



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0918984-0 B1



(22) Data do Depósito: 21/09/2009

(45) Data de Concessão: 19/05/2020

(54) Título: MÉTODO E SISTEMA PARA CONTROLAR UM PROCESSO INDUSTRIAL

(51) Int.Cl.: G05B 13/04.

(30) Prioridade Unionista: 23/09/2008 EP 08164844.6.

(73) Titular(es): ABB RESEARCH LTD.

(72) Inventor(es): KONRAD STADLER; EDUARDO GALLESTEY ALVAREZ; JAN POLAND.

(86) Pedido PCT: PCT EP2009062175 de 21/09/2009

(87) Publicação PCT: WO 2010/034682 de 01/04/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 23/03/2011

(57) Resumo: MÉTODO E SISTEMA PARA CONTROLAR UM PROCESSO INDUSTRIAL A presente invenção refere-se a um sistema de controle (4) para controlar um processo industrial (42) que compreende um gerador indicador (43) configurado para determinar pelo menos um indicador de lógica fuzzy (z) a partir das variáveis medidas do processo (y). O sistema de controle (4) compreende ainda um estimador de estado (44) configurado para determinar estados físicos estimados do processo (x) com base no indicador difuso (z). Para controlar o processo industrial (42), o controlador do processo (41) é configurado para calcular variáveis manipuladas (u) com base em pontos de ajuste definidos (r) e baseados em um modelo físico do processo (42) usando os estados estimados físicos do processo (x). Combinar um indicador de lógica fuzzy (z) com um controlador de processo baseado em modelo (41) torna possível fornecer indicadores robustos dos estados do processo (x) para controlar um processo industrial (42) em uma situação de variáveis do processo (y) medidas em instalação real que possivelmente se contradizem.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO E SISTEMA PARA CONTROLAR UM PROCESSO INDUSTRIAL**".

Campo da Invenção

[0001] A presente invenção refere-se a um sistema e a um método de controle para controlar um processo industrial. Especificamente, a invenção se refere a um sistema e a um método de controle para controlar um processo industrial, como a operação de um forno rotativo em um processo de produção de cimento, por meio do cálculo de variáveis manipuladas baseadas em pontos de ajuste definidos e um indicador de lógica fuzzy determinado a partir de variáveis medidas do processo.

Antecedentes da Invenção

[0002] No controle de processo avançado para processos industriais, muitas configurações diferentes de sistema, referentes ao algoritmo de controle, são conhecidas. No entanto, conforme ilustrado na Figura 3, de acordo com especificações do usuário (pontos de ajuste r) todos os sistemas geram pontos de ajuste para um conjunto de atuadores (variáveis manipuladas, u) que levam em conta medições feitas em um conjunto de sensores (variáveis do processo, y). Tipicamente, nem todas as variáveis y desejadas do processo podem ser medidas e, conseqüentemente, são usados geradores de indicador 33 para determinar os indicadores de processo z em aproximação destas medições que estão faltando. Conforme ilustrado de maneira esquemática na Figura 3, os indicadores z são determinados com base em uma ou mais das variáveis do processo y_2 e/ou variáveis manipuladas u_2 .

[0003] Por exemplo, no processo de produção de cimento, os componentes em estado natural e as misturas em estado natural são transportados desde os alimentadores até um forno, envolvendo possivelmente trituradores adicionais, alimentadores que fornecem

aditivos adicionais à mistura em estado natural, correias de transporte, instalações para armazenamento e similares. Conforme ilustrado na Figura 1, o forno 1 é dotado de uma inclinação e montado de tal maneira que ele possa ser girado em torno de seu eixo longitudinal central. A mistura em estado natural (farinha) 11 é introduzida no topo (extremidade de alimentação ou posterior) 12 do forno 1 e é transportada sob a força da gravidade descendentemente pelo comprimento do forno 1 até uma abertura de saída (extremidade de descarga ou frontal) 13 no fundo. O forno 1 opera a temperaturas da ordem de 1.000 graus Celsius. Conforme a mistura em estado natural passa através do forno, a mistura em estado natural é calcinada (reduzida, em termos químicos). A água e o dióxido de carbono são expelidos, acontecem reações químicas entre os componentes da mistura em estado natural e os componentes da mistura em estado natural se fundem para formar o que é conhecido como clínquer 14. No curso dessas reações, novos compostos são formados. A temperatura de fusão depende da composição química dos materiais de alimentação e do tipo e da quantidade de fluxos que estão presentes na mistura. Os fluxos principais são alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), que permitem que as reações químicas ocorram a temperaturas relativamente mais baixas.

[0004] As condições ambientais da produção de clínquer (até 2500°C, com pó, em rotação) não tornam possível a medição direta do perfil de temperatura 10 ao longo do comprimento de um forno rotativo 1. Tipicamente, a temperatura da zona de queima Y_{BZT} é usada como o indicador nos sistemas atuais e pelos operadores de um forno de cimento rotativo 1. A condição de sinterização ou a temperatura da zona de queima Y_{BZT} está relacionada, usualmente, a uma medição ou a uma combinação de diversas das seguintes medições:

- o torque (ou potência) necessário para girar o forno 1

(Y_{Torque});

- medições de NO_x no gás de exaustão (Y_{NOx}); e
- leituras de temperatura baseadas em um pirômetro localizado na abertura de saída (extremidade de descarga ou frontal) 13 do forno 1 (Y_{Pyro}),

- conforme a farinha quente se torna mais pegajosa a temperaturas mais altas, o torque necessário para girar aumenta porque mais e mais material é arrastado para a lateral do forno. A temperatura do gás pode ser relacionada aos níveis de NO_x no gás de exaustão. No entanto, as três medições não são confiáveis. Por exemplo, a condição variável de poeira influenciará de modo significativo as leituras do pirômetro, já que o pirômetro é direcionado, com frequência, para as “sombras”, que produzem falsas leituras. No entanto, a agregação das três medições, conforme definido na equação (1), usualmente proporciona uma determinação razoavelmente confiável da temperatura da zona de queima Y_{BZT}

$$Y_{BZT} = f(Y_{Torque}, Y_{NOx}, Y_{Pyro}) \quad (1)$$

[0005] Onde f é uma descrição de como Y_{BZT} se relaciona às medições do sensor. Tipicamente, a função f é descrita por um sistema de lógica fuzzy (com frequência chamado sistema especialista) executado por um gerador indicador. Este indicador é, deste modo, um indicador baseado em lógica fuzzy, por exemplo, um valor inteiro na escala [-3, +3] correspondente a uma indicação de [frio...quente], isto é, um indicador difuso da temperatura da zona de queima agregada, mas não um valor da temperatura física real (em °C ou °F).

[0006] Embora a agregação das três medições forneça a temperatura da zona de queima como um indicador razoavelmente confiável da temperatura da zona de queima, ela não fornece o perfil de temperatura ao longo de todo o comprimento do forno rotativo. No entanto, o conhecimento do perfil da temperatura tornaria possível

melhores predições do processo, levando a um controle aprimorado do processo.

[0007] Em outro exemplo, um processo de moagem úmido pode requerer circuitos de moagem com diferentes configurações, dependendo das características do minério, da capacidade da instalação de projeto, etc. Conforme ilustrado na Figura 2, o circuito de moagem 2 compreenderá, tipicamente, diversos moinhos (haste, esfera, SAG, AG) 21, 22 em série e/ou em paralelo com uma série de classificadores (hidrociclones) 23 e fossas 24 em locais apropriados. Tipicamente, a disposição é uma onde uma das correntes que deixam o classificador 23 é conduzida de volta através de uma bomba 25 até uma fossa 24 ou até outro moinho 21, 22 para processamento adicional, enquanto a outra é eliminada do circuito 2. Um classificador terá a tarefa de selecionar o produto final. Normalmente, é adicionada água 26 às fossas 24, com alimentação fresca 20 entrando no sistema. O meio de moagem é introduzido no sistema continuamente com base na estimativa de sua carga nos moinhos 21, 22. A meta da seção de moagem é reduzir o tamanho da partícula de minério até níveis adequados para processamento no estágio de flotação. Variáveis mensuráveis do processo podem incluir nível de som do moinho, pressão do mancal de moagem, potência de extração do moinho, densidade da pasta semifluida, e fluxos e pressões em lugares críticos. Variáveis controláveis a serem manipuladas incluem taxa de alimentação fresca, fluxo de água do processo (taxa de bombeamento), e velocidade rotacional do(s) moinho(s). Os alvos do processo incluem especificação do tamanho da partícula, carga alvo de circulação, e limites de pressão do mancal. Assim, com base nas variáveis mensuráveis do processo e/ou nas variáveis controláveis, um ou mais indicadores precisam ser determinados para o controle do processo de moagem. É crucial ser capaz de ter uma taxa de produto constante

dentro das especificações de qualidade. Também é crucial ser capaz de executar esta etapa do processo com o menor consumo possível de energia e de meio de moagem.

Descrição da Invenção

[0008] É, portanto, um objetivo da presente invenção proporcionar um sistema de controle e um método de controle adequados para o controle de um processo industrial em uma situação de instalação real onde os sinais disponíveis, que representam as medições de variáveis do processo, possivelmente se contradizem, o que os torna inúteis em um sistema de controle baseado no modelo convencional. Particularmente, é um objetivo da presente invenção proporcionar um sistema de controle e um método de controle que proporcionem indicadores robustos (confiáveis) do estado de um forno rotativo de cimento, que possam ser usados para gerar um perfil de temperatura do forno rotativo. Além do mais, é um objetivo particular da presente invenção proporcionar um sistema de controle e um método de controle que proporcionem um indicador robusto de um estado de moagem de um sistema de moinho.

[0009] Pelo menos alguns destes objetivos são atingidos por um método de controle para controlar um processo industrial e um sistema de controle para controlar um processo industrial, de acordo com a invenção. Outras modalidades preferidas são evidentes a partir das concretizações.

[00010] Para controlar um processo industrial, uma pluralidade de variáveis do processo são medidas, pelo menos um indicador baseado em lógica fuzzy (abreviando: indicador de lógica fuzzy) é determinado a partir das variáveis medidas do processo e, para controlar o processo, variáveis manipuladas são calculadas com base em pontos de ajuste definidos e no indicador de lógica fuzzy. Por exemplo, o indicador de lógica fuzzy é determinado com o uso de uma rede neural ou de um

método de aprendizagem estatístico.

[00011] De acordo com a presente invenção, os objetivos mencionados acima são particularmente atingidos pelo fato de que os estados estimados do processo são determinados com base no indicador de lógica fuzzy e as variáveis manipuladas são calculadas por um controlador baseado em um modelo do processo que utiliza os estados estimados do processo. Especificamente, determinados são os estados de processo *físicos* estimados baseados no indicador de lógica fuzzy e as variáveis manipuladas são calculadas por um controlador baseado em um modelo *físico* do processo que utiliza os estados de processo *físicos* estimados. Por exemplo, o controlador é um Controlador de Modelo Preditivo (MPC). Por exemplo, os estados estimados do processo são determinados por um dentre um filtro Kalman, observador do estado e um método de estimativa de horizonte movente.

[00012] Por exemplo, o processo industrial refere-se à operação de um forno rotativo, por exemplo, para um processo de produção de cimento. Correspondentemente, a medição das variáveis do processo inclui a medição do torque necessário para girar o forno, a medição do nível de NO_x no gás de exaustão, e a tomada de leituras do pirômetro em uma abertura de saída do forno. Uma temperatura da zona de queima é determinada como um indicador de lógica fuzzy baseado no torque, no nível de NO_x e nas leituras do pirômetro. Um perfil de temperatura ao longo de um eixo longitudinal do forno é determinado como o estado de processo estimado baseado na temperatura da zona de queima e as variáveis manipuladas são calculadas com base no perfil de temperatura.

[00013] Em uma modalidade, o indicador de lógica fuzzy é baseado nas variáveis medidas do processo e em uma ou mais das variáveis manipuladas.

[00014] Em outra modalidade, os estados estimados do processo são determinados com base no indicador de lógica fuzzy, em uma ou mais das variáveis do processo e/ou em uma ou mais das variáveis manipuladas.

Breve Descrição dos Desenhos

[00015] A presente invenção será explicada em mais detalhes, à guisa de exemplo, com referência aos desenhos em que:

[00016] A Figura 1 mostra uma ilustração esquemática de um forno rotativo convencional e um gráfico de um perfil de temperatura ao longo do forno.

[00017] A Figura 2 mostra um diagrama de bloco que ilustra um circuito de moagem convencional para executar um processo de moagem úmido.

[00018] A Figura 3 mostra um diagrama de bloco que ilustra um sistema de controle convencional para controlar um processo industrial, sendo que o sistema compreende um gerador indicador ligado ao controlador do processo.

[00019] A Figura 4 mostra um diagrama de bloco que ilustra um exemplo de um sistema de controle, de acordo com a invenção, para controlar um processo industrial, sendo que o sistema compreende um estimador de estado que liga o gerador indicador a um controlador do processo baseado no modelo.

Descrição Detalhada de Modalidades Preferidas

[00020] A Figura 3 mostra um sistema de controle convencional 3 que compreende um controlador de processo 31 para controlar um processo industrial 32 baseado em pontos de ajuste r definidos pelo usuário.

[00021] O sistema de controle 3 compreende adicionalmente um gerador indicador 33 que compreende um sistema de lógica fuzzy ou um sistema especialista. O gerador indicador 33 é configurado para

gerar um indicador de lógica fuzzy z baseado em um conjunto y_2 de variáveis y e medidas do processo e/ou baseado em um conjunto u_2 das variáveis u manipuladas, geradas pelo controlador de processo 31 para controlar o processo industrial 32. O indicador de lógica fuzzy z é alimentado de volta no controlador do processo 31 que é configurado como um sistema de lógica fuzzy ou sistema especialista para derivar os pontos de ajuste das variáveis u manipuladas baseadas no indicador de lógica fuzzy z .

[00022] Por exemplo, em um processo de produção de cimento, especificamente na operação de um forno rotativo 1 em um processo de produção de cimento, o indicador difuso z indica a temperatura da zona de queima agregada Y_{BZT} do forno rotativo 1 e é determinado com base em um conjunto y_2 de variáveis y e medidas do processo, incluindo o torque (Y_{Torque}) necessário para girar o forno 1, medições de NO_x no gás de exaustão (Y_{NOx}) e leituras de temperatura baseadas em um pirômetro localizado na abertura de saída (extremidade de descarga ou frontal) do forno (Y_{Pyro}), conforme descrição anteriormente com referência à Figura 1.

[00023] Em outro exemplo, em um processo de moagem úmido, o indicador difuso z indica um estado do moedor de um sistema de moagem e é determinado com base em um conjunto y_2 de variáveis y e medidas do processo, incluindo nível de som do moinho, pressão do mancal do moinho, potência de extração do moinho, densidade da pasta semi-fluida e fluxos e pressões em locais específicos, conforme descrição anteriormente com referência à Figura 2.

[00024] Na Figura 4, o numeral de referência 4 refere-se a um sistema de controle, de acordo com a invenção, para controlar um processo industrial 42, como um processo de produção de cimento ou um processo de moagem úmido. O processo industrial 42 é controlado com base em pontos de ajuste de variáveis manipuladas u , geradas pelo

controlador do processo 41, baseadas nos pontos de ajuste r definidos pelo usuário.

[00025] O sistema de controle 4 inclui ainda um gerador indicador 43 para determinar um ou mais indicadores lógicos difusos z baseados em um conjunto y_2 de variáveis y e medidas do processo; e/ou baseados em um conjunto u_2 das variáveis u manipuladas, conforme descrição acima no contexto da Figura 3. Em uma modalidade, o gerador indicador 43 é baseado em um sistema de rede neural ou em um método de aprendizagem estatístico.

[00026] No sistema de controle 4, o controlador do processo 41 é implementado como um controlador baseado em modelo. Geralmente, em controladores baseados em modelo (como controle preditivo modelo, MPC), é usado um modelo matemático para prever o comportamento do sistema no futuro próximo. Este modelo pode ser uma caixa preta ou um modelo físico (isto é, caixa cinza) respectivamente. Para fins de controle, os estados do modelo têm que ser fornecidos antes de o controlador gerar as variáveis manipuladas u . Especificamente, MPC é um procedimento de resolução de um problema de controle ótimo, que inclui dinâmica do sistema e restrições na saída do sistema e/ou variáveis de estado. Um sistema ou modelo de processo válido pelo menos em torno de um certo ponto de operação, permite expressar uma trajetória de sistema manipulada ou sequência de sinais de saída y em termos de um estado presente do sistema, previsões de variáveis externas e sinais de controle futuros u . Uma função de desempenho, custo ou objetivo envolvendo a trajetória ou os sinais de saída y , é otimizada de acordo com alguns critérios pré-especificados e com referência a algum horizonte de predição. Um primeiro sinal de controle ótimo ou próximo u_1 , resultante da otimização, é aplicado então ao sistema e com base no estado observado subsequentemente do sistema e variáveis externas atualizadas, o

procedimento de otimização é repetido. Dependendo da modalidade, o controlador baseado em modelo 41 é baseado em qualquer algoritmo de controle baseado em modelo linear ou não linear, como IMC (Internal Model Control), LQR (Linear Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussian), Linear MPC (Model Predictive Control) NMPC (Nonlinear model Predictive Control) ou similar.

[00027] O sistema de controle 4 compreende ainda um estimador de estado 44 configurado para determinar os estados do modelo $\hat{x}$, por exemplo, como estados de processo físico estimados, baseados no indicador lógico z . Conforme indicado de modo esquemático através das linhas pontilhadas na Figura 4, em diferentes modalidades, o estimador de estado 44 é configurado para determinar os estados de modelo (estados de processo físico estimados) $\hat{x}$ baseados também em um conjunto y_1 de variáveis medidas do processo y e/ou com base em um conjunto u das variáveis manipuladas u . Por exemplo, o estimador de estado 44 é configurado para derivar os estados do modelo (estados estimados de processo físico) $\hat{x}$ por meio de técnicas de estimativa como filtro Kalman, desenho do observador ou estimativa de horizonte movente. EP 1406136 descreve um método exemplificativo de estados de modelo de estimativa ou de propriedades de processo. Em um Filtro Kalman Estendido com Estado Aumentado (SAEKF), um estado aumentado p inclui propriedades físicas dinâmicas do processo que podem ser representadas por uma função do vetor de estado x . No exemplo do processo de produção de cimento, o indicador de lógica fuzzy z fornecido pelo gerador indicador 43 é a temperatura da zona de queima Y_{BZT} do forno rotativo 1 e o estimador de estado 44 é configurado para determinar o perfil de temperatura 10 ao longo do eixo longitudinal do forno 1 com base na temperatura da zona de queima Y_{BZT} . Para esta finalidade, o estimador de estado 44 inclui, de preferência, um modelo físico adequado do forno 1 que leva em conta os fluxos de massa e a

velocidade de rotação do forno 1.

[00028] Deve-se notar que os conjuntos u_1 , u_2 , y_1 e y_2 ou são 0, um subconjunto do conjunto pai ($u_i \subset u$, $y_i \subset y$) ou o conjunto pai completo, respectivamente.

[00029] Conforme ilustrado de maneira esquemática na Figura 4, em uma modalidade, existe uma fonte externa, independente, 45, nem um atuador nem uma medição, que proporciona uma entrada externa v_1 e/ou v_2 ao gerador indicador 43 e/ou ao estimador de estado 44, respectivamente. Correspondentemente, o indicador de lógica fuzzy z é adicionalmente baseado pelo gerador indicador 43, na entrada externa v_1 , e/ou nos estados de modelo $\hat{x}$ são adicionalmente baseados pelo estimador de estado 44 na entrada externa v_2 .

[00030] O controlador do processo 41, o gerador indicador 43 e o estimador de estado 44 são módulos lógicos implementados como módulos de software programados para controlar um processador. Alguém que seja versado na técnica compreenderá, entretanto, que estes módulos lógicos também podem ser implementados completa ou parcialmente pelos elementos de hardware.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de controle para controlar um processo industrial (42), o método compreendendo

a medição de uma pluralidade de variáveis do processo (y);

a determinação de pelo menos um indicador baseado em lógica fuzzy (z) a partir das variáveis medidas do processo (y); e

o cálculo, para controlar o processo (42), de variáveis manipuladas (u) baseadas em pontos de ajuste definidos (r) e no indicador (z);

caracterizado pelo fato de que

o método compreende ainda a determinação de estados estimados do processo ($\hat{x}$) baseados no indicador (z); e

as variáveis manipuladas (u) são calculadas por um controlador (41) com base adicionalmente em um modelo do processo (42) que usa os estados estimados do processo ($\hat{x}$).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o indicador (z) é determinado utilizando uma rede neural ou um método de aprendizagem estatístico.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a determinação dos estados estimados do processo ($\hat{x}$) inclui a determinação de estados físicos do processo com base no indicador (z); e as variáveis manipuladas (u) são calculadas pelo controlador (41) com base em um modelo físico do processo (42) que usa os estados de processo físico estimados ($\hat{x}$).

4. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que o processo industrial (42) se refere à operação de um forno rotativo (1); a medição das variáveis do processo (y) inclui medir o torque necessário para girar o forno (1), medir o nível de NO_x (Y_{NOx}) em gás de exaustão e tirar leituras do pirômetro (Y_{Pyro}) em uma abertura de saída (13) do forno (1); a determinação do

indicador (z) inclui a determinação de uma temperatura da zona de queima (Y_{BZT}) com base no torque, no nível de NOx (Y_{NOx}) e nas leituras do pirômetro (Y_{Pyro}); a determinação dos estados estimados do processo ($\hat{x}$) inclui determinar um perfil de temperatura (10) ao longo de um eixo longitudinal do forno (1) com base na temperatura da zona de queima (Y_{BZT}); e as variáveis manipuladas (u) são calculadas com base no perfil de temperatura (10).

5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que a determinação do indicador (z) é adicionalmente baseada em uma ou mais das variáveis manipuladas (u).

6. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que a determinação dos estados estimados do processo ($\hat{x}$) é adicionalmente baseada em uma ou mais das variáveis do processo (y) e/ou em uma ou mais das variáveis manipuladas (u).

7. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que as variáveis manipuladas (u) são calculadas por um Controlador de Modelo Preditivo; os estados de processo estimados ($\hat{x}$) são determinados por um dentre um filtro Kalman, um observador de estado e um método de estimativa de horizonte movente.

8. Sistema de controle (4) para controlar um processo industrial (42), o sistema (4) compreendendo

sensores para medir uma pluralidade de variáveis do processo (y);

um gerador indicador (43) configurado para determinar pelo menos um indicador baseado em lógica fuzzy (z) a partir das variáveis medidas do processo (y); e

um controlador do processo (41) configurado para calcular

variáveis manipuladas (u) baseadas em pontos de ajuste definidos (r) e no indicador (z);

caracterizado pelo fato de que

o sistema (4) compreende ainda um estimador (44) configurado para determinar estados de processo estimados ($\hat{x}$) com base no indicador (z); e

o controlador do processo (41) é configurado para calcular as variáveis manipuladas (u) adicionalmente baseadas em um modelo do processo (42) que usa os estados de processo estimados ($\hat{x}$).

9. Sistema (4), de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o gerador indicador (43) inclui uma rede neural ou um método de aprendizagem estatístico.

10. Sistema (4), de acordo com a reivindicação 8 ou 9, caracterizado pelo fato de que o estimador (44) é configurado para determinar estados de processo físico estimados ($\hat{x}$) baseados no indicador (z); e o controlador do processo (41) é configurado para calcular as variáveis manipuladas (u) com base em um modelo físico do processo (42) usando os estados do processo físico estimados ($\hat{x}$).

11. Sistema (4), de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 10, caracterizado pelo fato de que o processo industrial (42) se refere à operação de um forno rotativo (1); os sensores são configurados para medir, como variáveis do processo (y), o torque necessário para girar o forno (1), o nível de NO_x (Y_{NOx}) em gás de exaustão, e leituras do pirômetro (Y_{Pyro}) em uma abertura de saída (13) do forno (1); o gerador indicador (43) é configurado para determinar, como indicador (z), uma temperatura da zona de queima (Y_{BZT}) com base no torque, no nível de NO_x (Y_{NOx}) e nas leituras do pirômetro (Y_{Pyro}); o estimador (44) é configurado para determinar, como estados de processo estimados ($\hat{x}$), um perfil de temperatura (10) ao longo de um eixo longitudinal do forno (1) com base na temperatura da zona de

queima (Y_{BZT}); e o controlador do processo (41) é configurado para calcular as variáveis manipuladas (u) com base no perfil de temperatura (10).

12.Sistema (4), de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 11, caracterizado pelo fato de que o gerador indicador (43) é conectado ao controlador do processo (41); e o gerador indicador (43) é adicionalmente configurado para determinar o indicador (z) com base em uma ou mais das variáveis manipuladas (u).

13.Sistema (4), de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 12, caracterizado pelo fato de que o estimador (44) é conectado ao controlador do processo (41) e/ou um ou mais dos sensores; e o estimador (44) é adicionalmente configurado para determinar os estados estimados do processo ($\hat{x}$) com base em uma ou mais das variáveis do processo (y) e/ou uma ou mais das variáveis manipuladas (u), respectivamente.

14.Sistema (4), de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 13, caracterizado pelo fato de que o controlador do processo (41) é um Controlador de Modelo Preditivo; o estimador (44) inclui um dentre um filtro Kalman, um observador de estado e um método de estimativa de horizonte movente.

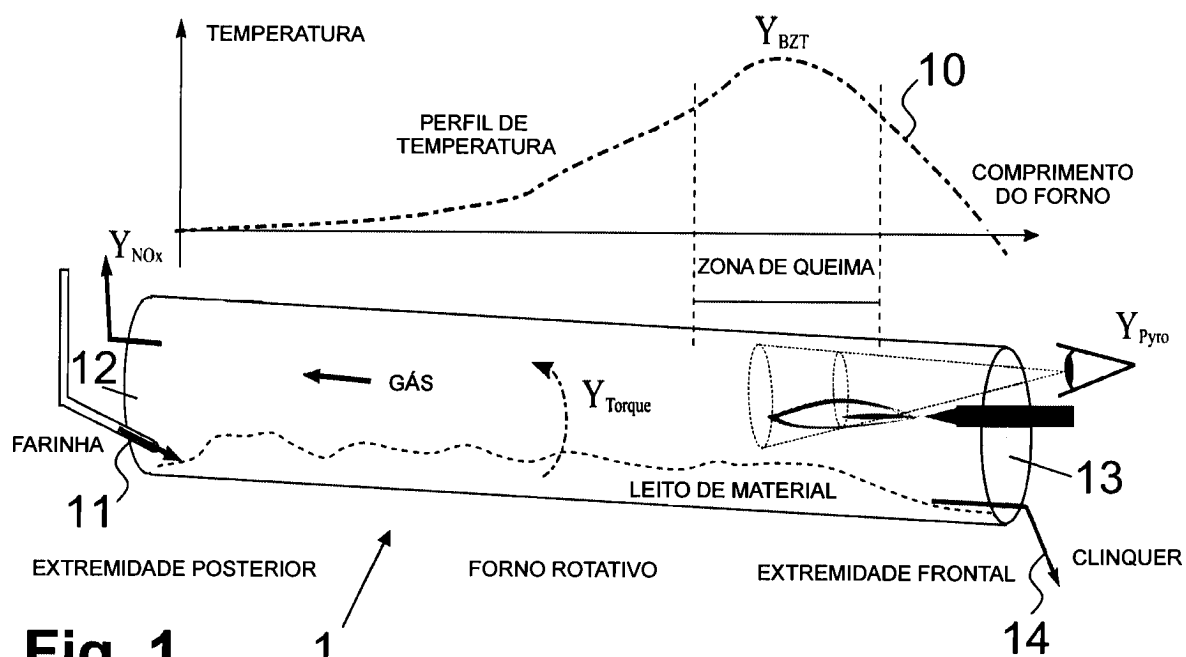
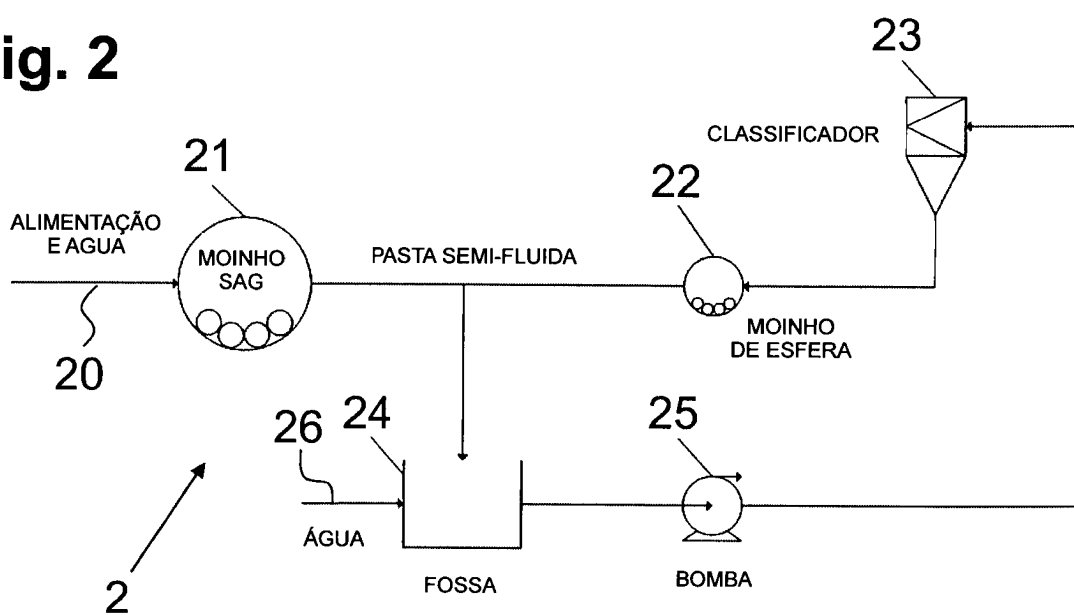


Fig. 2



Técnica Anterior

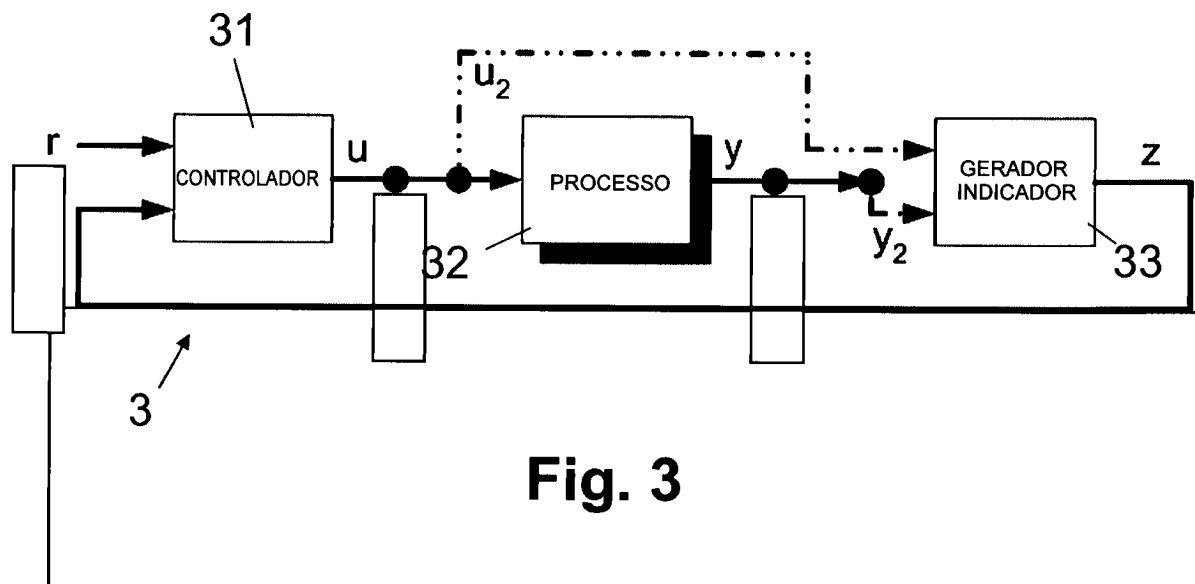


Fig. 3

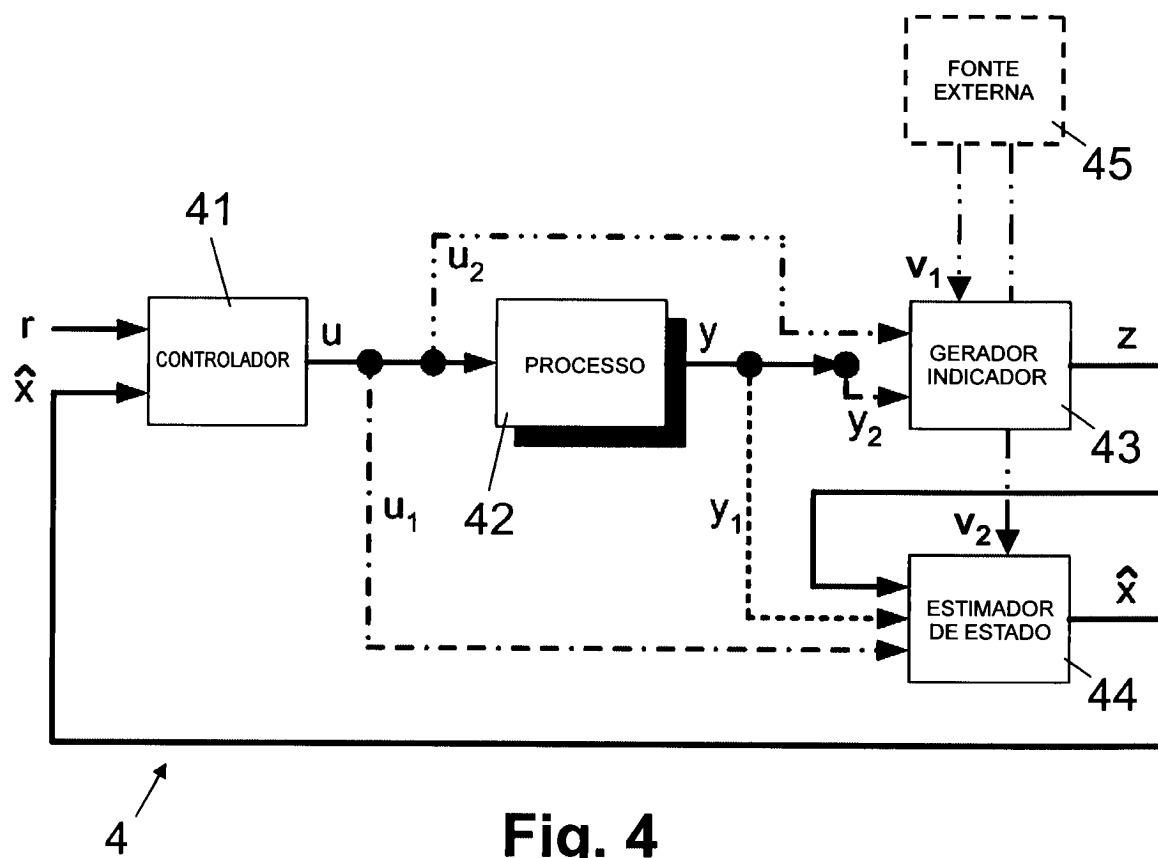


Fig. 4