiera productos químicos adecuados para el proceso de tratamiento de líquidos utilizado. Algunos ejemplos de dichos productos químicos son, pero no de forma limitativa, coagulantes, floculantes, oxidantes, reductores, adsorbentes, agentes
45 dispersantes, antiespumantes y biocidas.

A continuación, se describirá la invención en detalle. La descripción se referirá a los siguientes dibujos.

Breve descripción de los dibujos

50 La Figura 1 muestra un dibujo esquemático de un indicador de la calidad del agua para el caso de ejemplo.

La Figura 2 es una gráfica que representa el índice de pureza y la demanda catiónica escalada.

La Figura 3 muestra un dibujo esquemático de un controlador de retroalimentación donde los coeficientes C1-C3 son parámetros de ajuste. VR significa valores reales y EL significa niveles lingüísticos en el intervalo de [-2, 2].
55

La Figura 4 muestra un dibujo esquemático de un controlador de retroalimentación adaptativo basado en la calidad del agua de entrada de acuerdo con el sensor blando en una aplicación de tratamiento de aguas.

60 La Figura 5 muestra un dibujo esquemático de un modelo adaptativo genérico.

La Figura 6 muestra un dibujo esquemático de un controlador de alimentación directa genérico.

La Figura 7 muestra un dibujo esquemático de un controlador de alimentación directa basado en la calidad del agua de entrada en una aplicación de tratamiento de aguas.
65

- La Figura 8 muestra un dibujo esquemático del simulador dinámico desarrollado para la unidad de purificación de agua.
- 5 La Figura 9a es una gráfica que representa la fluctuación de la calidad del agua durante en el ensayo de la planta el 17 de febrero de 2003 en el que la alimentación de agua de entrada es constante.
- La Figura 9b es una gráfica que representa el rendimiento del nuevo controlador EL en la planta objeto de ensayo el 17 de febrero de 2003.
- 10 La Figura 9c es una gráfica que representa las turbideces simuladas y medidas con los datos del ensayo del 17 de febrero de 2003.
- La Figura 10a es una gráfica que representa la situación cuando la calidad del agua va empeorando y la alimentación del agua de entrada es constante.
- 15 La Figura 10b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de un controlador de retroalimentación comercial actual en la planta.
- La Figura 10c es una gráfica que representa las turbideces simuladas y medidas con los datos del ensayo del 10 de marzo de 2003.
- 20 La Figura 10d es una gráfica que representa el rendimiento simulado del nuevo controlador de retroalimentación EL en la fecha del 10 de marzo de 2003.
- 25 La Figura 11a es una gráfica que representa la situación cuando la calidad del agua mejora y la alimentación del agua de entrada es constante durante el ensayo de fecha 21-22 de mayo de 2003.
- La Figura 11b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de controladores de alimentación directa y de retroalimentación en fecha 21-22 de mayo de 2003.
- 30 La Figura 11c es una gráfica que representa las turbideces medidas y simuladas en la fecha del 21-22 de mayo de 2003.
- 35 La Figura 11d es una gráfica que representa el rendimiento simulado de los nuevos controladores de retroalimentación y alimentación directa EL en la fecha del 21-22 de mayo de 2003.
- La Figura 12a es una gráfica que representa la situación en que la cantidad del agua tratada se reduce a la mitad durante el ensayo de fecha 13 de marzo de 2003.
- 40 La Figura 12b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de los nuevos controladores de retroalimentación y alimentación directa EL en fecha 13 de marzo de 2003.
- 45 La Figura 12c es una gráfica que representa las turbideces medidas y simuladas en la fecha del 13 de marzo de 2003.
- La Figura 13a es una gráfica que representa la situación en que la cantidad del agua tratada se duplica y la calidad del agua es más bien constante.
- 50 La Figura 13b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de un controlador de retroalimentación comercial actual en fecha 10-11 de marzo de 2003.
- La Figura 13c es una gráfica que representa las turbideces medidas y simuladas en la fecha del 10-11 de marzo de 2003.
- 55 La Figura 13d es una gráfica que representa el rendimiento simulado del nuevo controlador de retroalimentación EL sometido a ensayo en la fecha 10-11 de marzo de 2003.
- 60 La Figura 14a es una gráfica que representa la situación en que la cantidad del agua tratada se reduce a la mitad.
- La Figura 14b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de los controladores de alimentación directa y retroalimentación comerciales actuales en fecha 4 de junio de 2003.
- 65

La Figura 14c es una gráfica que representa las turbideces medidas y simuladas en la fecha del 4 de junio de 2003.

5 La Figura 14d es una gráfica que representa el rendimiento simulado de los nuevos controladores de retroalimentación y alimentación directa EL con fecha del 4 de junio de 2003.

La Figura 15a es una gráfica que representa la calidad y la cantidad de agua de entrada en fecha 2-3 de junio de 2003.

10 La Figura 15b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento de los controladores de alimentación directa y retroalimentación comerciales actuales en fecha 2-3 de junio de 2003.

15 La Figura 16a es una gráfica que representa la calidad y la cantidad de agua de entrada en fecha 1-2 de mayo de 2003.

La Figura 16b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento del controlador de retroalimentación comercial actual en fecha 1-2 de mayo de 2003.

20 La Figura 17a es una gráfica que representa la calidad y la cantidad de agua de entrada en fecha 5-6 de febrero de 2003.

25 La Figura 17b es una gráfica que representa los resultados de un ensayo en el que se realizó una prueba del comportamiento del controlador de retroalimentación comercial actual en fecha 5-6 de mayo de 2003.

Definiciones

30 Como se usa en el presente documento la expresión, "la calidad del líquido" describe las propiedades del líquido, que pueden ser medidas físicas o químicas en línea y/o análisis en línea o valores calculados, por ejemplo, a partir de una o más medidas en línea/fuera de línea y/o el análisis del líquido, condiciones de proceso, consumo de productos químicos, resultado del tratamiento y el objetivo de la eficacia del tratamiento. Los ejemplos de tipos específicos de estos tipos de propiedades calculadas son el índice de calidad y el índice de pureza, que se explican a continuación. Las propiedades físicas o químicas pueden ser, por ejemplo, turbidez, conductividad, demanda catiónica, pH, cantidad de sólidos en suspensión, sustancias extractivas o fósforo. La calidad del líquido puede expresarse como un índice o factor, que puede estar en forma numérica o lingüística.

40 Como se usa en el presente documento, el término "índice de calidad" (IC) describe la calidad relativa del líquido que se va a tratar con productos químicos. Además, el índice de calidad describe la cantidad de producto(s) químico(s) necesario(s) para obtener el rendimiento de proceso deseado. El índice de calidad se puede utilizar en el control de alimentación directa. Además, el índice de calidad ayuda a detectar el estado del proceso.

45 Como se usa en el presente documento, el término "índice de pureza" (IP) es un tipo de índice de calidad, que describe el nivel de pureza relativo del líquido que entra en la unidad de tratamiento de líquidos. El índice de pureza describe la necesidad de productos químicos para obtener el nivel deseado de pureza en el líquido saliente. Las medidas en línea normales conocidas en la técnica tales como las medidas de los sólidos en suspensión no describen suficientemente bien el nivel de producto(s) químico(s) necesario(s). El índice de pureza se correlaciona, por ejemplo, con las concentraciones de hemicelulosas solubles y sustancias extractivas. Estas concentraciones no se pueden observar en la medida de los sólidos en suspensión en línea del líquido entrante.

50 Como se usa en el presente documento, el término "líquido" define cualquier sustancia que contiene una cantidad suficiente de fase líquida a utilizar en un método de la presente invención. El líquido puede ser, por ejemplo, un líquido o suspensión sustancialmente puro que contiene partículas inorgánicas y/o partículas orgánicas u otras sustancias, o algo entre estas dos opciones. Los ejemplos de líquidos son, pero no de forma limitativa, agua, agua residual, agua industrial, fangos o sólidos en suspensión, suspensión de pulpa o cualquier otro líquido, tal como un disolvente u otro producto químico.

60 Como se usa en el presente documento, el término "tratamiento de líquidos" significa tratamiento del líquido mediante uno o más productos químicos, que se dosifican preferentemente de forma óptima para alcanzar la eficacia requerida. Los procesos que siguen al proceso de tratamiento o la calidad del producto o las autoridades proporcionan los objetivos o los límites de la eficacia del tratamiento químico. La dosificación en exceso o la dosificación por defecto de los productos químicos se evitan mediante las acciones de control adecuadas. El tratamiento de líquidos puede incluir varias etapas de proceso, por ejemplo, coagulación, floculación, oxidación, reducción, adsorción, absorción, prevención de espumas, control de depósitos y/o separaciones.

65 La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales provocada por la adición de un reactivo químico conocido como coagulante. Las partículas finas de una suspensión chocan entre sí y quedan adheridas.

Usualmente, las partículas se atraen entre sí mediante movimientos brownianos o mediante flujo (Water Treatment Handbook, Vol 1 y Vol 2, 1991, Degremont).

5 El coagulante es un producto químico inorgánico (aniónico/catiónico) u orgánico (polielectrolito), que neutraliza la carga superficial negativa o positiva (desestabilización) de las impurezas, tales como partículas coloidales. (Water Treatment Handbook, Vol 1 y Vol 2, 1991, Degremont).

10 La floculación se refiere a la acción de polímeros en la formación de puentes entre partículas en suspensión o trabajando mediante modelos de parches, que producen fuertes aglomeraciones, relativamente irreversibles.

15 El reactivo denominado floculante o auxiliar floculante puede promover la formación del floculo. El floculante puede ser un polímero inorgánico (tal como sílice activada), un polímero natural (almidón, alginato) o polímeros sintéticos (Water Treatment Handbook, Vol 1 y Vol 2, 1991, Degremont, Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies).

20 El oxidante puede ser cualquier agente oxidante conocido en la materia. Usualmente, el oxidante es un compuesto que produce espontáneamente oxígeno, por ejemplo, tanto a temperatura ambiente como con un calentamiento suave. Se usan generalmente oxidantes en el blanqueamiento y como parte de biocidas. Son ejemplos el peróxido de hidrógeno y el ácido peracético. El adsorbente es una sustancia que tiene la capacidad de condensar o mantener moléculas o iones que proceden de una solución acuosa y permanecer en superficie. La bentonita es un ejemplo.

El agente dispersante es una sustancia tal como fosfato o acrilato que consigue que las partículas finamente divididas se separen y queden separadas entre sí respecto a las otras en la suspensión.

25 Los biocidas son aditivos químicos diseñados para inhibir el crecimiento de un microorganismo o destruir microorganismos, tales como bacterias u hongos perjudiciales formadores de limos. Los biocidas se usan generalmente en aplicaciones de control de depósitos.

30 El antiespumante (agente antiespumante) es una sustancia utilizada para reducir la espuma debida a gases, materiales nitrogenados o proteínas, que pueden interferir con el procesamiento. Los ejemplos son alcoholes grasos de cadena larga, fosfatos orgánicos, fluido de silicona, etc.

35 Como se usa en el presente documento "controlador de retroalimentación" denota cualquier controlador de retroalimentación conocido en la materia. En general, el control por retroalimentación es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y el punto de consigna (o un estado deseado que varía arbitrariamente) produciendo la señal de accionamiento de tal manera que la salida regrese al valor deseado. Un sistema de control por retroalimentación es un sistema que tiende a mantener una relación prescrita entre la salida y el valor de referencia mediante su comparación, y que usa la diferencia como medio de control. (Stephanopoulos: Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, 1984, Prentice-Hall, p. 241-248)

45 Como se usa en el presente documento, controlador "de alimentación directa" denota cualquier controlador de alimentación directa conocido en la materia. En general, el control de alimentación directa significa el control de los efectos de perturbaciones o los cambios de proceso medibles directamente que compensan aproximadamente sus impactos en el proceso de salida antes de que se materialicen. Esto es ventajoso especialmente en sistemas lentos, ya que, en un sistema de control por alimentación directa usual, la acción correctora comienza solamente después que la salida se haya visto afectada. (Stephanopoulos: Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, 1984, Prentice-Hall, p. 411-427). El controlador de alimentación directa puede optimizar también la relación del consumo de productos químicos cuando se usan dos o más productos químicos.

50 Un sistema de control, que puede ajustar sus parámetros automáticamente de tal manera que compense las variaciones en las características del proceso que controla, por ejemplo, los cambios de funcionamiento en estado estacionario deseados, se denominan adaptativos. En procesos no estacionarios, las características cambian con el tiempo. El rendimiento óptimo se mantiene ajustando parámetros sobre la base de un criterio adicional. (Stephanopoulos: Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, 1984, Prentice-Hall, p. 431-438). En los sistemas de la presente invención, la adaptación se lleva a cabo mediante el modelo de adaptación.

60 Como se usa en el presente documento, el término "modelo de adaptación" define el subsistema que modifica la superficie de control cambiando las condiciones de funcionamiento, que se definen por ejemplo mediante el índice de calidad, por ejemplo, el índice de pureza, y los requisitos del proceso, por ejemplo, el punto de consigna. Como se usa en el presente documento, el término "adaptación" incluye también procedimientos de modificación predefinidos de los parámetros del controlador, es decir, no se necesita el autoajuste en línea. La adaptación se puede llevar a cabo por ejemplo con modelos de ecuación lingüística (EL), que son especialmente ventajosos en sistemas complejos. La técnica EL puede combinar datos y conocimientos para representar interacciones no lineales entre variables en forma de un modelo que es fenológicamente comprensible. Los controladores EL adaptativos funcionan en un amplio intervalo de condiciones de proceso. La adaptación se basa en la detección del estado de

proceso. Para sistemas sencillos, el modelo de ecuación lingüística puede sustituirse por ejemplo por sistemas difusos o técnicas de modelización convencionales.

Como se usa en el presente documento, sistema de control en "cascada" denota cualquier sistema de control en cascada conocido en la materia. El sistema de control en cascada es un sistema de control de bucle múltiple donde un controlador maestro controla la variable primaria ajustando el punto de consigna de un controlador de variable secundaria relacionado (controlador esclavo). La variable secundaria afecta posteriormente a la variable primaria durante la totalidad del proceso. Las perturbaciones que surgen del bucle secundario se corrigen mediante el controlador secundario antes de que puedan afectar el valor de salida del controlador primario. Normalmente, solamente hay un único controlador maestro y solamente un único controlador esclavo, pero algunas aplicaciones se benefician del uso de más de un controlador esclavo. (Stephanopoulos: Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, 1984, Prentice-Hall, p. 395-402).

Como se usa en el presente documento "analizador inteligente" denota un módulo de software o dispositivo implementado que representa la medida de las rutinas de manipulación, por ejemplo, medidas indirectas, analizadores de tendencias y detección de las condiciones de funcionamiento. Se pueden usar analizadores inteligentes junto con controladores.

Descripción detallada de la invención

La presente invención se basa en un controlador de ecuación lingüística no lineal (EL) cuya superficie de control está modificada adaptativamente utilizando la información obtenida a partir de las propiedades del líquido y los requisitos del proceso por medio de un modelo de adaptación predefinido. El sistema de control comprende uno o más controladores de retroalimentación y/o de alimentación directa para controlar la dosificación de los productos químicos, modelos de adaptación para llevar a cabo la adaptación y, opcionalmente, analizadores inteligentes. Se puede usar un controlador en cascada para condiciones de funcionamiento especiales cuando se necesitan cambiar también los requisitos del proceso.

La invención actual puede aplicarse a varias aplicaciones de dosificación de uno o más productos químicos en sistemas líquidos tales como, pero sin limitación, tratamiento del agua, aguas residuales y aguas industriales, tratamiento de fangos (deshidratación, espesamiento), retención y control de depósitos. En estos sistemas líquidos, los productos químicos se controlan mediante medidas que proporcionan respuesta a la dosificación química. El líquido puede ser, por ejemplo, pero sin limitación, agua, agua residual, agua industrial, fango, suspensión, suspensión de pulpa líquida o cualquier otro líquido, tal como cualquier otro disolvente o producto químico.

Ecuaciones lingüísticas

El método utilizado en la presente invención es un método de ecuación lingüística (EL) que es una herramienta comprensible para la modelización no lineal y aplicaciones de control. La ecuación lingüística (EL) contiene dos partes: las interacciones se gestionan con ecuaciones lineales, y la no linealidad se tiene en cuenta mediante definiciones de miembros. El modelo EL general puede presentarse de la siguiente forma.

$$AX + B = 0, \quad (1)$$

en la que la matriz X define los niveles lingüísticos de las variables y la matriz A define la dirección y la fuerza de las interacciones entre variables. El término B de sesgo se puede usar para desplazar el modelo desde el origen. Se pueden tener en cuenta diferentes puntos de funcionamiento mediante las características adaptativas. La FuzzEqu Toolbox del entorno Matlab proporciona rutinas para el desarrollo de modelos EL a partir de datos reales o basados en el conocimiento de los expertos. Este instrumento incluye la generación automática de sistemas, técnicas basadas en modelos y técnicas de adaptación (Juuso, 1999, Fuzzy control in Process Industry: The Linguistic equation approach. En: Verbruggen, H. B., Zimmermann, H.-J., Babuska, R., editores, Fuzzy Algorithms for Control, International Series in intelligent Technologies, pp. 243-300. Kluwer, Boston, USA).

Los niveles lingüísticos de las variables de entrada se determinan por medio de definiciones de miembros. Estas definiciones escalan los valores reales de las variables hasta los niveles lingüísticos en el intervalo de [-2 - +2]. Las definiciones de miembros comprenden dos funciones que aumentan de forma monótona. La primera función determina los valores lingüísticos entre -2 y 0, y la segunda función determina los valores lingüísticos entre 0 y 2. Como ejemplo, estas funciones pueden consistir en dos polinomios de segundo orden. Se usaron polinomios de segundo orden en los ejemplos comparativos. Las definiciones de los miembros pueden definirse también utilizando procesos expertos. (Järvensivu et.al, 2001 Intelligent control of a rotary kiln fired with producer gas generated from biomass. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 14, p. 629-653., Juuso, E.K. (2004). Integration of intelligent systems in development of smart adaptive systems. International Journal of Approximate Reasoning, 35, 307-337)

En el caso de definiciones de miembros polinómicas, el nivel lingüístico de la variable de entrada j se calcula de acuerdo con la ecuación 2.

$$X_j = \begin{cases} 2 & \text{para } x_j \geq \max(x_j) \\ \frac{-b_j^+ + \sqrt{b_j^{+2} - 4a_j^+(c_j - x_j)}}{2a_j^+} & \text{para } c_j \leq x_j \leq \max(x_j) \\ \frac{-b_j^- + \sqrt{b_j^{-2} - 4a_j^-(c_j - x_j)}}{2a_j^-} & \text{para } \min(x_j) \leq x_j \leq c_j \\ -2 & \text{para } x_j \leq \min(x_j) \end{cases} \quad (2)$$

5 en la que a_j^-, b_j^-, a_j^+ y b_j^+ son coeficientes de los polinomios, c_j es el valor real que corresponde al valor lingüístico 0 y x_j es el valor real. Los valores mínimo y máximo de los datos reales son el $\min(x_j)$ y $\max(x_j)$ que corresponden a los valores lingüísticos -2 y 2. Después, el nivel lingüístico del modelo de salida (X_{salida}) se calcula de acuerdo con la ecuación 1, se convierte al valor real de la salida (X_{salida}) utilizando la siguiente ecuación:

$$x_{salida} = \begin{cases} a_{salida}^- X_{salida}^2 + b_{salida}^- X_{salida} + c_{salida} & \text{para } X_{salida} < 0 \\ a_{salida}^+ X_{salida}^2 + b_{salida}^+ X_{salida} + c_{salida} & \text{para } X_{salida} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

10 donde $a_{salida}^-, b_{salida}^-, a_{salida}^+$ y b_{salida}^+ son coeficientes de los polinomios y el valor real c_{salida} corresponde al valor lingüístico 0.

El ejemplo de la purificación del agua

15 A continuación, la presente invención se describe con ejemplos donde se usa el método de acuerdo con la invención en la purificación de agua en un proceso industrial. Se pretende que los siguientes ejemplos sean ilustrativos y se proporcionan para esclarecer la invención y no deben considerarse como limitantes.

20 En una realización de la presente invención, una unidad de purificación se conecta a una circulación de agua interna en una industria forestal. La unidad se usa para eliminar los sólidos en suspensión y las sustancias extractivas del agua de proceso para reutilizar el agua en el proceso. El agua de entrada contiene generalmente muchos sólidos en suspensión, sustancias extractivas y sustancias aniónicas. Las sustancias aniónicas son principalmente solubles en agua, de forma que no pueden eliminarse mediante precipitación. Sin embargo, estas sustancias consumen productos químicos para neutralizar la carga catiónica. La calidad del agua de entrada a la flotación puede fluctuar en un amplio intervalo dependiendo de las condiciones de proceso. La circulación del agua interna tiene también efectos sobre la calidad del agua de entrada.

30 Se alimentaron dos productos químicos al agua de entrada antes del depósito. El coagulante neutraliza la carga de la superficie de las partículas. Esto permite que las partículas y los coloides puedan coalescer y formar pequeños flóculos. El floculante forma puentes entre los flóculos y aumenta el tamaño del flóculo. Parte del efluente clarificado se recircula, se presuriza, y se satura con aire. El agua recirculada se alimenta al depósito de flotación a través del dispositivo de liberación de presión. En el dispositivo, el aire se libera del agua a la presión atmosférica y se forman microburbujas. En la zona de reacción del depósito, las burbujas de aire se adhieren a los flóculos. En la zona de separación, los aglomerados de burbujas-flóculos flotan hacia la superficie, donde se eliminan mediante rascado metálico.

40 Algunas propiedades del agua se miden continuamente a partir del proceso. La concentración de sólidos en suspensión, conductividad, la temperatura y el caudal del agua de entrada se miden mediante sensores en línea. Además, un sensor blando en línea estima la calidad proporcional del agua de entrada. La turbidez y el pH se miden en el agua de salida. Las medidas de los sólidos en suspensión y la turbidez se basan en la intensidad de la luz retrodispersada a diferentes longitudes de onda desde las partículas y los coloides.

45 Se desarrolló el simulador dinámico para la unidad de purificación. El principal objetivo del simulador era crear un entorno para desarrollar, someter a ensayo y ajustar los controladores y crear una herramienta para analizar el funcionamiento del proceso. El simulador incluye un modelo de ecuación lingüística dinámico (EL) para el depósito de flotación, controladores para dos productos químicos y un indicador de la calidad del agua (Ainali I., Piironen M., Juuso E. (2002) Intelligent Water Quality Indicator for Chemical Water Treatment Unit. In Proceedings of SIMS 2002 - 43rd Conference on Simulation and Modeling, Oulu, Finlandia, 26-27 de septiembre). El simulador se construyó en Matlab Simulink.

50 El producto químico de acción rápida, el floculante, está controlado por el controlador de retroalimentación EL de tipo PI con un modelo de adaptación. El cambio del control se calcula sobre la base del error y el cambio del error entre el punto de consigna de la turbidez y la turbidez medida. Los coagulantes que tienen efecto más lento se controlan

por el control de alimentación directa basado en conocimientos. Otras alternativas de control del coagulante son el modelo EL en estado estacionario y un valor constante.

Modelo EL para la unidad de purificación de agua

5 En general, se genera un modelo EL para la purificación de agua a partir de los datos en línea. Las técnicas de diseño experimental son medios eficaces para recoger datos en línea fiables. No es necesaria la modelización del proceso para la implementación de controladores, pero puede facilitar el ajuste y el ensayo del sistema de control por adelantado.

10 En un caso de ejemplo, se utilizó un diseño compuesto central para el desarrollo de los modelos y a fin de evaluar el efecto de la dosificación de productos químicos en los resultados del tratamiento. Los productos químicos se sometieron a ensayo en un amplio intervalo para encontrar los efectos reales de las variables. Se ensayaron las variables a cinco niveles diferentes para evaluar los efectos no lineales. La cantidad de experimentos (9) es moderada en comparación con el diseño completo de factores de nivel cinco (25 experimentos).

15 Las variables de entrada del modelo son la concentración de los sólidos en suspensión (55), el valor previo de la turbidez (*turbid*) y la cantidad de productos químicos (*coag*, *floc*). La variable de salida es la turbidez (*turbout*). El coeficiente de interacción de la variable *j* es *a_j*. Las variables de entrada se escalan a los valores lingüísticos mediante la ecuación 2. El nivel lingüístico de la turbidez de salida (Y) viene dado por la ecuación 4.

$$Y = -1 / a_{turbout} (a_{coag} \cdot X_{coag} + a_{floc} \cdot X_{floc} + a_{ss} \cdot X_{ss} + a_{turbid} \cdot X_{turbid}) \quad (4)$$

25 Este modelo básico prevé la turbidez de salida bastante bien, cuando la calidad de agua de entrada es normal y estable. La falta de precisión del modelo aumenta cuando la calidad del agua de entrada cambia mucho, por ejemplo, debido a los cambios de concentración de sustancias aniónicas en el agua de entrada. Estos cambios de concentración no pueden siempre observarse con las medidas en línea usuales.

30 Se ha desarrollado un modelo multidinámico para evitar que se produzcan estos problemas en la precisión del modelo básico. El modelo multidinámico comprende submodelos de diferentes condiciones de funcionamiento. Las estructuras de los submodelos son las mismas que las del modelo básico. Se incluye la misma matriz de interacción en todos los submodelos. Esto es muy razonable porque las direcciones de las interacciones no varían considerablemente entre diferentes puntos de funcionamiento. Las diferencias entre los modelos se tratan con definiciones de miembros. El indicador de la calidad del agua selecciona un submodelo adecuado para cada condición de funcionamiento. El modelo multidinámico se usa cuando los controladores se desarrollan y ajustan en el simulador. El modelo multidinámico no se usa en el cálculo del índice de calidad para el control.

El índice de calidad

40 El índice de calidad es un valor calculado que describe la calidad del agua de entrada. Generalmente, la calidad del agua de entrada cambia mucho en la unidad de tratamiento debido a los cambios de concentración de las impurezas. Estos cambios de concentración no pueden siempre observarse con las medidas en línea usuales. En estas situaciones, se usa el índice de calidad para vigilar la calidad del agua.

45 En general, un sensor blando basado en el modelo calcula el índice de calidad sobre la base de medidas y/o análisis en línea/fuera de línea, condiciones de proceso, el consumo de productos químicos y/o el resultado de la purificación. El modelo puede ser cualquier modelo conocido tal como un modelo mecanicista, el modelo de regresión o el modelo EL. Las medidas y el análisis tales como las propiedades físicas o químicas del líquido, caudales de líquidos y de productos químicos son entradas del modelo. El modelo da como resultado una nueva propiedad que describe el nivel de producto químico necesario.

50 En el ejemplo del caso, un indicador de la calidad del agua calcula el índice de pureza del agua de entrada. Un modelo básico para la unidad de purificación es un núcleo del indicador de la calidad del agua. El indicador contiene tres etapas: el modelo básico, el cálculo del error entre la turbidez de salida medida (en línea) y la turbidez prevista y el escalado del error entre -2 y 2 (Figura 1). Si el error es positivo, la calidad del agua es menos pura que el valor promedio. Si el error es negativo, la calidad del agua es más pura que el promedio. La calidad del agua promedio (normal) se ha definido utilizando datos en línea durante un periodo largo (un mes).

60 El indicador de la calidad del agua calcula el índice de pureza del agua de entrada en el intervalo de -2 a 2, que corresponde a las propiedades de extremadamente impura, impura, normal y pura a extremadamente pura. La demanda catiónica del agua de entrada se correlaciona fuertemente con el índice de pureza del agua de entrada. La Figura 2 muestra que la demanda catiónica está disminuyendo y el agua de entrada se está purificando (el índice de pureza aumenta desde impura a extremadamente pura) al mismo tiempo. De acuerdo con el análisis del laboratorio,

la demanda catiónica caracteriza principalmente la concentración de las hemicelulosas aniónicas. La demanda catiónica se analizó a partir de muestras por medio del instrumento de laboratorio Mútec.

El controlador de alimentación directa

5 El controlador de alimentación directa tiene en cuenta por adelantado los cambios de proceso. Puede también optimizar consumos de productos químicos. Las variables de entrada del controlador son, por ejemplo, medidas directas y/o calculadas indirectas, que describen la calidad del agua de entrada y la necesidad de la dosificación de producto químico.

10 El controlador puede ser un modelo EL estático o un controlador basado en conocimiento que es una forma simplificada del modelo EL estático. El controlador basado en el modelo EL estático puede expresarse en la siguiente ecuación, donde Y es el valor lingüístico de la dosificación química, a_i es un coeficiente de interacción y X_i es el valor lingüístico de las variables de entrada $i, i=1...n$.

15

$$Y = -\frac{1}{a_{n+1}}(a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n) \quad (5)$$

El escalado entre valores reales y lingüísticos se lleva a cabo mediante definiciones de miembros. Las dosificaciones químicas adecuadas se pueden definir en las definiciones de miembros.

20 Si el número de variables de entrada es pequeño y el efecto de las variables sobre las variables de salida es lineal, el modelo EL estático puede simplificarse de tal manera que el escalado entre los valores real y lingüístico no es necesario. Este tipo de controlador EL es lo que se denomina un controlador basado en el conocimiento (Figura 6). Se puede expresar en la siguiente ecuación, donde y es el valor de la dosificación química, $y_{básica}$ es una dosificación básica normal, x_i es el valor de una variable de entrada y w_i es el coeficiente ponderado de una variable de entrada $i, i=1...n$.

25

$$y = y_{básica} + w_1x_1 + \dots w_nx_n \quad (6)$$

30 En un caso de ejemplo, el producto químico que tiene un efecto lento se dosifica mediante alimentación directa. El punto de consigna normal, x_{TSP} , se consigue mediante la dosificación básica cuando el agua de entrada es normal (el índice de pureza es 0). En el controlador basado en conocimiento, las diferencias en las condiciones de funcionamiento se gestionan con el índice de pureza del agua de entrada, x_{PI} , y la diferencia entre el punto de consigna, x_{SP} y el punto de consigna normal x_{TSP} (Figura 7).

35

$$y = y_{básica} + w_{PI}x_{PI} + w_{SP}(x_{SP} - x_{TSP}) \quad (7)$$

El controlador EL de alimentación directa

40 El ajuste fino de la dosificación química se lleva a cabo mediante el controlador de retroalimentación EL de tipo PI. El cambio del control se calcula sobre la base del error y el cambio del error entre el punto de consigna de la turbidez y la turbidez medida (Figura 3).

45 Las variables de entrada del controlador EL de retroalimentación son un valor del punto de consigna y una medida del agua de salida, por ejemplo, la turbidez. Esta medida debe describir el resultado del tratamiento de la unidad de purificación. Debe también proporcionar la respuesta para el cambio de las dosificaciones químicas.

50 El controlador EL puede expresarse en la siguiente ecuación, donde Y es un valor lingüístico, y es un valor real y c_i son parámetros de ajuste $i, i=1, 2, 3$. El escalado entre valores reales y lingüísticos se lleva a cabo mediante definiciones de miembros.

$$Y_{cambio\ de\ control} = c_3(c_1X_{error} + c_2X_{cambio\ de\ error}) \quad (8)$$

$$y_{nuevo\ control} = x_{control\ anterior} + x_{cambio\ de\ control} \quad (9)$$

55 **El controlador EL adaptativo**

Un controlador EL adaptativo contiene el controlador EL y un modelo de adaptación. El rendimiento del modelo de

adaptación se basa en la detección del estado del proceso mediante un modelo de adaptación. El modelo adaptativo modifica la superficie de control de acuerdo con este conocimiento. El controlador EL ya gestiona las condiciones de funcionamiento no lineales. La adaptación amplía adicionalmente el intervalo de funcionamiento del controlador sin cambiar el controlador. Por tanto, el controlador EL adaptativo puede funcionar en intervalos amplios de condiciones de proceso. Cada controlador de retroalimentación y de alimentación directa puede tener su propio modelo de adaptación.

El modelo de adaptación se basa en el modelo EL (Figura 5). Las variables de entrada son medidas directas y/o calculadas indirectas, que determinan el área de funcionamiento del proceso. La ecuación calcula un coeficiente de adaptación, que se multiplica con el cambio de control. El modelo EL de adaptación puede expresarse en la siguiente ecuación, donde Y es el valor lingüístico del coeficiente de adaptación, a_i es un coeficiente de interacción entre las variables y X_i es el valor lingüístico de las variables de entrada $i, i=1...n$.

$$Y = -\frac{1}{a_{n+1}} (a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n) \quad (10)$$

El escalado entre valores reales y lingüísticos se lleva a cabo mediante definiciones de miembros.

En un caso de ejemplo, el coeficiente de adaptación (Y_C) se calcula mediante el modelo EL sobre la base del índice de pureza (X_{Pind}) y el punto de consigna de la turbidez (X_{SP}) (Figura 4).

$$Y_C = -\frac{1}{a_C} (a_{Pind} X_{Pind} + a_{SP} X_{SP}) \quad (11)$$

El controlador de retroalimentación con características de adaptación, que se usa en la realización preferida de la invención, se acomoda mucho mejor a las situaciones dinámicas que un controlador EL de retroalimentación básico.

Cuando la calidad del agua es pura, el coeficiente de adaptación disminuye el cambio del control a fin de evitar la oscilación de la turbidez. Cuando la calidad del agua es impura, el coeficiente de adaptación aumenta el cambio del control a fin de acelerar las acciones de control.

Métodos de ajuste

El ajuste de los parámetros de control se lleva a cabo generalmente cuando se implementa el sistema de control. No es necesario ajustar los controladores en línea porque el principio de funcionamiento de los controladores EL es diferente al autoajuste del controlador PID, es decir, la modificación de los parámetros del controlador se basa en medidas directas o indirectas (sensores blandos, analizadores inteligentes) de una manera predefinida, por ejemplo, modelos de proceso o conocimiento heurísticos. El ajuste por adelantado facilita un funcionamiento rápido en el cambio de las condiciones de funcionamiento.

El ajuste y el ensayo de controladores es más fácil y rápido de hacer en el simulador en el caso de sistemas de control complicados. El simulador contiene un modelo de proceso dinámico y los controladores. Se utiliza un diseño generalmente experimental en el desarrollo del modelo, ya que los modelos se basan a menudo en datos.

El ajuste y el ensayo de controladores puede también llevarse a cabo en el proceso si los sistemas de control son sencillos, por ejemplo el controlador EL de retroalimentación solo sin una característica adaptativa predefinida.

En todas estas situaciones, se pueden usar de forma eficaz métodos basados en, por ejemplo, algoritmos de búsqueda aleatorios (por ejemplo, algoritmo de quimiotaxis, algoritmo genético) o de búsqueda exhaustiva para ajustar los controladores en el proceso o en el simulador. Se puede usar también el método de ensayo y error para ajustar los controladores, por ejemplo, cuando el sistema de control es sencillo.

Control en cascada

Los sistemas controladores en cascada pueden necesitarse para recuperar o evitar problemas que se producen en algunos casos especiales. Como los controladores EL de retroalimentación mantienen las variables controladas eficazmente en límites aceptables, el punto de consigna debe ajustarse a los requisitos de otros subprocessos, por ejemplo, las propiedades del líquido tratado deben estar comprendidas en límites específicos. Se puede usar también el control en cascada para la optimización del nivel de tratamiento junto con el proceso global. La cascada mejora el control de la retroalimentación y de la alimentación directa.

Ejemplos

Comparación de ejemplos de ensayo

Se realizaron ensayos comparativos entre controladores PID de autoajuste comerciales y los nuevos controladores

EL adaptativos de la presente invención durante la primavera de 2003 en una unidad de purificación de agua. La unidad se conectó a una circulación de agua interna en una industria forestal. El agua del proceso de entrada contiene sólidos en suspensión, hemicelulosas, sustancias extractivas y sustancias inorgánicas. La calidad del agua de entrada a la unidad de purificación puede fluctuar en un amplio intervalo dependiendo de las condiciones de proceso. La circulación del agua interna tiene también efectos sobre la calidad del agua de entrada. La unidad se usa para eliminar los sólidos en suspensión y las sustancias coloidales del agua de proceso. En los siguientes ensayos, la concentración de los sólidos en suspensión en el agua de entrada, el caudal del agua de entrada y la turbidez del agua a la salida se midieron mediante sensores en línea. Las medidas de los sólidos en suspensión y la turbidez se basan en la intensidad de la luz retrodispersada a diferentes longitudes de onda (600 y 900 nm) desde las partículas y los coloides.

Se alimentaron dos polielectrolitos (Chem1, Chem2) al agua de entrada antes de la etapa de separación. Chem1, que es un coagulante, neutraliza la carga sobre la superficie de las partículas. Esto permite que las partículas y los coloides puedan coalescer y formar pequeños floculos. Chem2, que es un floculante, forma puentes entre floculos y aumenta el tamaño del floculo. Los floculos se eliminan del agua en la etapa de separación. El resultado de la purificación se sigue mediante un sensor en línea de la turbidez de salida. Los productos químicos se han dosificado tanto mediante controladores PID de autoajuste como mediante controladores EL adaptativos nuevos de acuerdo con la presente invención en la planta en ese momento.

La base del controlador comercial utilizado como comparador es un controlador PID de autoajuste diseñado exclusivamente para el control de polimeros. La variable de control primaria se mide usualmente con sensores de turbidez o de sólidos en suspensión en línea. El rendimiento del controlador está ocasionalmente limitado por las variaciones rápidas en las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, cambios rápidos de turbidez) si el mecanismo de adaptación no puede trabajar adecuadamente.

Los controladores comerciales y los nuevos controladores de la presente invención se sometieron a ensayo por separado en la planta. No se pueden repetir exactamente condiciones de funcionamiento similares para los controladores debido a la compleja circulación del agua interna. Algunos subprocesos tienen también un gran efecto sobre la cantidad y la calidad del agua. Por tanto, se han usado también simulaciones del proceso con nuevos controladores para la comparación del rendimiento. El simulador desarrollado para la unidad de purificación incluye un modelo de ecuación lingüística dinámico (EL) para la unidad de purificación, dos controladores para la dosificación de productos químicos y un sensor blando que describe la calidad relativa del agua de entrada (Figura 8). El modelo calcula la turbidez de salida sobre la base de dosificaciones químicas, sólidos en suspensión en el agua de entrada y caudal del agua de entrada. Se ha ensayado el modelo dinámico con datos en línea recogidos de la planta. De acuerdo con estos ensayos, los modelos dinámicos generados proporcionan una buena predicción de la turbidez de salida (Figuras 9c, 10c, 11c, 12c, 13c y 14c). El indicador de la calidad del agua es un modelo basado en un sensor blando. Calcula el índice de pureza del agua de entrada en el intervalo de -2 a 2, que corresponde a las propiedades del agua desde extremadamente impura, impura, normal, y pura a extremadamente pura.

Normalmente, la calidad y la cantidad del agua de entrada pueden cambiar bastante en un amplio intervalo. Muy frecuentemente, los cambios son muy rápidos. Mantener el resultado de la purificación estable en situaciones dinámicas es un importante desafío para los controladores. En los siguientes ejemplos, el rendimiento de los controladores comerciales y el de los nuevos controladores EL adaptativos de la presente invención se comparan entre sí cambiando las condiciones de funcionamiento.

Definiciones de parámetros en las Figuras de los ensayos comparativos

"Flujo de entrada" (%) describe la cantidad relativa de agua de entrada. El valor del 100 % corresponde a la capacidad máxima de la unidad de purificación.

"Índice de pureza" describe la calidad del agua de entrada en el intervalo -2 y 2 (desde agua extremadamente impura a agua extremadamente pura).

"Turbidez" (NTU) describe la cantidad de sustancias coloidales en el agua de salida.

"Punto de consigna" (NTU) describe la turbidez de salida deseada.

"Dosificación escalonada" describe cantidades relativas de productos químicos. El valor 1 corresponde a la cantidad máxima de productos químicos.

Ejemplo 1. Cambio den la calidad del agua de entrada

Ejemplo 1a. Comportamiento del nuevo controlador de retroalimentación adaptativo de acuerdo con la invención cuando la calidad del agua está cambiando.

El nuevo controlador de retroalimentación adaptativo LE puede reaccionar al cambio en la calidad del agua

rápidamente, y puede mantener el valor del punto de consigna. No existe desplazamiento entre el valor medido y la turbidez del punto de consigna. El cambio en la calidad del agua de entrada tiene un efecto inmediato sobre la dosificación química porque el controlador de retroalimentación reacciona rápidamente al error entre la turbidez y el punto de consigna.

5 En el ejemplo, el índice de pureza varía entre 1 y 1,6 (Figura 9a). Cuando el agua se está volviendo, en primer lugar, ligeramente más pura, la dosis química disminuye inmediatamente (índice de pureza de 1,2 a 1,6). Cuando las impurezas del agua comienzan a aumentar ligeramente (índice de pureza de 1,6 a 1,0). El controlador de retroalimentación aumenta el producto químico y puede mantener el valor del punto de consigna (Figura 9b).

10 **Ejemplo 1b. Comportamiento del controlador comercial cuando la calidad del agua está cambiando.**

El controlador de retroalimentación comercial no puede mantener siempre el valor del punto de consigna cuando la calidad del agua de entrada comienza a cambiar, especialmente si el cambio es rápido. El controlador comienza a aumentar o disminuir el aporte de producto químico demasiado lentamente. Como resultado, el error entre la turbidez medida y la de consigna puede ser significativo. Frecuentemente puede quedar una desviación constante del valor del punto de consigna.

20 En el ejemplo, el agua de entrada es muy pura durante 5 horas (el índice de pureza es 2, muy pura) (Figura 10a). Después, la calidad del agua se va volviendo impura, y se acerca al nivel normal de calidad del agua (el índice de pureza disminuye de 2 a 0). La Figura 10b muestra que el controlador de retroalimentación comercial mantiene el punto de consigna cuando la calidad del agua es estable. Durante el cambio, el controlador aumenta demasiado lentamente la dosis del producto químico. Como resultado, la dosis de producto químico no es suficiente para mantener la turbidez de salida en el valor del punto de consigna.

25 De acuerdo con los resultados de la simulación, el nuevo controlador de retroalimentación adaptativo puede reaccionar al cambio en la calidad del agua mucho más rápidamente y mantener el valor del punto de consigna (sin diferencia entre la turbidez medida y la de consigna, Figura 10d). La Figura 10c muestra que el modelo dinámico puede predecir la turbidez de salida bien durante esta prueba.

30 **Ejemplo 1c. Comportamiento del controlador de alimentación directa y de los controladores de retroalimentación comerciales cuando la calidad del agua está cambiando.**

35 El controlador de alimentación directa y los controladores de retroalimentación comerciales pueden mantener bien el punto de consigna cuando la calidad del agua de entrada es estable. La turbidez se puede desviar del punto de consigna bastante cuando la calidad del agua cambia, como se puede observar en las Figuras 11a y 11b. De acuerdo con los resultados de la simulación, los nuevos controladores pueden acercarse suavemente al punto de consigna en las mismas situaciones (Figura 11d). La Figura 11c muestra que el modelo de simulación es fiable y predice bien la turbidez medida.

40 Al principio, la calidad del agua de entrada es normal (el índice de pureza es 0). Pequeños picos en el índice de pureza (por ejemplo, de 0,5 a 0, de 0,5 a -0,25, de 0,8 a 0,1) conducen a picos de turbidez con los controladores comerciales, pero no con los nuevos controladores. Cuando el agua de entrada se vuelve más pura (índice de pureza de -0,25 a 1), los controladores comerciales no pueden reaccionar suficientemente rápido a los cambios de turbidez. Los nuevos controladores funcionan mejor en esta situación, de acuerdo con las simulaciones. Los nuevos controladores se acercan al punto de consigna más rápidamente, y la desviación desde el punto de consigna es menor. Además, los controladores comerciales ocasionan frecuentemente desviaciones del punto de consigna durante pequeñas desviaciones en ciclos largos del nivel de impurezas al final del ensayo (el índice de pureza disminuye de 1 a las 08.00 hasta 0,7 a las 18.00). Esta desviación no se observó con los nuevos controladores.

50 **Ejemplo 2. La cantidad de agua está cambiando**

55 **Ejemplo 2a. Comportamiento de ambos nuevos controladores cuando la cantidad de agua está cambiando (mitad de la alimentación de agua)**

Los nuevos controladores pueden reaccionar a la disminución a la mitad del flujo de entrada bastante bien (Figura 12a). Los controladores pueden mantener el valor del punto de consigna y no existe diferencia entre la turbidez medida y la de consigna como puede observarse en la Figura 12b.

60 En el ejemplo, el punto de consigna de la turbidez se disminuye a la vez que el flujo de entrada disminuye a la mitad debido a las demandas del proceso (optimización del flujo de fango). Antes del cambio, los controladores mantienen el punto de consigna muy bien. Durante el cambio del caudal, la dosis del Chem1 aumenta temporalmente a bastante alto porque la bomba química reacciona lentamente al cambio en el caudal de agua. Como resultado, la turbidez de salida también disminuye temporalmente. De lo contrario, la turbidez de salida sigue bien el punto de consigna.

65

Ejemplo 2b. Comportamiento del controlador de retroalimentación comercial cuando la cantidad de agua está cambiando (doble de la cantidad de agua)

5 El cambio en la alimentación de agua perturba el funcionamiento de la unidad de purificación. La duplicación de la alimentación de agua es más exigente para los controladores que su disminución a la mitad, ya que la cantidad de agua aumenta en pocos minutos. Esto ocasiona una punta rápida en la turbidez de salida debido a la gran cantidad de agua a purificar. Ni los controladores comerciales, ni los controladores nuevos, pueden resolver completamente esta punta.

10 En el ejemplo, el controlador de retroalimentación comercial dosifica el producto químico (Chem2) durante la duplicación de la alimentación de agua (Figura 13a). Durante el cambio, el controlador de retroalimentación reacciona demasiado débilmente a la punta de turbidez. Como resultado, la turbidez aumenta bastante (475 NTU). La Figura 13b muestra que el controlador de retroalimentación comercial aumenta la dosis de producto químico demasiado lentamente después del cambio, por lo que permanece una diferencia entre la turbidez del punto de consigna y la medida.

15 De acuerdo con las simulaciones, el nuevo controlador de realimentación está funcionando mejor en esta situación (Figura 13d). El controlador reacciona con más fuerza a la punta de turbidez. Como resultado, la turbidez aumenta solamente hasta el valor de 350 NTU durante el cambio. Tras el cambio, el controlador de realimentación mantiene el punto de consigna muy bien.

Ejemplo 2c. Comportamiento de ambos controladores comerciales cuando la cantidad de agua está cambiando (mitad de la alimentación de agua)

25 La disminución a la mitad de la alimentación de agua no perturba el funcionamiento de la unidad de purificación tanto como la duplicación de la alimentación de agua. Por tanto, esta situación debería ser más sencilla para los controladores. Cuando ambos controladores de retroalimentación y alimentación directa comerciales dosifican los productos químicos durante el cambio en la alimentación de agua, los cambios en la turbidez se resuelven mediante el controlador de alimentación directa. Como resultado, la turbidez se puede desviar bastante de los valores del punto de consigna.

30 En el ejemplo, ambos controladores comerciales dosifican los productos químicos. Durante la disminución a la mitad de la alimentación de agua, el controlador de alimentación directa disminuye la turbidez (Figura 14a y 14b). Chem1 actúa sobre la turbidez más lentamente que Chem2. Este es el motivo por el que la turbidez disminuye por debajo del punto de consigna. Después del cambio, los controladores mantienen el punto de consigna momentáneamente. Cuando el agua comienza a volverse impura, los controladores no reaccionan al aumento de turbidez. Como resultado, la diferencia entre la turbidez y el valor del punto de consigna se mantiene. El nuevo controlador de alimentación directa reacciona al cambio de turbidez (Figura 14d). Como resultado, la turbidez no disminuye tanto como con los controladores comerciales. El controlador de alimentación directa reacciona al cambio en la calidad del agua.

Ejemplo 3. Perturbaciones durante el uso del funcionamiento de los controladores comerciales

45 A veces pueden aparecer perturbaciones en el comportamiento del controlador de alimentación directa y de los controladores de retroalimentación comerciales, especialmente cuando la unidad de purificación arranca o el caudal de entrada varía. En estos ejemplos, las dosis de los productos químicos pueden permanecer en el límite inferior o superior.

Ejemplo 3a. El caudal de producto químico permanece en el límite inferior.

50 La dosis de Chem1 queda en el límite inferior durante el arranque de la unidad de purificación (Figura 15b). El controlador de retroalimentación puede mantener el punto de consigna cuando el caudal de entrada de agua es bajo (aproximadamente un 40 %). Cuando el caudal de agua de entrada se duplica, la calidad del agua se va volviendo más impura (Figura 15a). El controlador de alimentación directa no puede mantener, en solitario, la turbidez del punto de consigna. La turbidez aumentó por encima del punto de consigna debido a la baja dosificación de Chem1.

Ejemplo 3b. El caudal de producto químico permanece en el límite superior.

60 La dosis de Chem2 queda en el límite superior durante el arranque de la unidad de purificación (Figura 16a y Figura 16b). Como resultado, el controlador de retroalimentación no puede disminuir la dosis. Por tanto, la turbidez de salida estaba por debajo del punto de consigna. La perturbación se resolvió manualmente disminuyendo la dosis de Chem2.

Ejemplo 3c. El caudal de producto químico permanece en el límite inferior.

65 La Figura 17b muestra que la dosis de Chem2 permanece en el límite inferior cuando la cantidad de agua de entrada

disminuye a la mitad en pocos minutos (Figura 17a). Temporalmente, la turbidez del agua disminuye por debajo del punto de consigna. El controlador disminuye la cantidad de producto químico, pero por algún motivo, la dosis sigue estando en el límite inferior durante varias horas, aunque la turbidez aumenta incluso por encima del punto de consigna. La cantidad de Chem2 es tan pequeña que la eficacia de purificación disminuye y la turbidez aumenta por encima del punto de consigna. Sin embargo, el controlador no aumenta la cantidad de Chem2. Esta perturbación en el controlador de alimentación directa se resolvió manualmente aumentando la dosis de Chem2 temporalmente. La presente invención se ha descrito con mayor énfasis sobre algunas de las realizaciones y aplicaciones preferidas. Sin embargo, será evidente para los expertos en la materia que se pueden preparar y utilizar variaciones en las realizaciones preferidas, y que la invención se puede llevar a la práctica de otra forma que la descrita específicamente en el presente documento dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para el control automático de la dosificación de uno o más productos químicos en un sistema de tratamiento de líquidos, en el que las propiedades del líquido se utilizan para modificar la superficie de control de un controlador de ecuación lingüística (LE) de forma adaptativa para controlar la dosificación de uno o más productos químicos al líquido mediante uno o más controladores, **caracterizado por que** la adaptación se lleva a cabo mediante un modelo de adaptación predefinido.
- 10 2. El método de la reivindicación 1, **caracterizado por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística dinámica.
3. El método de la reivindicación 1, **caracterizado por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística estática.
- 15 4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística no lineal.
- 20 5. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** al menos uno de dichos controladores es un controlador de retroalimentación.
6. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** al menos uno de dichos controladores es un controlador de alimentación directa.
- 25 7. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el ajuste del controlador comprende uno o más controladores en cascada.
8. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dichas propiedades del líquido se describen mediante un índice de calidad.
- 30 9. El método de la reivindicación 8, **caracterizado por que** dicho índice de calidad es un índice de pureza.
10. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicho líquido es agua.
- 35 11. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicho sistema de tratamiento de líquidos es un sistema de depuración de agua.
- 40 12. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dichos productos químicos son coagulantes, floculantes, oxidantes, reductores, adsorbentes, agentes dispersantes, biocidas o antiespumantes o combinaciones de los mismos.
- 45 13. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dichas propiedades del líquido se definen a partir del líquido de entrada.
14. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dichas propiedades del líquido se definen a partir del líquido de salida.
- 50 15. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha adaptación se realiza mediante el modelo EL.
- 55 16. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-15, **caracterizado por que** dicha adaptación se realiza mediante un modelo difuso.
17. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha adaptación está basada en una operación remota.
- 60 18. Una disposición de dispositivos para el control automático de la dosificación de productos químicos en un sistema de tratamiento de líquidos en la que las propiedades del líquido están dispuestas para modificar de forma adaptativa la superficie de control de un controlador de ecuación lingüística (EL), para controlar la dosificación de productos químicos mediante uno o más controladores, **caracterizada por que** la adaptación está dispuesta para llevarse a cabo mediante uno o más modelos de adaptación predefinidos.
19. La disposición de dispositivos de la reivindicación 18, **caracterizada por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística dinámica.
- 65 20. La disposición de dispositivos de la reivindicación 18, **caracterizada por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística estática.

21. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-20, **caracterizada por que** dicha ecuación lingüística es una ecuación lingüística no lineal.
- 5 22. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-21, **caracterizada por que** al menos uno de dichos controladores es un controlador de retroalimentación.
23. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-22, **caracterizada por que** al menos uno de dichos controladores es un controlador de alimentación directa.
- 10 24. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-23, **caracterizada por que** el ajuste del controlador comprende uno o más controladores en cascada.
- 15 25. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-24, **caracterizada por que** dichas propiedades del líquido se describen mediante un índice de calidad.
- 20 26. La disposición de dispositivos de la reivindicación 25, **caracterizada por que** dicho índice de calidad es un índice de pureza.
27. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-26, **caracterizada por que** dicho líquido es agua.
28. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-27, **caracterizada por que** dicho sistema de tratamiento de líquidos es un sistema de depuración del agua.
- 25 29. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-28, **caracterizada por que** dichos productos químicos son coagulantes, floculantes, oxidantes, reductores, adsorbentes, agentes dispersantes, biocidas o antiespumantes o combinaciones de los mismos.
- 30 30. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-29, **caracterizada por que** dichas propiedades del líquido se definen a partir del líquido de entrada.
- 35 31. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-30, **caracterizado por que** dichas propiedades del líquido se definen a partir del líquido de salida.
- 40 32. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-31, **caracterizada por que** dicha adaptación está dispuesta para su realización con el modelo EL.
33. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-31, **caracterizada por que** dicha adaptación está dispuesta para su realización con un modelo difuso.
34. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-33, **caracterizada por que** dicha adaptación está basada en una operación remota.
- 45 35. La disposición de dispositivos de cualquiera de las reivindicaciones 18-34, **caracterizada por que** comprende además un analizador inteligente.

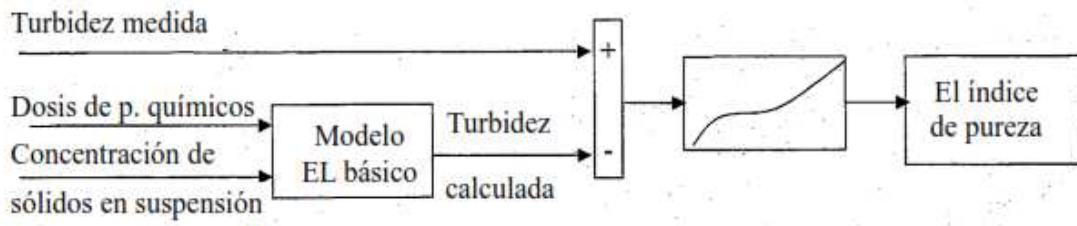


Fig. 1

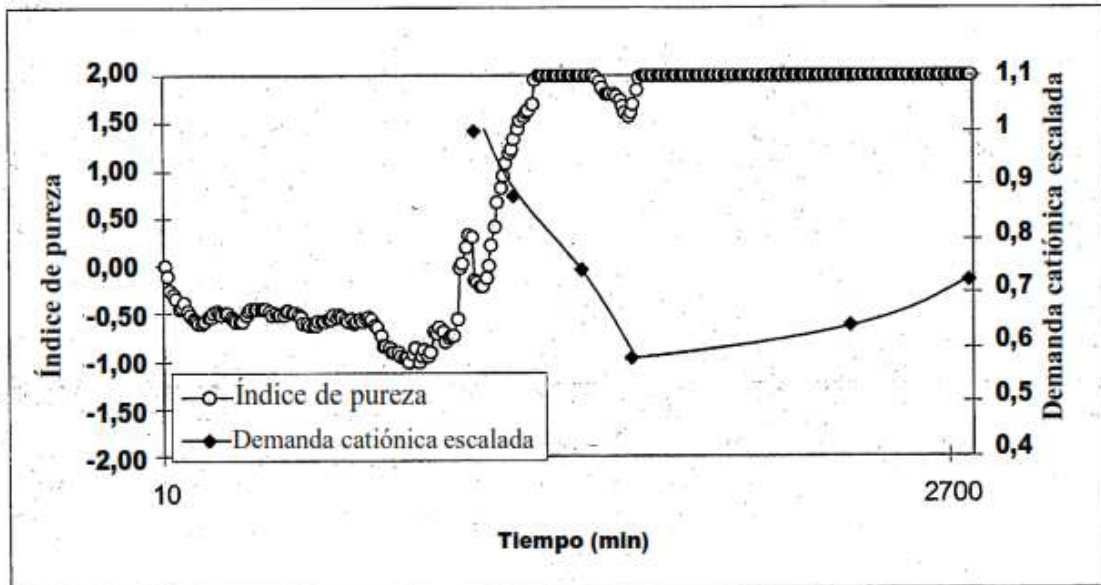


Fig. 2

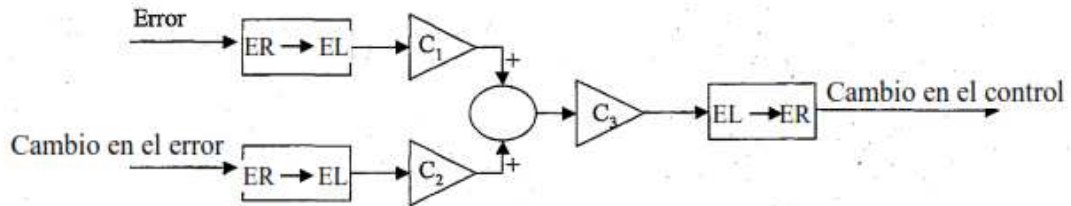


Fig. 3



Fig. 4

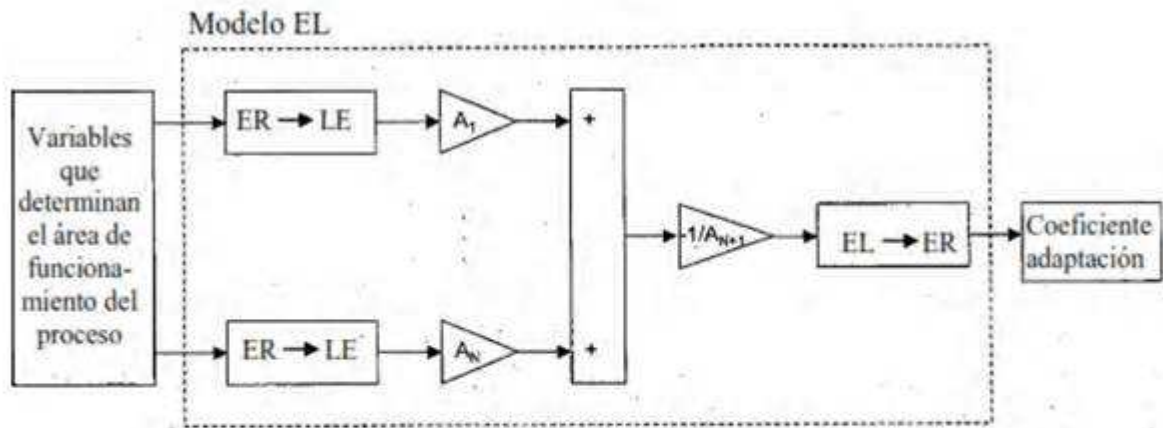


Fig. 5

Dosis de p. químicos

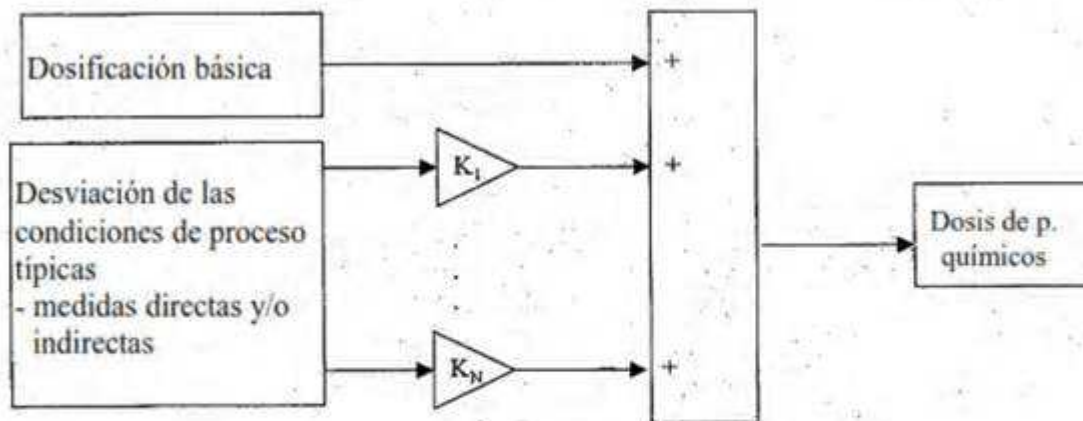


Fig. 6

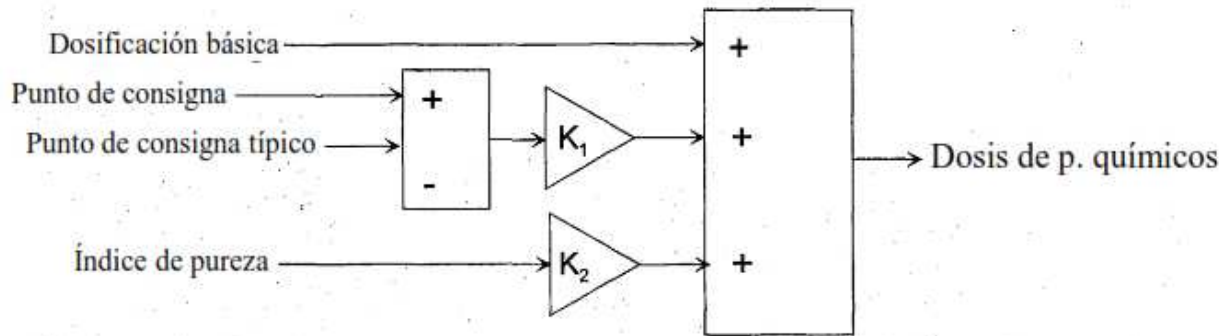


Fig. 7

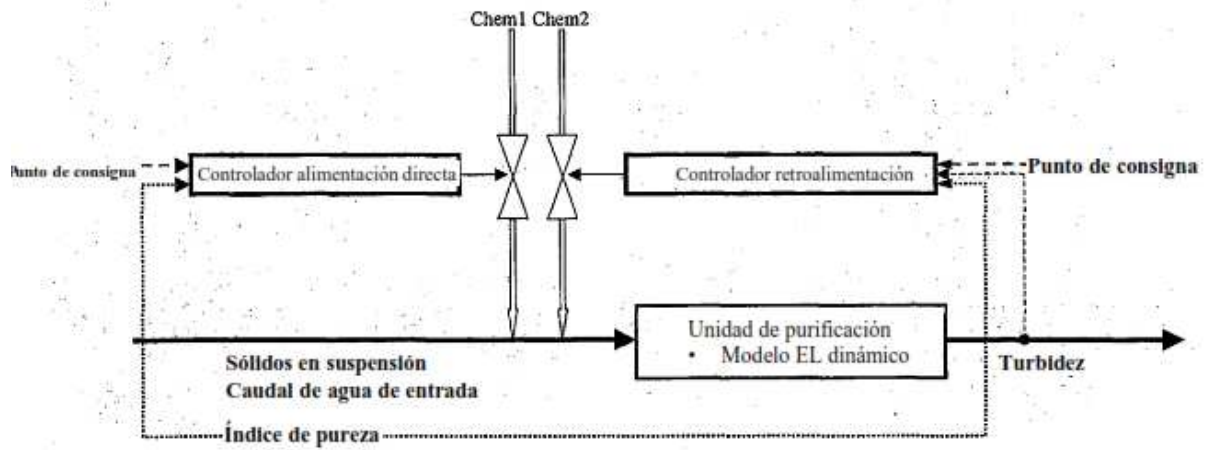


Fig. 8

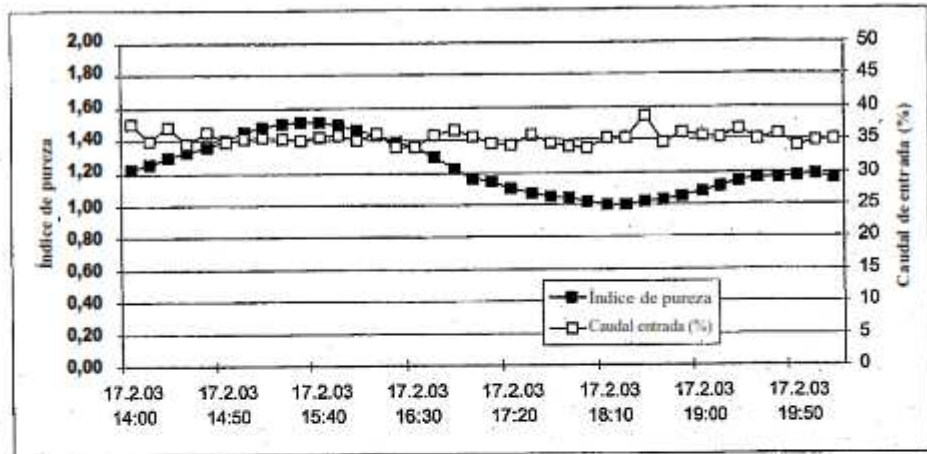


Fig. 9a

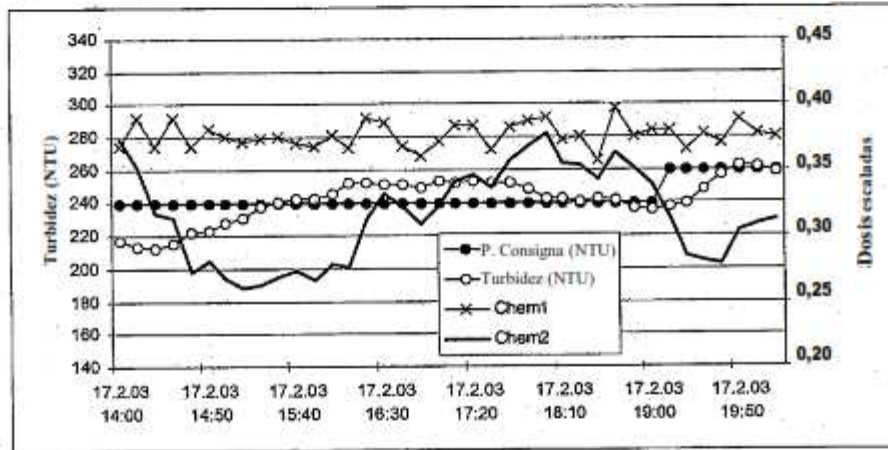


Fig. 9b

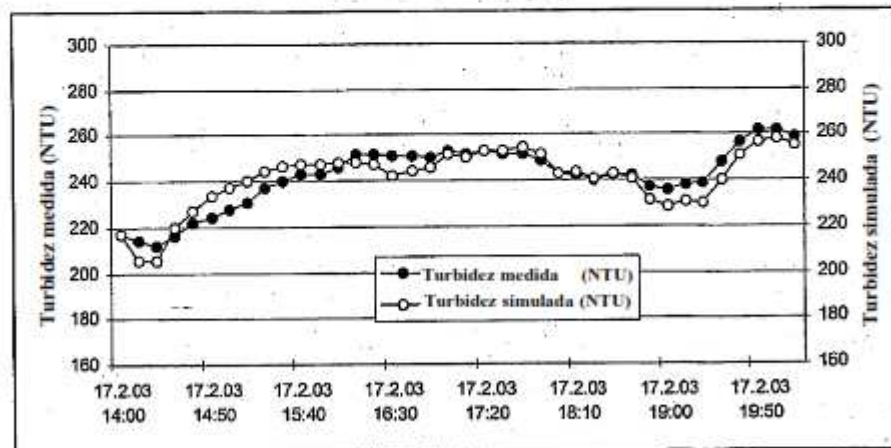


Fig. 9c

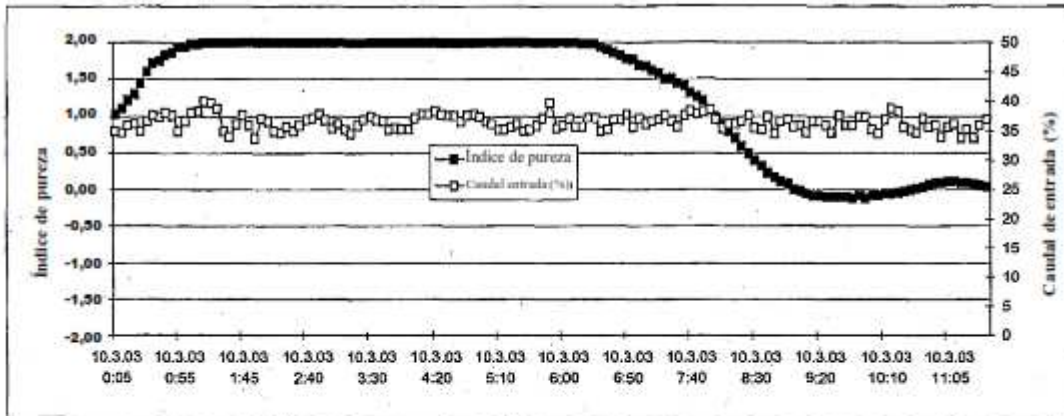


Fig. 10a

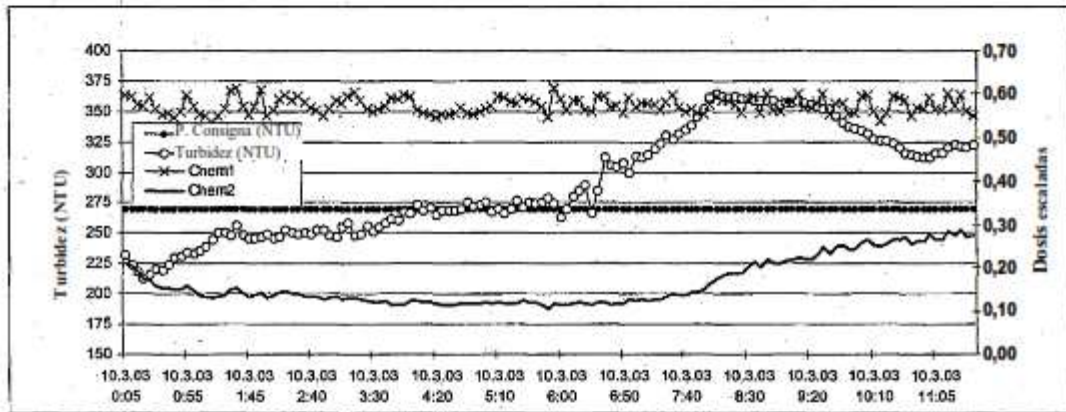


Fig. 10b

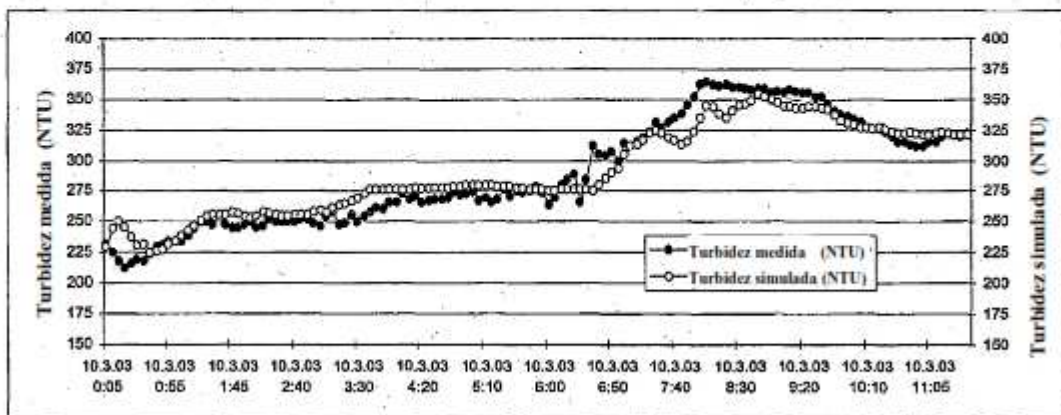


Fig. 10c

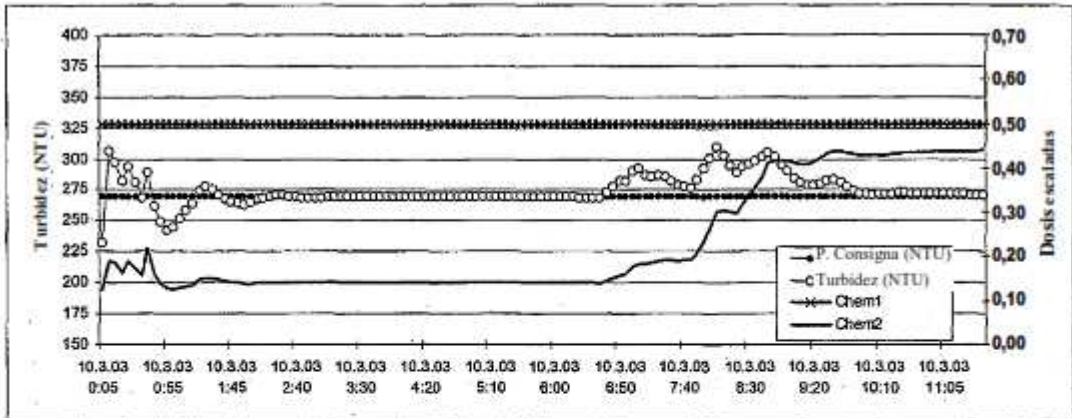


Fig. 10d

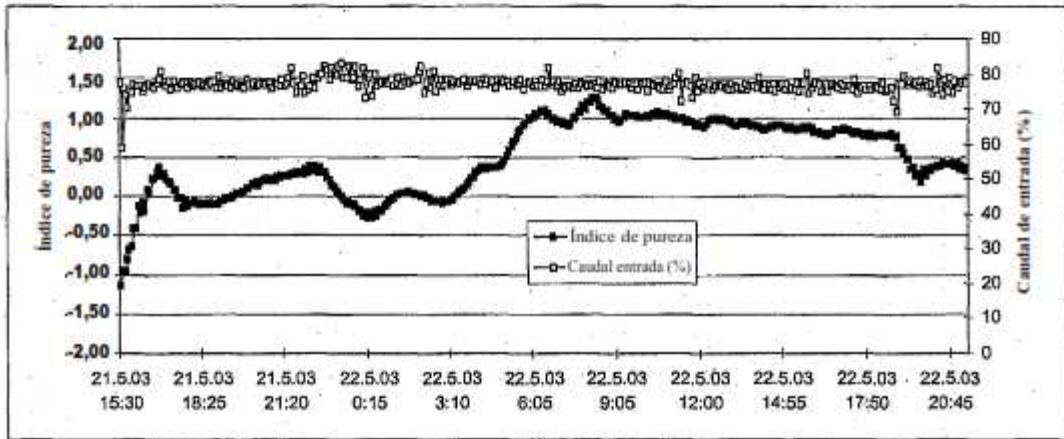


Fig. 11a

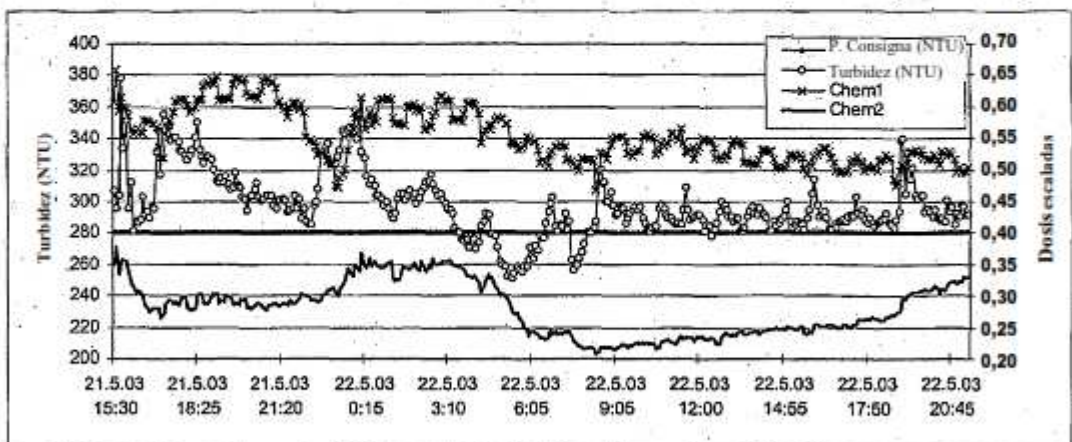


Fig. 11b

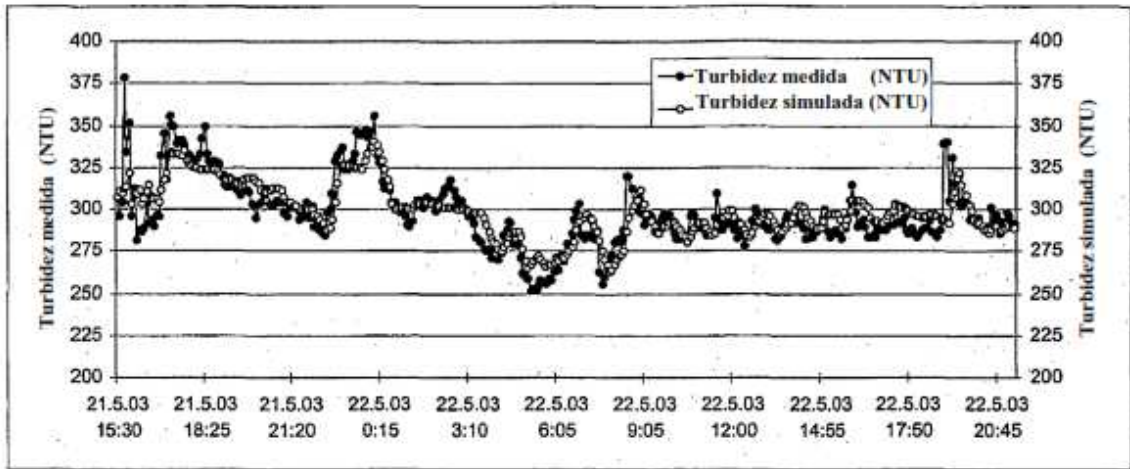


Fig. 11c

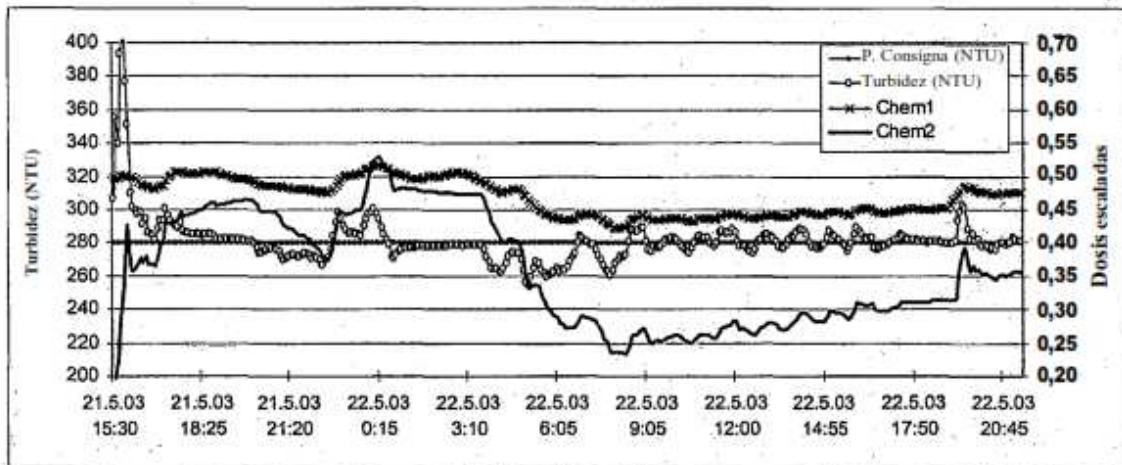


Fig. 11d

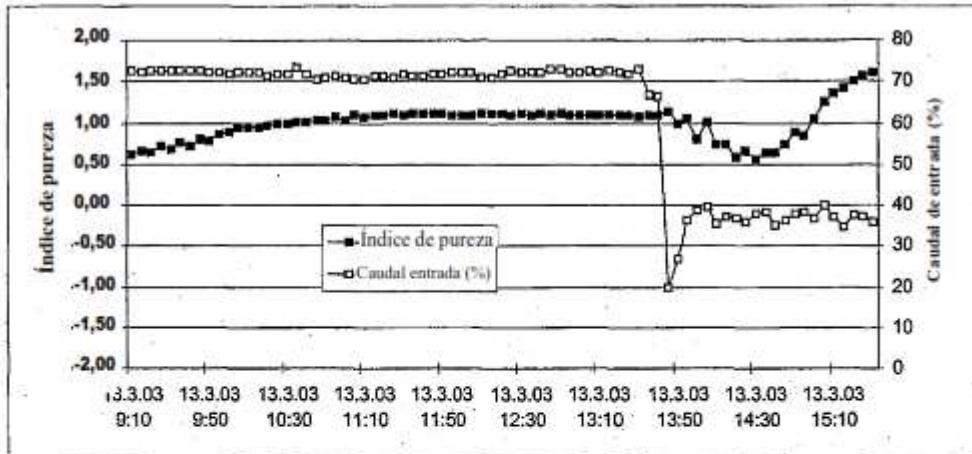


Fig. 12a

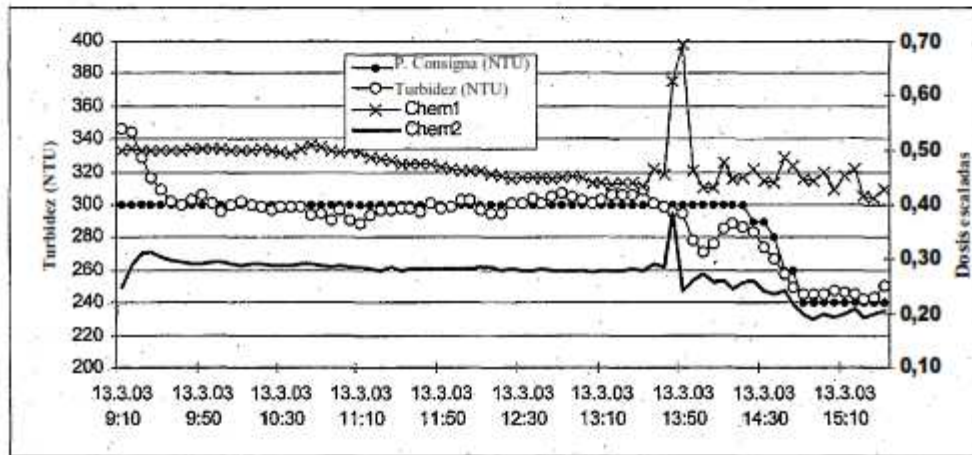


Fig. 12b

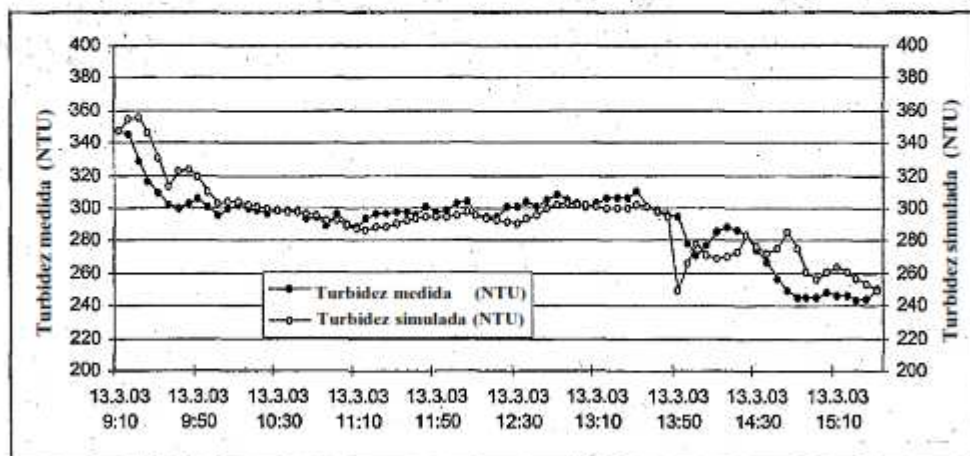


Fig. 12c

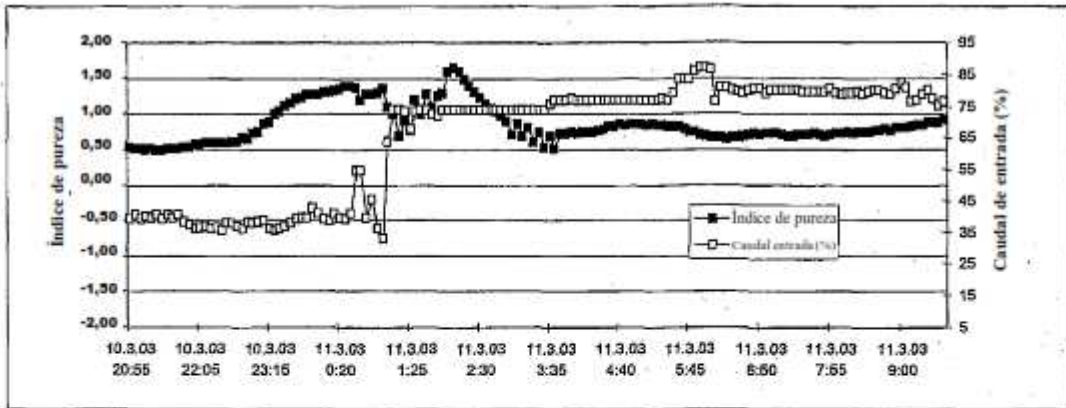


Fig. 13a

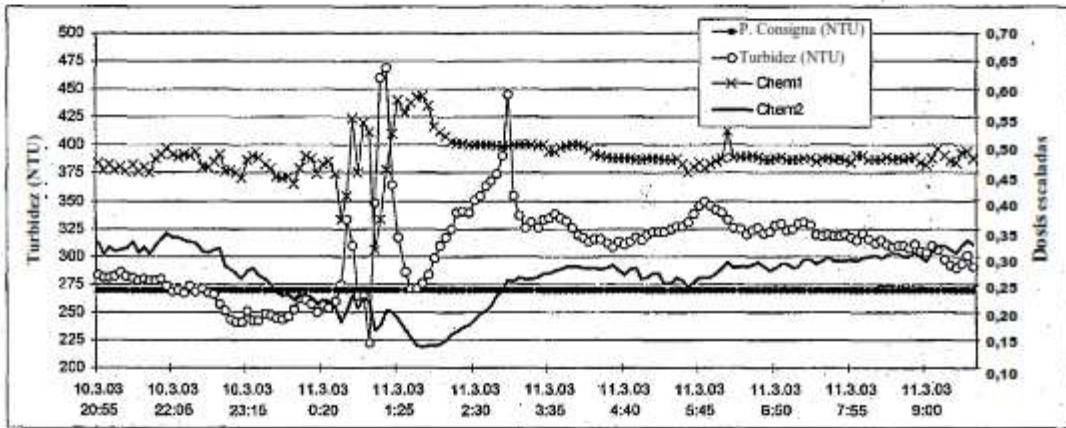


Fig. 13b

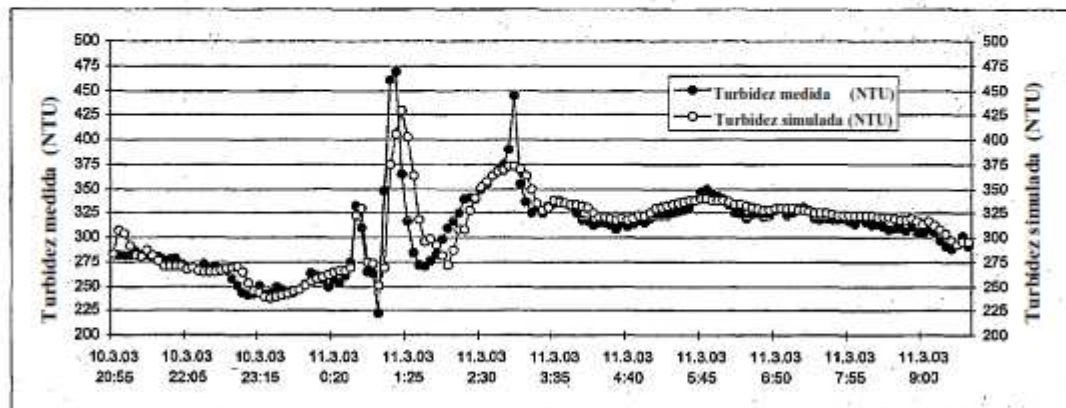


Fig. 13c

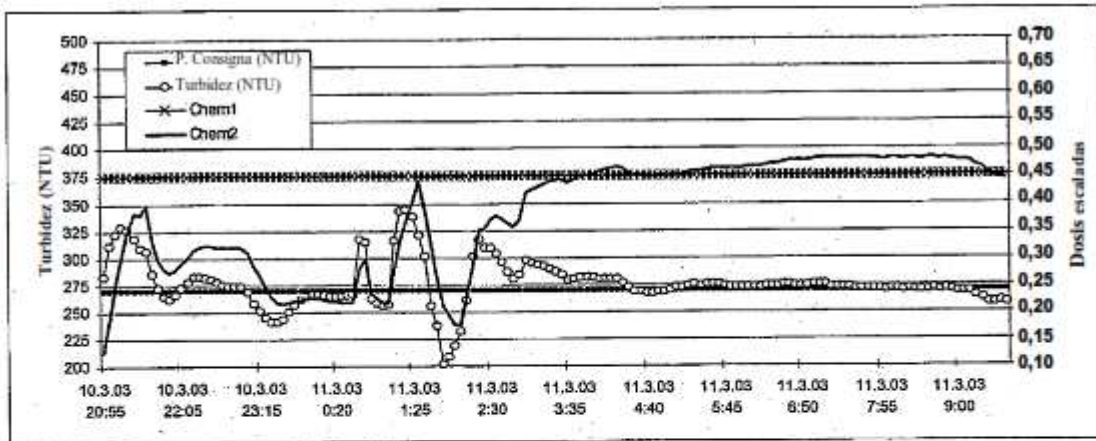


Fig. 13d

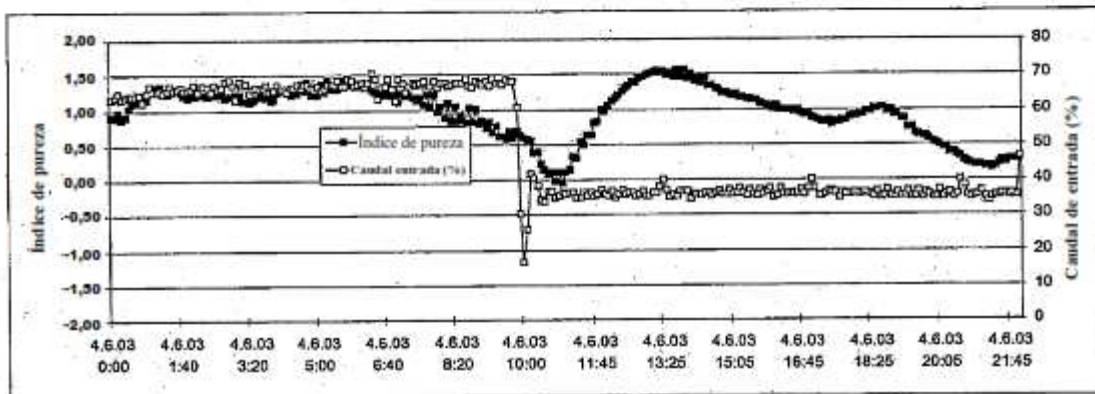


Fig. 14a

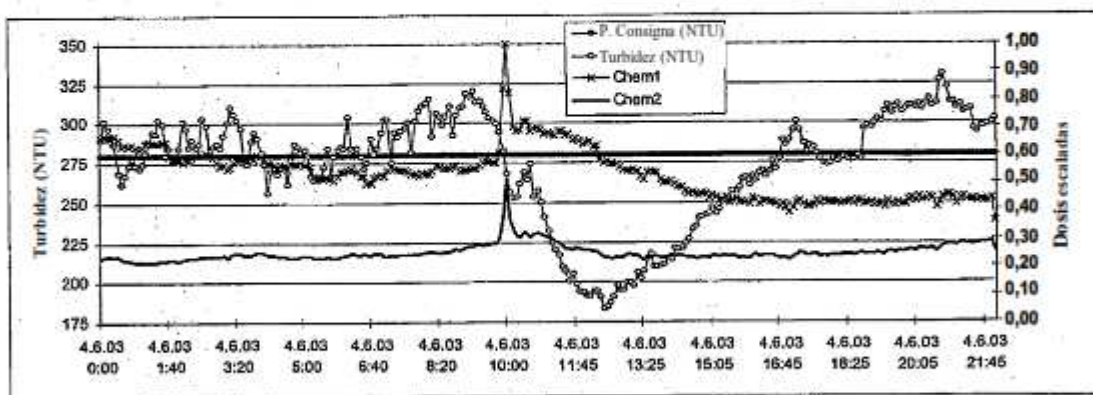


Fig. 14b

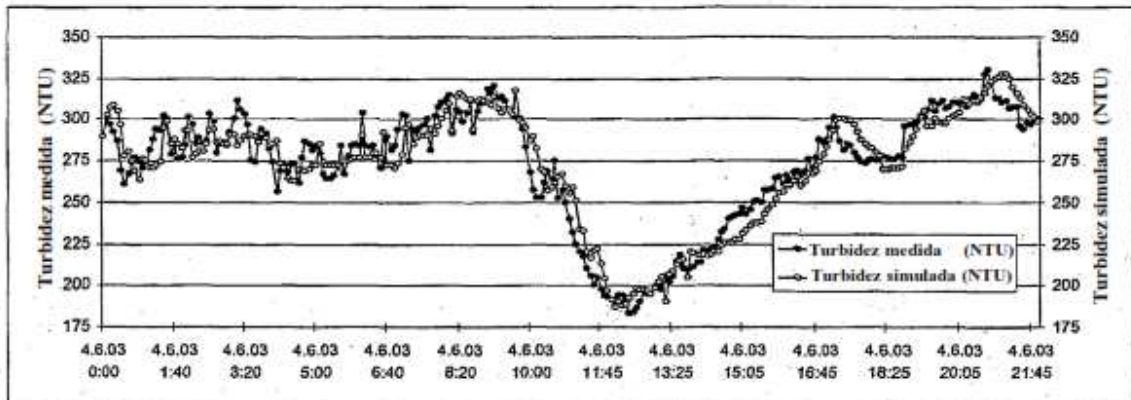


Fig. 14c

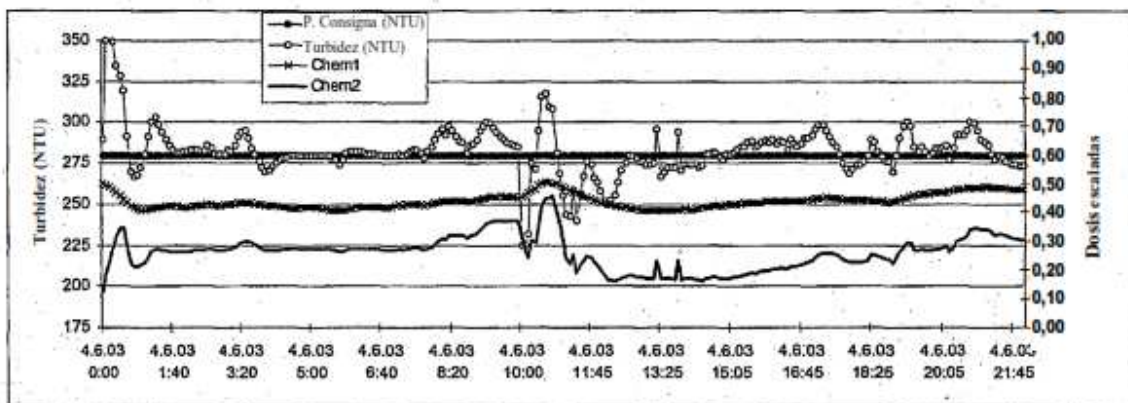


Fig. 14d

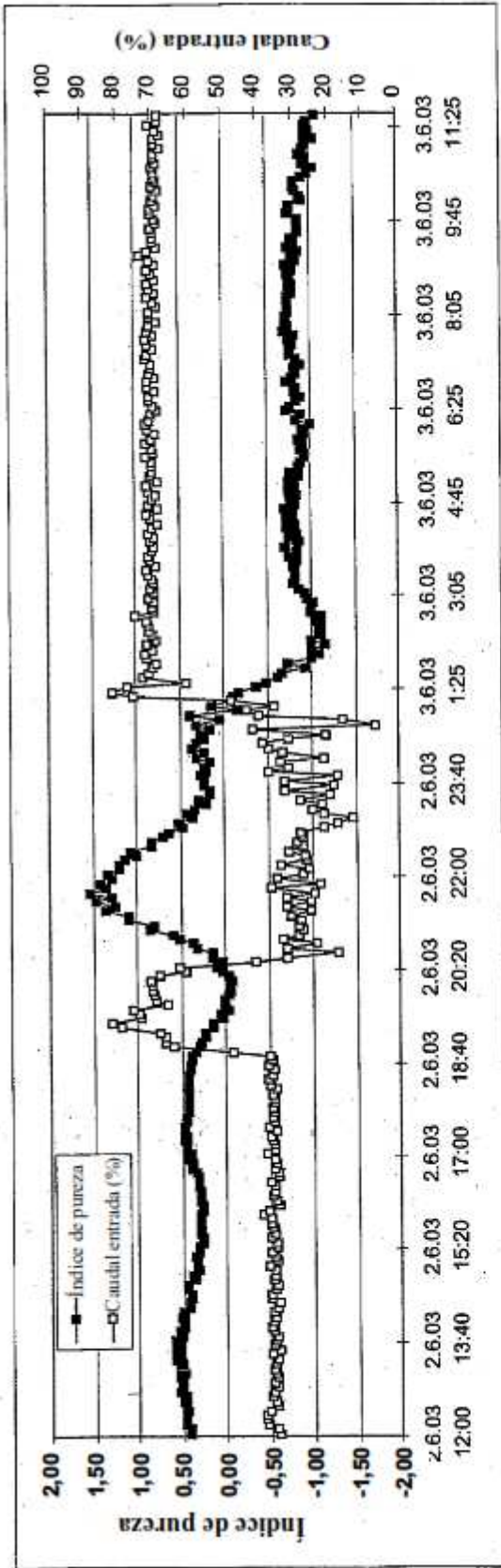


Fig. 15a

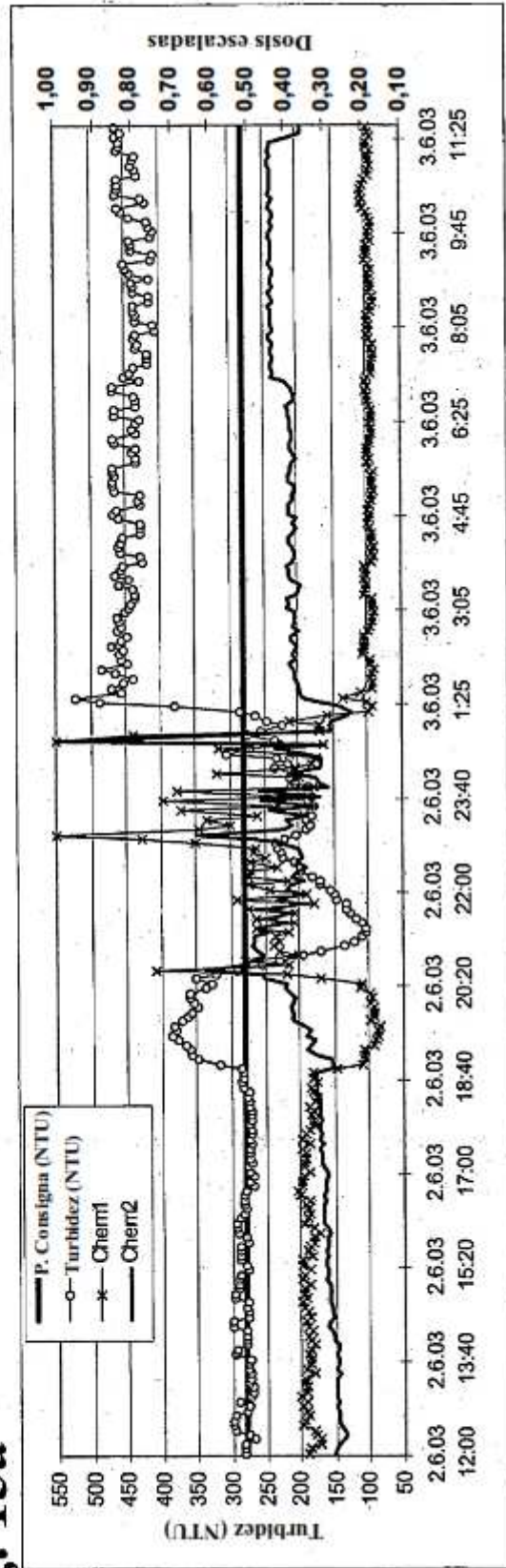


Fig. 15b

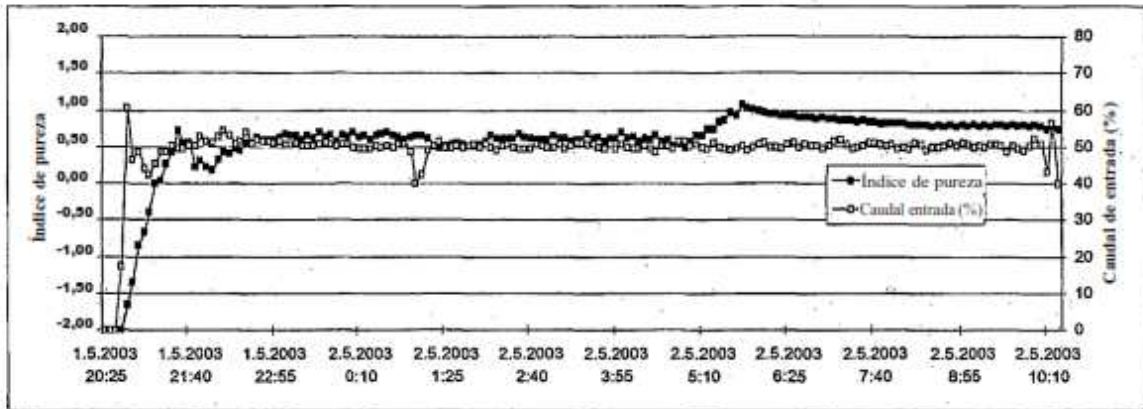


Fig. 16a

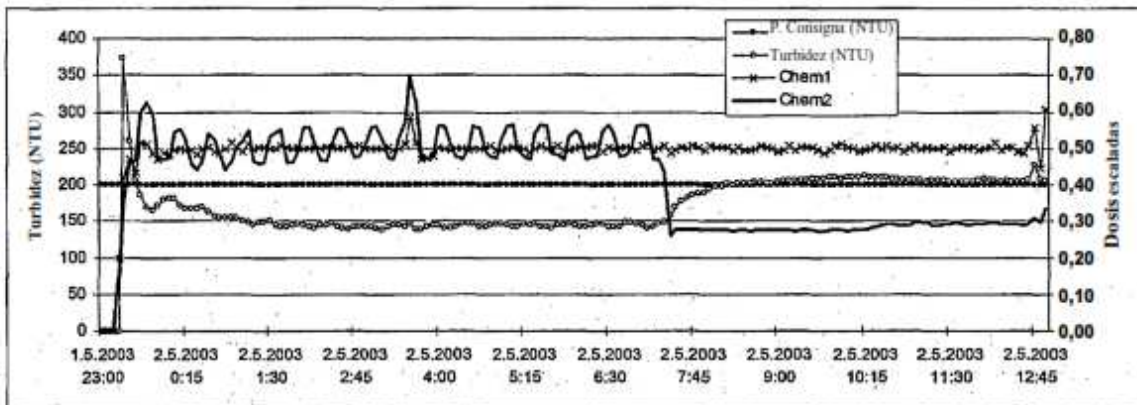


Fig. 16b

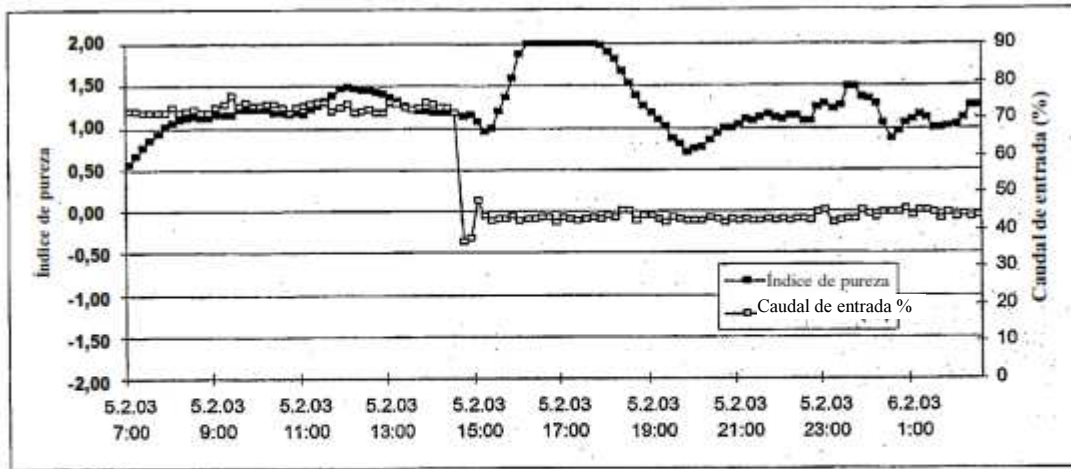


Fig. 17a

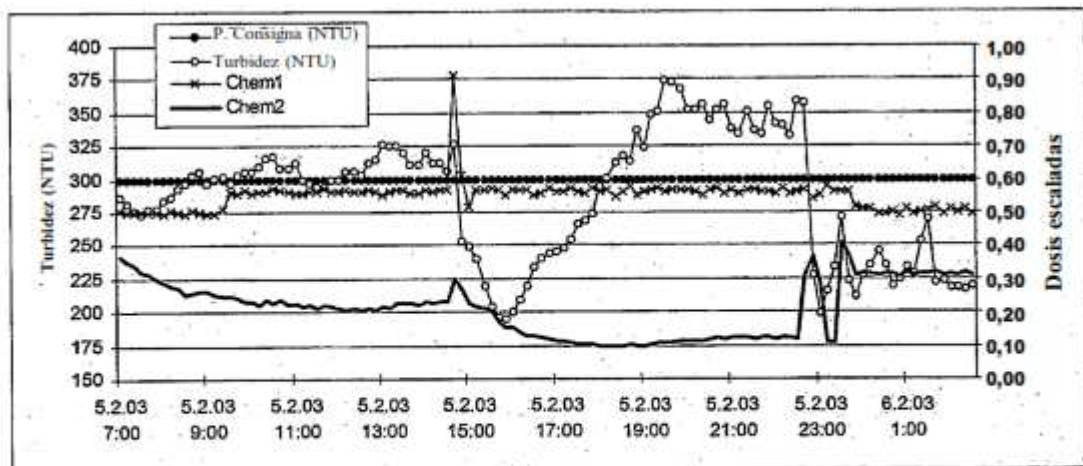


Fig. 17b