

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 606 237**

51 Int. Cl.:

C21C 5/52	(2006.01)
F27D 19/00	(2006.01)
F27D 21/00	(2006.01)
H05B 6/34	(2006.01)
F27B 3/28	(2006.01)
H05B 7/148	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.07.2011 PCT/EP2011/062234**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.01.2013 WO13010575**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2011 E 11740593 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.09.2016 EP 2710156**

54 Título: **Procedimiento y sistema de control para controlar un proceso de fusión**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.03.2017

73 Titular/es:
**ABB RESEARCH LTD. (100.0%)
Affolternstrasse 44
8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es:
**LUNDH, MICHAEL y
ZHANG, XIAOJING**

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 606 237 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 sistema de control para controlar un proceso de fusión

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a un procedimiento y un sistema de control para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico (EAF) que comprende uno o más electrodos para fundir metales o aleaciones metálicas y un agitador electromagnético (EMS) para agitar el material fundido.

10

Antecedentes

La fabricación de acero mediante hornos de arco eléctrico (EAF) es un proceso industrial que necesita mucha energía. Consume una gran cantidad de energía eléctrica y química. Un EAF moderno produce más de 300 toneladas de colada de acero, y puesto que la producción de acero en un EAF requiere una gran cantidad de energía eléctrica y química, el coste energético anual de un horno de este tipo es muy alto. Este es el motivo por el cual el desarrollo más reciente de tecnologías EAF se ha centrado principalmente en reducir el consumo de energía (electricidad y oxígeno) y, por lo tanto, en aumentar la productividad. Además, desde un punto de vista medioambiental, es deseable reducir las emisiones de dióxido de carbono y otras emisiones del EAF.

15

20

Un horno de arco eléctrico típico comprende tres electrodos, un sistema de suministro de energía conectado de manera operativa a los electrodos, y una cámara, normalmente refrigerada con agua cuando tiene un gran tamaño y cubierta por un techo retráctil a través del cual uno o más electrodos de grafito entran en el horno. Además, un horno de arco eléctrico comprende normalmente una estación de agua de refrigeración y al menos una unidad de control conectada de manera operativa al sistema de suministro de energía para controlar el funcionamiento de los electrodos. Los electrodos forman un arco entre el material metálico (por ejemplo, chatarra), que se ha cargado en el EAF, y los electrodos. Por lo tanto, se crea una masa fundida metálica (una carga) que se calienta tanto por la corriente que pasa a través de la masa fundida como por la energía radiante creada por el arco. Un sistema de regulación de electrodos mantiene la corriente y la energía introducida aproximadamente constantes durante la fusión de la carga.

25

30

Los hornos de arco presentan normalmente un patrón de puntos calientes y fríos alrededor del perímetro del crisol, donde los puntos fríos están ubicados entre los electrodos. Los hornos modernos incluyen quemadores de gas en las paredes laterales y los usan para proporcionar energía química a los puntos fríos, lo que hace que el calentamiento de la masa fundida sea más uniforme. También se proporciona energía química adicional a través de medios, por ejemplo lanzas, que inyectan oxígeno y carbono en el horno.

35

Un sistema EMS típico comprende al menos un agitador electromagnético que comprende una bobina agitadora, un sistema de suministro de energía, que comprende un convertidor de frecuencia y un transformador, conectado de manera operativa al agitador, una estación de agua de refrigeración y al menos una unidad de control conectada de manera operativa al sistema de suministro de potencia para controlar el funcionamiento del agitador. La bobina agitadora está montada normalmente fuera de una carcasa de acero del horno. Esta bobina genera un campo magnético que proporciona fuerzas de agitación en la fusión del metal fundido. El agitador funciona usando un campo magnético móvil de baja frecuencia que penetra en la carcasa de acero del horno y que, de este modo, mueve la masa fundida.

40

45

El documento US 2004/244530 A1 da a conocer un procedimiento para controlar las características de la escoria en un control de horno de arco eléctrico. El horno tiene entradas que incluyen un suministro de oxígeno y un suministro de carbono. El procedimiento de controlar las características de la escoria incluye introducir en el horno una carga que va a fundirse, fundir al menos una parte de la carga para producir una masa fundida e introducir oxígeno y carbono en la masa fundida para mejorar la formación de una escoria que presenta condiciones de escoria que incluyen una altura de escoria y una cobertura de escoria. Para controlar mejor las características de la escoria, la escoria se modela y las entradas se controlan para maximizar la energía transferida desde el electrodo a la escoria.

50

El documento US 2007/133651 A1 da a conocer un procedimiento para controlar la espumación de la escoria en un horno de arco eléctrico. El horno comprende al menos una columna de electrodos. Se aplica corriente a la columna de electrodos, lo que hace que se forme un arco entre la punta de la columna de electrodos y la chatarra, provocando que la chatarra se funda. Las impurezas de la chatarra fundida suben a la superficie, formando la escoria. Un medidor determina la distorsión armónica total asociada al sistema. Si la distorsión armónica total es mayor que un valor predeterminado y la chatarra está suficientemente fundida, entonces se añade a la misma un agente espumante.

55

60

La publicación "*Tenova's intelligent arc furnace iEAF - concept and technical overview*" de Clerci et al., publicada por *Steel Times International*, DMG World Media, Lewes, GB, vol. 32, n.º 4, 1 de mayo de 2008, páginas 19 a 23, da a conocer un sistema de automatización basado en mediciones de proceso continuas en tiempo real y en modelos de proceso en línea, desarrollado para el control dinámico y la optimización de los hornos de arco eléctrico.

65

5 El documento US 2004/244530 A1 da a conocer un procedimiento para controlar las características de la escoria en un control de horno de arco eléctrico. El horno tiene entradas que incluyen un suministro de oxígeno y un suministro de carbono. El procedimiento de controlar las características de la escoria incluye introducir en el horno una carga que va a fundirse, fundir al menos una parte de la carga para producir una masa fundida e introducir oxígeno y carbono en la masa fundida para mejorar la formación de una escoria que presenta condiciones de escoria que incluyen una altura de escoria y una cobertura de escoria. Para controlar mejor las características de la escoria, la escoria se modela y las entradas se controlan para maximizar la energía transferida desde el electrodo a la escoria.

10 El documento US 2007/133651 A1 da a conocer un procedimiento para controlar la espumación de la escoria en un horno de arco eléctrico. El horno comprende al menos una columna de electrodos. Se aplica corriente a la columna de electrodos, lo que hace que se forme un arco entre la punta de la columna de electrodos y la chatarra, provocando que la chatarra se funda. Las impurezas de la chatarra fundida suben a la superficie, formando la escoria. Un medidor determina la distorsión armónica total asociada al sistema. Si la distorsión armónica total es mayor que un valor predeterminado y la chatarra está suficientemente fundida, entonces se añade a la misma un agente espumante.

20 La publicación "*Tenova's intelligent arc furnace iEAF - concept and technical overview*" de Clerci et al., publicada por *Steel Times International, DMG World Media*, Lewes, GB, vol. 32, n.º 4, 1 de mayo de 2008, páginas 19 a 23, da a conocer un sistema de automatización basado en mediciones de proceso continuas en tiempo real y en modelos de proceso en línea, desarrollado para el control dinámico y la optimización de los hornos de arco eléctrico.

Resumen

25 Un objeto de la presente divulgación es reducir el tiempo de ciclo total de un EAF y aumentar la producción de hierro. Por lo tanto, el consumo de energía de los electrodos y el agitador, así como la adición de energía química (es decir, oxígeno, carbono y gas de quemador), se reduce, lo cual hace que aumente la productividad del EAF.

30 Por tanto, en un primer aspecto de la presente divulgación se proporciona un procedimiento para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico para fundir un material metálico, donde el procedimiento comprende:

- 35 i) recibir mediciones de al menos una variable de proceso que refleja el proceso de fusión,
- ii) determinar el estado actual del proceso de fusión en función de un modelo del proceso de fusión, un estado anterior del proceso de fusión, una entrada de control anterior y las mediciones de la al menos una variable de proceso,
- iii) determinar una entrada de proceso actual que minimice una propiedad de proceso deseada, donde la determinación comprende minimizar la propiedad de proceso deseada con respecto a todos los valores permitidos de las entradas de proceso y utilizar restricciones relacionadas con el estado actual del proceso de fusión y un estado final deseado del proceso de fusión,
- 40 iv) controlar el proceso de fusión utilizando la entrada de proceso actual para controlar un agitador electromagnético, y
- v) repetir las etapas i) a iv) hasta obtener el estado final deseado del proceso de fusión.

45 La propiedad de proceso deseada es el consumo de energía total del proceso de fusión durante un ciclo de fusión o el tiempo total de un ciclo de fusión.

50 Según una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende además utilizar la entrada de proceso actual para controlar una unidad de suministro de energía de electrodo, una unidad de control de flujo de oxígeno, una unidad de suministro de gas de quemador y una unidad de suministro de material sólido.

55 Según un ejemplo de la invención, el horno de arco eléctrico comprende uno o más electrodos para fundir un material metálico, las entradas de proceso del modelo de estados incluyen además el suministro de energía a los electrodos, la etapa de determinar valores de referencia incluye además determinar valores de referencia de una señal de control para el suministro de energía a los electrodos en función del resultado de la optimización, y la etapa de uso incluye además usar dicha señal de control determinada para el suministro de energía a los electrodos para controlar el suministro de energía a los electrodos.

60 Según un ejemplo adicional de la invención, el horno de arco eléctrico comprende una unidad de inyección dispuesta para suministrar oxígeno a la masa fundida, las entradas de proceso del modelo de estados incluyen además el suministro de oxígeno a la unidad de inyección, la etapa de determinar valores de referencia incluye además determinar valores de referencia de una señal de control para el suministro de oxígeno a la unidad de inyección en función del resultado de la optimización, y la etapa de uso incluye además usar la señal de control para controlar el suministro de oxígeno a la unidad de inyección.

65 Según un ejemplo adicional de la invención, el horno de arco eléctrico comprende al menos un quemador de gas dispuesto para calentar la masa fundida, las entradas de proceso del modelo de estados incluyen además el

suministro de gas de quemador al quemador de gas, la etapa de determinar valores de referencia incluye además determinar valores de referencia de una señal de control para el suministro de gas de quemador al quemador de gas en función del resultado de la optimización, y la etapa de uso incluye además usar la señal de control para controlar el suministro de gas de quemador al quemador de gas.

5 Según un ejemplo adicional de la invención, el horno de arco eléctrico comprende medios para añadir polvo de carbono a la masa fundida, las entradas de proceso del modelo de estados incluyen además el suministro de polvo de carbono a dichos medios, la etapa de determinar valores de referencia incluye además determinar valores de referencia de una señal de control para el suministro de polvo de carbono a dichos medios en función del resultado de la optimización, y la etapa de uso incluye además usar la señal de control para controlar el suministro de polvo de carbono a dichos medios.

15 El objeto de la invención también se consigue mediante el sistema de control, el cual controla un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico caracterizado por que el sistema de control comprende una unidad de control de agitador, conectada de manera operativa a la unidad de suministro de energía del agitador, para controlar el suministro de energía en respuesta a valores de control del suministro de energía al agitador, y al menos un sensor dispuesto para medir el suministro de energía al agitador. El sistema de control comprende además una unidad de procesamiento dispuesta para recibir datos medidos relacionados con las variables de proceso desde el al menos un sensor dispuesto para medir el suministro de energía al agitador y para optimizar el proceso de fusión con respecto al consumo de tiempo y/o de energía según un problema de optimización predefinido que incluye un modelo de estados del proceso de fusión que relaciona unidades de proceso, incluido el suministro de energía al agitador, con al menos un estado del proceso, una función de pérdida sometida a dicho modelo de estados y una condición de partida inicial. La unidad de procesamiento está dispuesta además para determinar el estado actual del proceso de fusión basándose en un estado anterior del proceso de fusión, en una entrada de proceso anterior y en los datos de medición, donde el sistema de control está dispuesto para controlar un agitador electromagnético en función de la entrada de proceso actual y controlar el proceso de fusión, y donde el sistema de control está dispuesto para repetir la determinación de un estado actual del proceso de fusión, la determinación de una entrada de proceso actual que minimiza la propiedad de proceso deseada y el control del agitador electromagnético hasta obtener el estado final deseado del proceso de fusión.

30 Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la presente invención resultarán más evidentes a un experto en la técnica a partir de la siguiente descripción detallada junto con los dibujos adjuntos, en los que:

35 la Fig. 1 muestra una sección transversal de un horno de arco eléctrico según una forma de realización de la invención;
 la Fig. 2 muestra un diagrama de flujo del proceso de fusión según una forma de realización de la invención; y
 40 la Fig. 3 muestra perfiles de fusión posibles, donde la cantidad de acero sólido (x_1) y líquido (x_2) se muestra junto con una de las entradas de proceso (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) que afectan al EAF, según una forma de realización de la invención.

Descripción detallada

45 La Figura 1 ilustra un horno de arco eléctrico (el EAF puede ser un EAF DC o un EAF AC, denominándose en lo sucesivo EAF) dispuesto para fundir material metálico, tal como chatarra, que se carga en el EAF antes de empezar el proceso de fusión. El EAF comprende además uno o más electrodos, una cámara cubierta por un techo retráctil a través del cual entran en el horno el uno o más electrodos de grafito, y un sistema de suministro de energía conectado de manera operativa a los electrodos. Al menos un aparato de agitación electromagnética (denominado agitador en lo sucesivo) de metal fundido en el EAF 1 está dispuesto en una superficie exterior, preferiblemente la superficie inferior, de la cámara del EAF. Un sistema de suministro de energía está conectado de manera operativa al agitador. El sistema de suministro de energía conectado de manera operativa a los electrodos y el sistema de suministro de energía conectado de manera operativa al agitador pueden ser dos sistemas de suministro de energía independientes, pero también puede ser un único sistema con ambas funciones. Al menos una unidad de control, que incluye hardware, una o más unidades de memoria, una o más unidades de procesamiento (es decir, procesadores) y software, está conectada de manera operativa al sistema de suministro de energía para controlar el funcionamiento del agitador. La al menos una unidad de control, dispuesta para controlar la agitación y los electrodos, está conectada de manera operativa al sistema de suministro de energía y también puede conectarse al sistema de suministro de energía para controlar el funcionamiento de los electrodos; no obstante, también puede utilizarse un sistema de control aparte con este fin.

60 El funcionamiento del EAF comienza introduciendo chatarra en el horno, tras lo cual comienza la fusión. Los electrodos descienden hasta llegar a la chatarra y se genera un arco, el cual inicia la fusión de la chatarra. Se seleccionan voltajes más bajos en esta primera parte del funcionamiento para proteger el techo y las paredes del horno contra un calor excesivo y evitar daños producidos por los arcos. Una vez que los electrodos han llegado a la pesada masa fundida en la base del horno y los arcos están protegidos por la escoria, el voltaje puede aumentar y

los electrodos se elevan ligeramente, lo que alarga los arcos y aumenta la energía transferida a la masa fundida. Esto permite que se forme más rápidamente un baño de metal fundido, reduciéndose los tiempos entre coladas. Unidades de inyección están dispuestas en las paredes o en la superficie inferior del EAF para inyectar oxígeno en el metal fundido. Uno o más quemadores de gas están dispuestos en el EAF para proporcionar calor químico adicional a la chatarra y al metal fundido dentro del EAF. Ambos procesos aceleran la fusión de la chatarra. El EAF incluye además medios para inyectar carbono en el metal fundido. El agitador está dispuesto para acelerar el metal fundido, lo cual acelerará adicionalmente la fusión de la chatarra y los tiempos entre coladas.

El concepto de un control de EAF integrado consiste en controlar el EAF de tal manera que el control de la agitación, el control de la unidad de inyección de oxígeno (por ejemplo, una lanza), el control de los quemadores de gas, el control del gas residual y el control del suministro de energía de electrodo estén integrados como una estrategia de control.

Se proporciona un estado inicial en el que el EAF se carga con material metálico (es decir, chatarra) (x_1, x_2 , etc.) para $t=0$, y resolviendo el problema de optimización mostrado a continuación, pueden determinarse valores de referencia para las entradas de proceso u para $0 \leq t \leq t_f$.

$$\min_u t_f \quad (\text{función de pérdida})$$

Sometida a

$$x(k+1) = f_s(x(k), u(k), d(k)) \quad (\text{modelo de estados del proceso de fusión})$$

$$x(t_f) = x_f \quad (\text{condición final / estado final})$$

$$x(0) = x_0 \quad (\text{condición inicial / estado inicial})$$

$$x_l \leq x \leq x_h$$

$$u_l \leq u \leq h_h$$

Tras resolver el problema anterior, el proceso pasará de manera ventajosa desde el estado inicial $x(0)$, que como cualquier estado es normalmente un vector, al estado final deseado en el menor tiempo posible. Por tanto, las entradas de proceso óptimas se determinan en el momento en que comienza la fusión del material metálico. Para cada instante t_k durante el proceso de fusión, la entrada de proceso apropiada $u(t_k)$ se aplica al proceso. Este enfoque se basa en el modelo de estados del proceso de fusión, que relaciona entradas de proceso (tal como el suministro de energía al agitador o a los electrodos, el flujo de oxígeno, el flujo de gas de quemador o el carbono inyectado) con al menos un estado (x) del proceso, una función de pérdida sometida al modelo de estados y una condición de partida inicial, ya que no se utiliza información de respuesta del EAF real. Una vez que se ha definido la condición de partida inicial x_0 se usa para optimizar el proceso de fusión con respecto al consumo de tiempo y/o de energía, que incluye determinar el estado del proceso en función del problema de optimización antes presentado.

Siempre que las mediciones de una o más variables de proceso estén disponibles, puede obtenerse información acerca del estado actual del proceso de fusión mediante estimaciones basadas en las mediciones de la una o más variables de proceso, permitiendo que el procedimiento anterior se repita a intervalos regulares o no regulares hasta obtener un estado deseado del proceso. En una forma de realización, las etapas en cada intervalo son:

A) recopilar o recibir mediciones de al menos una variable de proceso $y(t_k)$ que refleja el proceso de fusión,
 B) determinar el estado actual del proceso mediante estimación, según el modelo de estados, el estado anterior determinado $\hat{x}(t_{k-1})$, la señal de control anterior determinada $u(t_{k-1})$ y las mediciones $y(t_k)$ de la al menos una variable de proceso. Un observador de estados (por ejemplo, un estimador de horizonte móvil o un filtro Kalman extendido) puede usarse para determinar una estimación del estado actual $\hat{x}(t_k)$ del proceso de fusión.

C) Resolver el problema de optimización anterior con respecto al consumo de tiempo y/o de energía usando el estado actual estimado $\hat{x}(t_k)$ como la condición de partida para la optimización. El resultado de esta optimización serán valores de referencia de las señales de control (entradas de proceso) $u(t)$ para $t_k \leq t \leq t_f$. Aplicar la primera señal de control del valor de referencia obtenido, $u(t_k)$, al proceso.

D) Determinar valores de referencia de una señal de control para la entrada de proceso (u_x) en función del resultado de la optimización del proceso de fusión.

E) usar la señal de control para controlar la entrada de proceso (u_x) y, por tanto, el proceso de fusión.

F) Repetir este procedimiento (etapas A-E) durante el proceso hasta obtener un estado deseado $x(t_f)$ del proceso. En cada iteración, el estado estimado $\hat{x}(t_k)$ sustituye el estado inicial x_0 . Por tanto, en cada iteración $\hat{x}(t_k) = x_{tk}$ se fija como la condición inicial.

Una vez que se ha obtenido el estado deseado del proceso, el metal fundido se cuele desde el EAF para un procesamiento adicional, por ejemplo un proceso de colada continuo.

Posibles entradas de proceso y variables de proceso de un EAF controlado se muestran en las tablas siguientes.

Entrada de proceso (u_x) Descripción

5	u1	Suministro de energía al agitador/Potencia de EMS
	u2	Suministro de energía a los electrodos/Potencia del arco eléctrico
	u3	Flujo de oxígeno (a través de una unidad de inyección, por ejemplo una lanza)
	u4	Flujo de gas de quemador (oxígeno + combustible)
10	u5	Carbón inyectado

Ejemplos de variables de proceso se enumeran en la siguiente tabla.

VARIABLES DE PROCESO Descripción

15	y1	Temperatura de gas de combustión
	y2	Concentración de gas de combustión
	y3	Temperatura de agua de refrigeración (agitador y/u horno)
	y4	Temperatura de pared
20	y5	Temperatura de fusión (si es posible)

Si las variables de proceso $d(t)$ son funciones conocidas en el tiempo, es posible calcular valores para las variables de control $u(t)$ que minimicen el consumo de energía o de tiempo del proceso de fusión.

25 En el caso del control predictivo de modelo (MPC)/información de respuesta, es decir, cuando se usa un estimador de horizonte móvil, ejemplos de variables de proceso $d(k)$ son señales medibles que afectan al proceso pero que no se determinan en la optimización. Por ejemplo, tales señales pueden ser perturbaciones medibles asociadas al proceso de fusión.

30 Ejemplos del estado actual del proceso son al menos uno los estados enumerados en la siguiente tabla.

Estado Descripción

	x1	Cantidad de material metálico sólido (kg)
35	x2	Cantidad de material metálico líquido (kg)
	x3	Carbono disuelto en material metálico (kg)
	x4	Silicio disuelto en material metálico (kg)
	x5	Cantidad de escoria sólida (kg)
	x6	Cantidad de escoria líquida (kg)
40	x7	Cantidad de FeO en la escoria (kg)
	x8	Cantidad de SiO ₂ en la escoria (kg)
	x9	Concentración de monóxido de carbono (kg) en gas de combustión
	x10	Concentración de dióxido de carbono (kg) en gas de combustión
	x11	Nitrógeno en fase gaseosa (kg)
45	x12	Temperatura de sólido (K)
	x13	Presión relativa del horno (Pa)

50 Por lo general, los ahorros de energía relacionados con la tecnología EAF pueden dividirse en dos tipos, por ejemplo mejoras en procesos metalúrgicos, tales como el suministro de oxígeno, el precalentamiento de la chatarra, la postcombustión y la agitación de los gases del fondo, o en procesos EAF y la automatización de las operaciones, por ejemplo la regulación de los electrodos o el control de la fusión.

55 Un componente principal de la escoria del EAF es óxido de hierro procedente de la combustión del acero con el oxígeno inyectado. Posteriormente, con el calor, se inyecta carbono (en forma de coque o carbón) en esta capa de escoria, reaccionando con el óxido de hierro para formar hierro metálico y gas de monóxido de carbono, lo que hace que la escoria se espume, permitiendo una mayor eficacia térmica, una mejor estabilidad del arco y una mayor eficiencia eléctrica. Una vez que se obtiene un baño plano, es decir, la chatarra se ha fundido completamente, se llevan a cabo operaciones de refinado para comprobar y corregir la química del acero y sobrecalentar la masa fundida por encima de su temperatura de congelación como preparación a la colada. Se introducen más sustancias formadoras de escoria y se suministra más oxígeno al baño, quemando impurezas tales como silicio, sulfuro, fósforo, aluminio, magnesio y calcio, y añadiendo sus óxidos a la escoria. La extracción del carbono tiene lugar después de estos elementos se hayan quemado primero, ya que son más afines con el oxígeno. Metales que tienen una menor afinidad con el oxígeno que el hierro, tales como el níquel y el cobre, no pueden eliminarse por medio de la oxidación y deben controlarse solamente a través de la química de la chatarra, por ejemplo introduciendo hierro reducido directo y arrabio. En todo momento se mantiene una escoria espumosa, la cual sobresale del horno para verterse en el pozo de escoria a través de la compuerta de escoria.

Dicho de otro modo, el concepto inventivo proporciona un procedimiento para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico, donde el procedimiento comprende las etapas de:

- 5 i) recibir datos de medición de al menos una variable de proceso asociada al proceso de fusión,
 ii) determinar el estado actual del proceso de fusión en función de un estado anterior del proceso de fusión,
 una entrada de proceso anterior y los datos de medición,
 iii) determinar una entrada de proceso actual que minimice una propiedad de proceso deseada, donde la
 10 determinación comprende minimizar la propiedad de proceso deseada con respecto a todos los valores
 permitidos de las entradas de proceso y utilizar restricciones relacionadas con el estado actual del proceso de
 fusión y un estado final deseado del proceso de fusión, y
 iv) controlar el proceso de fusión en función de la entrada de proceso actual.

15 Preferiblemente, las etapas anteriores se repiten, es decir, iteran, hasta que el estado actual del proceso de fusión sea igual o casi igual al estado final deseado del proceso de fusión.

En una forma de realización, la iteración de las etapas i-iv se realiza una vez por minuto. También se concibe que la iteración de las etapas i-iv pueda realizarse a intervalos más largos, por ejemplo una vez cada cinco minutos, cada diez minutos o solo muy pocas veces durante un ciclo de fusión.

20 Una propiedad de proceso puede ser, por ejemplo, el consumo de energía total del proceso de fusión durante un ciclo de fusión o el tiempo total de un ciclo de fusión. Una propiedad de proceso puede ser también, por ejemplo, el tiempo total hasta que casi el 100% del metal esté en forma líquida en el horno de arco eléctrico.

25 En formas de realización en las que la propiedad de proceso es el consumo de energía total del proceso de fusión, el consumo de energía total puede minimizarse en función del siguiente problema de minimización.

$$\min_u P^{\text{tot}}_f \quad (\text{función de pérdida})$$

30 Sometida a

$$x(k+1) = f_s(x(k), u(k), d(k)) \quad (\text{modelo de estados del proceso de fusión})$$

$$x(t_f) = x_f \quad (\text{condición final / estado final})$$

$$x(0) = x_0 \quad (\text{condición inicial / estado inicial})$$

35 $x_l \leq x \leq x_h$
 $u_l \leq u \leq h_h$

40 Preferiblemente, el proceso de control antes descrito está dispuesto para generar una pluralidad de entradas de proceso, tales como las entradas de proceso u1-u5 para controlar varios parámetros de proceso, como se ha descrito anteriormente.

Además, se proporciona un sistema de control para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico (EAF) para fundir un material metálico, donde el sistema de control comprende:

- 45 una pluralidad de sensores dispuestos para detectar variables de proceso respectivas del proceso de fusión,
 y
 una unidad de procesamiento dispuesta para:

- 50 recibir las variables de proceso detectadas por la pluralidad de sensores;
 determinar el estado actual del proceso de fusión en función de un estado anterior del proceso de fusión, una entrada de proceso anterior y los datos de medición;
 determinar una entrada de proceso actual que minimice una propiedad de proceso deseada, donde la determinación comprende minimizar la propiedad de proceso deseada con respecto a todos los valores permitidos de las entradas de proceso y utilizar restricciones relacionadas con el estado actual
 55 del proceso de fusión y un estado final deseado del proceso de fusión;

donde el sistema de control está dispuesto para controlar el proceso de fusión basándose en la entrada de proceso actual.

60 En particular, el sistema de control controla parámetros de proceso del proceso de fusión. Tales parámetros pueden controlarse, por ejemplo, por medio de la unidad de suministro de energía de agitador 8 para controlar el agitador

electromagnético, la unidad de suministro de energía de electrodo 13, la unidad de control de flujo de oxígeno 16, la unidad de suministro de gas de quemador 17 y la unidad de suministro de material sólido 20.

5 El alcance de la invención no está limitado a las formas de realización presentadas, sino que incluye además formas de realización evidentes para un experto en la técnica.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico para fundir un material metálico, donde el procedimiento comprende:
- 6 i) recibir mediciones de al menos una variable de proceso que refleja el proceso de fusión,
 - 7 ii) determinar el estado actual del proceso de fusión en función de un modelo del proceso de fusión, un estado anterior del proceso de fusión, una entrada de control anterior y las mediciones de la al menos una variable de proceso,
 - 8 iii) determinar una entrada de proceso actual que minimice una propiedad de proceso deseada, donde la determinación comprende minimizar la propiedad de proceso deseada con respecto a todos los valores permitidos de las entradas de proceso y utilizar restricciones relacionadas con el estado actual del proceso de fusión y un estado final deseado del proceso de fusión,
 - 9 iv) controlar el proceso de fusión utilizando la entrada de proceso actual para controlar un agitador electromagnético, y
 - 10 v) repetir las etapas i) a iv) hasta obtener el estado final deseado del proceso de fusión.
- 11 2. El procedimiento según la reivindicación 1, que comprende utilizar la entrada de proceso actual para controlar una unidad de suministro de energía de electrodo (13), una unidad de control de flujo de oxígeno (16), una unidad de suministro de gas de quemador (17) y una unidad de suministro de material sólido (20).
- 12 3. El procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el que la propiedad de proceso deseada es el consumo de energía total del proceso de fusión durante un ciclo de fusión o el tiempo total de un ciclo de fusión.
- 13 4. Un sistema de control para controlar un proceso de fusión en un horno de arco eléctrico para fundir un material metálico, donde el sistema de control comprende:
- 14 una pluralidad de sensores dispuestos para detectar variables de proceso respectivas del proceso de fusión,
 - 15 y
 - 16 una unidad de procesamiento dispuesta para:
 - 17 recibir las variables de proceso detectadas por la pluralidad de sensores;
 - 18 determinar el estado actual del proceso de fusión en función de un estado anterior del proceso de fusión, una entrada de proceso anterior y los datos de medición;
 - 19 determinar una entrada de proceso actual que minimice una propiedad de proceso deseada, donde la determinación comprende minimizar la propiedad de proceso deseada con respecto a todos los valores permitidos de las entradas de proceso y utilizar restricciones relacionadas con el estado actual del proceso de fusión y un estado final deseado del proceso de fusión;
 - 20 donde el sistema de control está dispuesto para controlar un agitador electromagnético en función de la entrada de proceso actual para controlar el proceso de fusión, y
 - 21 donde el sistema de control está dispuesto para repetir la determinación de un estado actual del proceso de fusión, la determinación de una entrada de proceso actual que minimiza la propiedad de proceso deseada y el control del agitador electromagnético hasta obtener el estado final deseado del proceso de fusión.
- 22 5. El sistema de control según la reivindicación 4, donde el sistema de control utiliza la entrada de proceso actual para controlar una unidad de suministro de energía de electrodo (13), una unidad de control de flujo de oxígeno (16), una unidad de suministro de gas de quemador (17) y una unidad de suministro de material sólido (20).
- 23 6. El sistema de control según la reivindicación 4 o 5, en el que la propiedad de proceso deseada es el consumo de energía total del proceso de fusión durante un ciclo de fusión o el tiempo total de un ciclo de fusión.

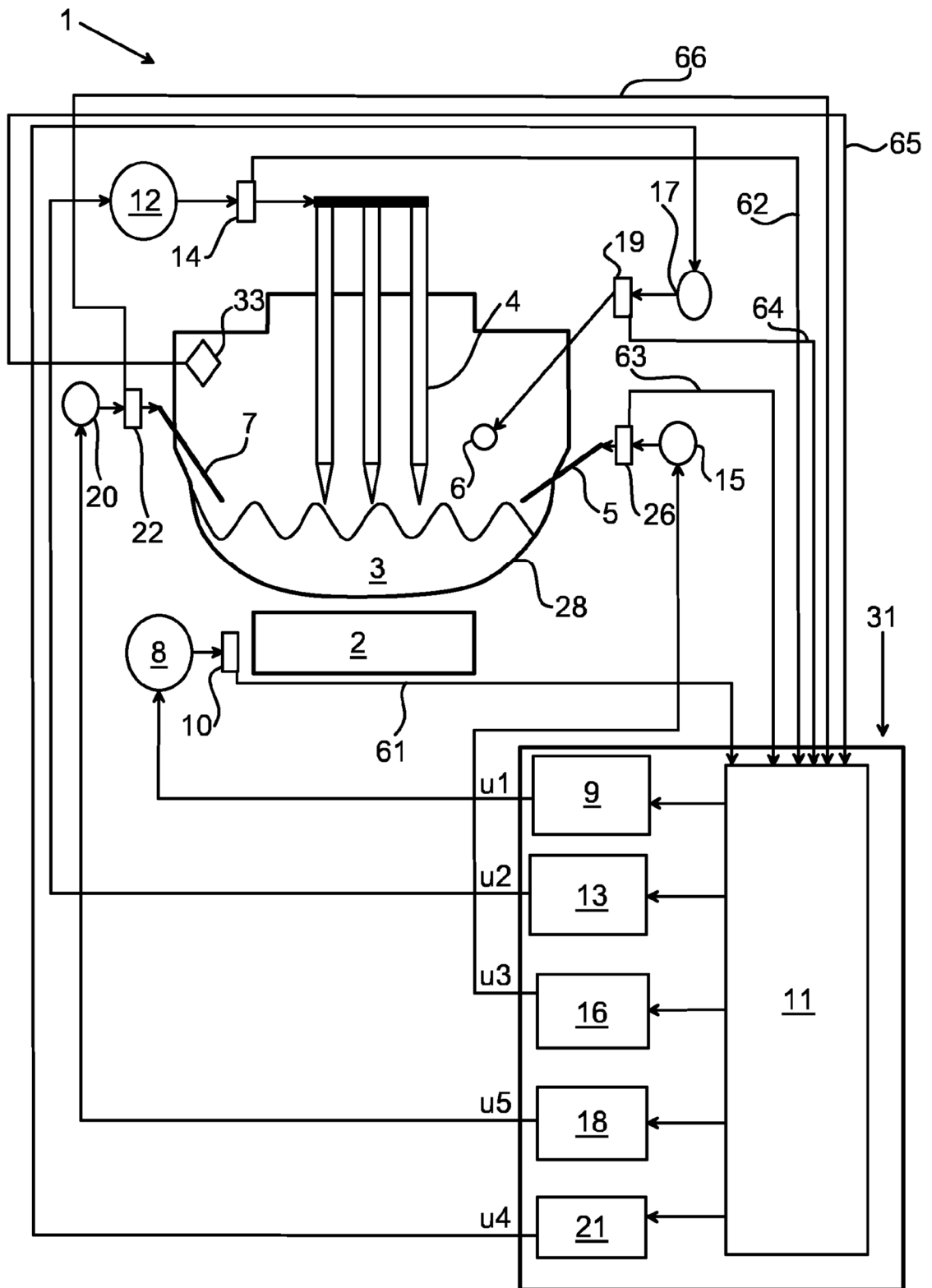


Fig. 1

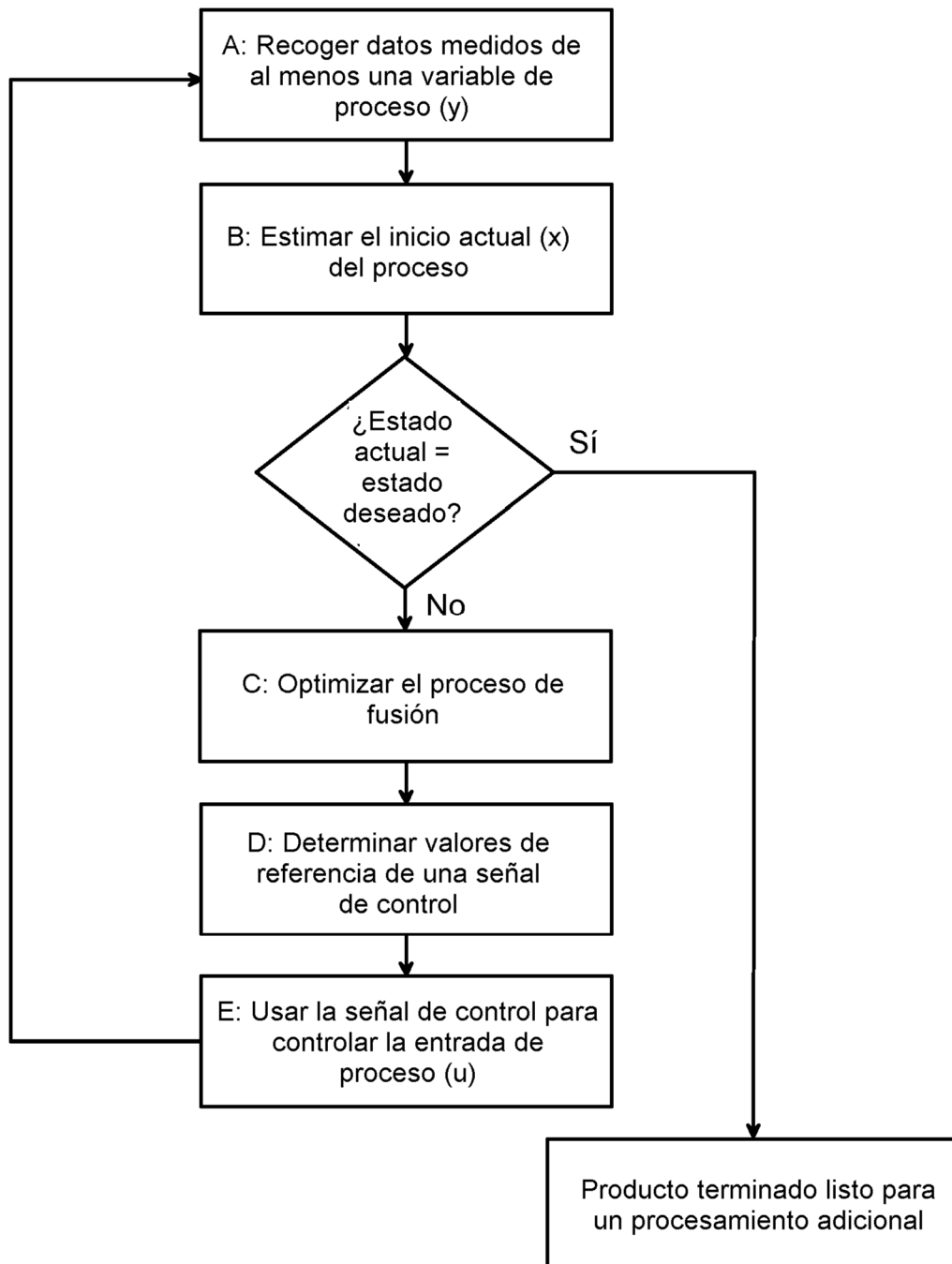


Fig. 2

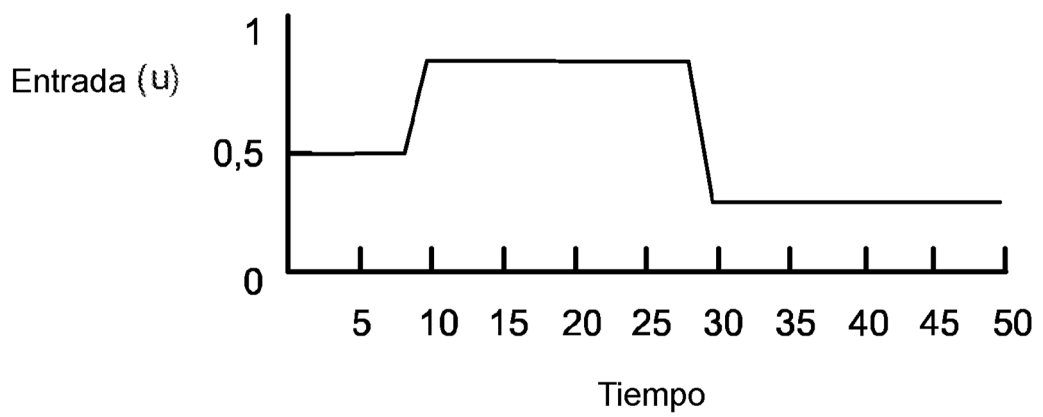
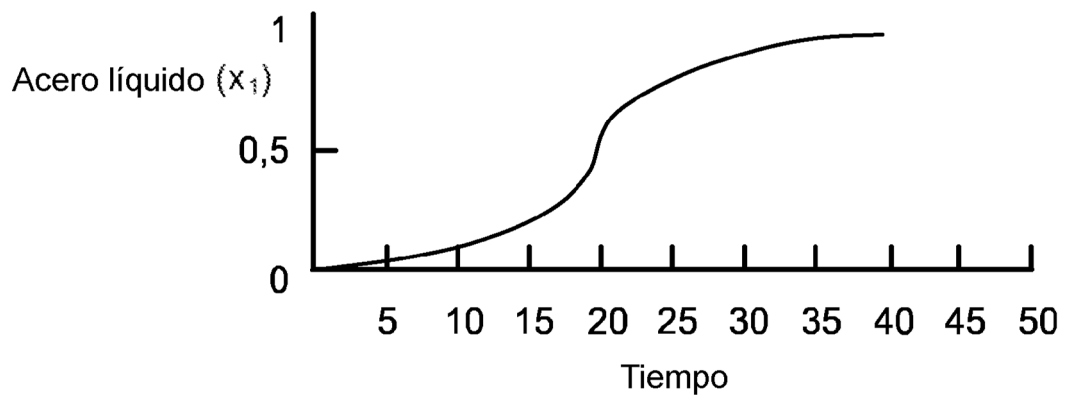
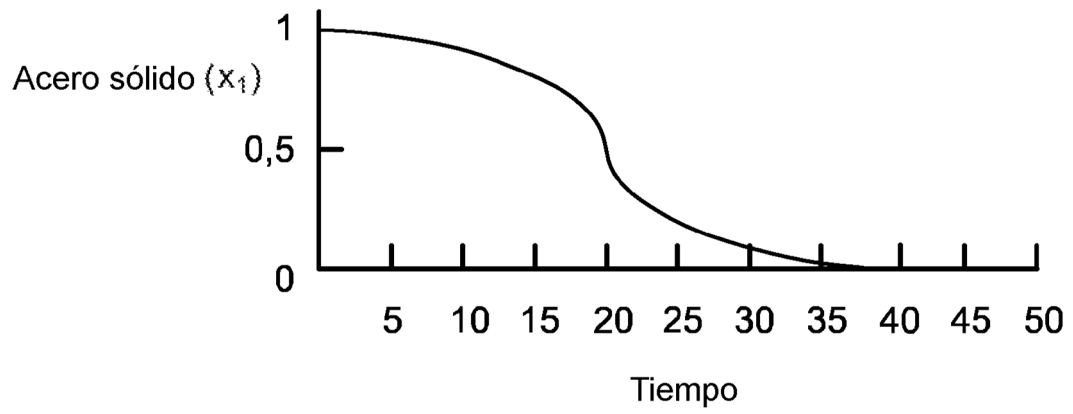


Fig. 3