República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0616190-1 A2**

BRPI0616190A2

(22) Data de Depósito: 12/09/2006
(43) Data da Publicação: 14/06/2011
(RPI 2110)

(51) Int.Cl.:
F27B 3/28 2006.01
F27D 11/10 2006.01
F27D 19/00 2006.01
F27D 21/00 2006.01
H05B 7/148 2006.01
H05B 7/156 2006.01

(54) Título: **SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA FORNALHA DE ARCO ELÉTRICO**

(30) Prioridade Unionista: 20/09/2005 GB 0519163.0

(73) Titular(es): ADVANCED MINERAL RECOVERY TECHNOLOGIES LTD

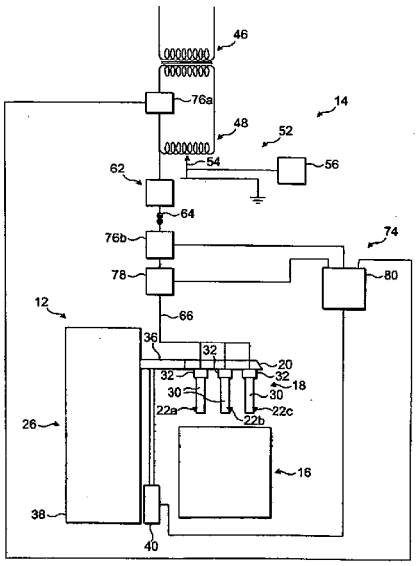
(72) Inventor(es): KEVIN PHILIPPE DANIEL PERRY, THEUNIS JOHANNES VERMEULEN

(74) Procurador(es): Alexandre Ferreira

(86) Pedido Internacional: PCT GB2006003357 de 12/09/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2007/034138de 29/03/2007

(57) Resumo: SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA FORNALHA DE ARCO ELÉTRICO. Um método e um sistema de controle para controlar uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico são descritos, onde a fornalha de arco elétrico compreende um transformador de fornalha que tem uma lateral de entrada principal e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo. O sistema de controle compreende: pelo menos um dispositivo de medição de corrente para medir uma corrente à medida que direcionada pela fornalha de arco elétrico; um dispositivo de medição de voltagem para medir uma voltagem aplicada através da fornalha de arco elétrico; e uma unidade de controle para determinar dinamicamente um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos da corrente e da voltagem, e fornecer uma saida de atuação para acionar um arranjo de elevação para ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.



PI0616190-1

"SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA FORNALHA DE ARCO ELÉTRICO"

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se a um sistema de controle de fornalha de arco elétrico que incorpora o mesmo, e um método de controle de uma fornalha de arco elétrico.

Fundamentos da Invenção

Uma fornalha de arco elétrico é uma fornalha elétrica na qual o calor é produzido por um arco elétrico entre eletrodos adjacentes ou entre os eletrodos e a carga da fornalha. O calor produzido dessa maneira é usado para aquecer e derreter a carga. Tipicamente, o conjunto de braços, que carrega os eletrodos, pesa na faixa de 2 a 50 toneladas, e é movido verticalmente para propósitos de controle por um cilindro hidráulico ou outro atuador. Visto que o comprimento do arco elétrico depende, entre outras coisas, do nível dinâmico da carga, seja ela sólida ou liquida, sob cada eletrodo, é necessário controlar o posicionamento dos eletrodos dentro da fornalha.

O sistema de regulagem para controlar o posicionamento dos eletrodos influencia muitos aspectos importantes no desempenho da fornalha, tal como a entrada de energia, estabilidade do arco, padrão de derretimento da carga sólida e consumo de eletrodo. Todos esses parâmetros estão interrelacionados de uma forma complexa e existem muitas diferenças de opinião sobre as estratégias de controle.

No presente, um dos sistemas de regulagem aceitos é um que objetiva controlar a impedância do arco elétrico

produzido pelos eletrodos. Em particular, esse sistema tenta alojar o raio de voltagem para a corrente elétrica constante. Em uso, um sinal de voltagem tirado de uma fase da fonte de alimentação para a terra, e um sinal de corrente são separadamente medidos e comparados. Se a voltagem e a corrente estão em um ponto de ajuste pré-selecionado desejado, a saída dessa comparação de sinais é arranjada para ser zero. Se, entretanto, a corrente excede seu ponto de ajuste, que causaria simultaneamente uma diminuição de voltagem, um sinal de saída não nulo é gerado. Esse sinal de saída leva o conjunto de braços a elevar, desse modo levando os eletrodos a elevarem, os quais, por sua vez, reduzem a corrente de modo a manter a impedância em um valor constante.

Em geral, os reguladores de impedância de arco existentes do tipo descrito acima são baseados em eletrônica analógica, com fatores de tolerância e desvio embutidos, levando a freqüentes solicitações de re-calibração. Embora alguns sistemas tenham se tornado eletrônica digital para abordar estes problemas, estes sistemas geralmente exigem sistemas de computação maiores e dispendiosos.

Seria, portanto, desejável fornecer um regulador de impedância de fornalha de arco elétrico que aborde os problemas mencionados acima de uma maneira eficaz em custo e ainda eficiente.

Um aspecto da presente invenção fornece um sistema de controle para controlar uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico, onde a fornalha de arco elétrico compreende um transformador de

fornalha que tem uma lateral de entrada primária e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo. O sistema de controle compreende: pelo menos um dispositivo de medição de corrente para medir uma corrente à medida que direcionada pela fornalha de arco elétrico; um dispositivo de medição de voltagem para medir uma voltagem aplicada através da fornalha de arco elétrico; e uma unidade de controle para determinar dinamicamente um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos da corrente e da voltagem, e fornecer uma saída de atuação para acionar um arranjo de elevação para ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como para seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

Preferencialmente, pelo menos um dispositivo de medição de corrente é operativo para medir a corrente de uma ou ambas as laterais de entrada e de saída do transformador de fornalha.

Em uma modalidade, pelo menos um dispositivo de medição de corrente compreende um primeiro dispositivo de medição de corrente para medir a corrente na lateral de entrada do transformador de fornalha e um segundo dispositivo de medição de corrente para medir a corrente na lateral de saída do transformador de fornalha.

Preferencialmente, o dispositivo de medição de voltagem é operativo para medir a voltagem entre um barramento do transformador de fornalha e uma soleira de fornalha.

Preferencialmente, a unidade de controle compreende um processador que é operativo para executar um algoritmo de controle para determinar dinamicamente um fator de taxa r, onde $\dot{r} = x^2/k$, sendo x um desvio em um valor do ponto de ajuste e k sendo uma constante dependente do sistema, e fornece uma saída de atuação baseada no fator de taxa r determinado dinamicamente.

Em uma modalidade, x = n - p e p = (a/b)*(c/2), sendo n um valor do ponto de ajuste, sendo a o valor da corrente medido por pelo menos um dispositivo de medição de corrente, sendo b um valor de corrente secundária nominal do transformador de fornalha, e sendo c uma taxa de contagem do processador.

Em uma modalidade, $k = int((T_m*E_t/1000)/100)*100$, sendo T_m o ponto de fusão (líquidos) da escória em graus Kelvin e E_t sendo a energia elétrica total solicitada para acionar a fornalha de arco elétrico em termos de kWh por tonelada métrica de um material carregado.

Em uma modalidade, o processador é operativo para fornecer uma voltagem de acionamento v como a saída de atuação para acionar o arranjo de elevação.

Em uma modalidade, v = (r/k)*(ABS(x)/x)*I, sendo I uma escala de voltagem para uma unidade de acionamento do arranjo de elevação.

Preferencialmente, o processador é um controlador lógico programável (PLC).

A presente invenção também se estende a uma fornalha de arco elétrico que compreende o sistema de controle

descrito acima.

Em suas modalidades preferenciais, a fornalha de arco elétrico é usada no refinamento de materiais, tal como finos de minério, ou no derretimento de materiais, tal como finos metálicos.

Em um outro aspecto, a presente invenção fornece um método de controle de uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico, onde a fornalha de arco elétrico compreende um transformador de fornalha que tem uma lateral de entrada principal e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo, o método compreende as etapas de: medir pelo menos uma corrente à medida que direcionada pela fornalha de arco elétrico; medir uma voltagem aplicada através da fornalha de arco elétrico; e determinar dinamicamente um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos da corrente e da voltagem, e fornecer uma saída de atuação para acionar um arranjo de elevação para ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

Preferencialmente, a etapa de medição de corrente compreende a etapa de: medir uma corrente de uma ou ambas as laterais de entrada e de saída do transformador de fornalha.

Em uma modalidade, a etapa de medição de corrente compreende as etapas de: medir a corrente na lateral de entrada do transformador de fornalha; e medir a corrente na lateral de saída do transformador de fornalha.

Preferencialmente, a etapa de medição de voltagem compreende a etapa de: medir a voltagem entre um barramento do transformador de fornalha e uma soleira da fornalha.

Preferencialmente, a etapa de determinação do ponto de ajuste compreende a etapa de: determinar dinamicamente um fator de taxa r, onde $r = x^2/k$, sendo x um desvio em um valor do ponto de ajuste e k sendo uma constante dependente do sistema; e a etapa de fornecer saída de atuação compreende a etapa de: fornecer uma saída de atuação baseada no fator r determinado dinamicamente para acionar um arranjo de elevação a ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

Em uma modalidade, $x = n - p$ e $p = (a/b)*(c/2)$, sendo n um valor do ponto de ajuste, sendo a o valor da corrente medido por pelo menos um dispositivo de medição de corrente, sendo b um valor de corrente secundária nominal do transformador de fornalha, e sendo c uma taxa de contagem do processador.

Em uma modalidade, $k = \text{int}((T_m*E_t/1000)/100)*100$, sendo T_m o ponto de fusão (líquidos) da escória em graus Kelvin e E_t sendo a energia elétrica total solicitada para acionar a fornalha de arco elétrico em termos de kWh por tonelada métrica de um material carregado.

Em uma modalidade, a etapa de fornecer saída de atuação compreende a etapa de: fornecer uma voltagem de acionamento v como uma saída de atuação para acionar o arranjo de elevação a ajustar a posição vertical de pelo menos um

eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

Em uma modalidade, v = (r/k)*(ABS(x)/x)*I, sendo I uma escala de voltagem para uma unidade de acionamento do arranjo de elevação.

Em uma modalidade, o método é usado no refinamento de materiais, tal como finos de minério, ou no derretimento de materiais, tal como finos metálicos.

As vantagens das modalidades preferenciais da presente invenção incluem:

(1) Repetibilidade de Processos Digitais

O regulador de impedância é calibrado durante a preparação e todos os parâmetros de controle são armazenados em memória não-volátil. Assim, o sistema necessita somente ser re-calibrado quando os parâmetros do sistema mudam, tal como quando um transformador de fornalha diferente é instalado.

(2) Característica de Controle da Potência Adaptativa

A potência de entrada é monitorada e comparada com a potência de entrada teórica na tampa do transformador específico. O resultado fornece uma boa indicação de como as condições na fornalha estão. O regulador de impedância então ajusta a impedância do ponto de ajuste para compensar essas condições, assegurando assim que a potência de entrada estará sempre tão próxima à potência teórica ótima quanto possível. Devido à fornalha de arco elétrico operar sob esta condição, ela alcança melhores tempos de fusão, o que também

leva ao menor consumo de eletrodos e melhor relação kWh/ton.

(3) Redução na Oscilação Elétrica

A oscilação elétrica ocorre quando a corrente alternada temporariamente não flui através dos eletrodos, e então repentinamente inicia a fluir. Essa distorção da onda senoidal da corrente causa a transferência de menos energia no metal, e mais desgaste de eletrodos. Ela também induz oscilações ressonantes de volta na grade de energia. Tipicamente, os fornecedores de eletricidade exigem que a oscilação seja controlada dentro de certas diretrizes. Se a oscilação não é mantida dentro dessas diretrizes, o usuário é severamente multado com freqüência. O regulador de impedância da presente invenção é, em termos relativos, um sistema mais estável, que auxilia amplamente na redução de oscilação.

(4) Desgaste Reduzido

Executando-se o controle muito preciso do arco elétrico, encontrou-se que a presente invenção reduz enormemente o desgaste na fornalha como um todo, e em particular, nos fechamentos em triângulo e paredes da fornalha.

(5) Produção de Relatórios

O PLC da presente invenção conecta por meio de uma interface um sistema supervisor baseado em computador que registra todos os parâmetros de operação da fornalha e exibe graficamente esses parâmetros registrados tal que essas tendências possam ser estudadas. O sistema supervisor também gera um relatório do gerenciador que consiste de todos os alarmes e eventos que foram registrados em um período de 24

horas, bem como os valores máximo, mínimo e médio nesse período para parâmetros de fornalha, tal como a potência e a corrente.

(6) Conforto ao Usuário

A presente invenção é extremamente amigável ao usuário, pois exige muito pouco acesso do operador para operar a fornalha. Vantajosamente, a diagramação e a apresentação dos painéis de operação da invenção são similares àquelas usadas em fornalhas de arco elétrico mais tradicionais, tais como a Amplidyne e Barnes. Assim, um operador que está familiarizado com qualquer desses sistemas não exigirá virtualmente treinamento para operar com sucesso a presente invenção.

(7) Versatilidade

A alta velocidade do PLC, junto com a versatilidade do algoritmo de controle digital, gera à presente invenção uma faixa mais ampla de aplicações de derretimento do que o derretimento de sucata sozinho. Com alguns ajustes nos parâmetros de ganho e de resposta, a presente invenção pode também ser utilizada para processos de arco submerso bem como uma combinação de arco aberto e processos de arco submerso, tal como o refinamento de escória e o refinamento de finos de minério para recuperar seus metais contidos. A presente invenção, por exemplo, foi descoberta como sendo extremamente bem sucedida em recuperar ferrovanádio de pentóxido de vanádio, ferrocromo de finos de cromita, cobalto de minérios brutos e escórias, zinco de poeiras de planta de aço, chumbo de escórias de alto-forno, e também no re-

derretimento de finos metálicos, tal como aqueles contendo, além de ferro, vanádio, cromo e manganésio.

Em resumo, uma vantagem principal da presente invenção está em atribuir precisão a sistemas digitais, mas em um custo mais baixo devido à invenção ser implementada suando equipamento PLC padrão de série. A presente invenção, portanto, representa uma alternativa menor e mais barata aos sistemas existentes.

Breve Descrição dos Desenhos

Uma modalidade preferencial da presente invenção será agora descrita aqui a seguir a título de exemplo somente com relação aos desenhos em anexo, nos quais:

A Figura 1 ilustra esquematicamente um sistema de fornalha de arco elétrico que incorpora um regulador de impedância de acordo com uma modalidade preferencial da presente invenção;

A Figura 2 é um gráfico que ilustra perfis de energia comparativos na inicialização de uma fornalha de arco elétrico utilizando o regulador de impedância da presente invenção e uma fornalha de arco elétrico convencional; e

A Figura 3 ilustra um gráfico do fator de correção r, onde $r = x^2/k$, como empregado em operação do regulador de impedância da presente invenção.

Descrição Detalhada da Invenção

O sistema de fornalha de arco elétrico compreende uma fornalha de arco elétrico 12 e um sistema de fonte elétrica 14 para fornecer energia elétrica à fornalha de arco elétrico 12.

A fornalha de arco elétrico 12 compreende um corpo de fornalha 16 que contém material, tipicamente na forma fina ou granulada, a ser refinado ou derretido para fornecer um conjunto de eletrodos 18 em fase metálica derretida que, em operação, se estende no material à medida que conteúdo no corpo da fornalha 16, e uma unidade de suporte 26 para suportar de forma móvel o conjunto de eletrodos 18 em relação ao corpo da fornalha 16.

O conjunto de eletrodos 18 compreende uma barra coletora 20 e uma pluralidade de, nessa modalidade, primeira a terceira unidades de eletrodos 22a-c, onde cada uma compreende um eletrodo 30 e uma cabeça de eletrodo 32 a qual uma extremidade superior do eletrodo 30 é elétrica e mecanicamente conectada, nessa modalidade, através de uma almofada de eletrodo, onde a conexão mecânica é exposta a condições mecânicas extremas, incluindo vibração e torção.

A unidade de suporte 26 compreende um braço de suporte 36 que se estende sobre o corpo da fornalha 16 e suporta o conjunto de eletrodos 18, um mastro de suporte 38 ao qual o braço de suporte 36 está verticalmente disposto de forma móvel, e uma unidade de acionamento 40, nessa modalidade uma unidade hidráulica, que é operável para elevar e abaixar o braço de suporte 36, e, portanto, o conjunto de eletrodos 18 como suportado dessa forma. O posicionamento dos eletrodos 30 no corpo da fornalha 16 é essencial, à medida que essa posição determina, entre outros, o comprimento do arco elétrico. Tipicamente, o peso combinado do conjunto de eletrodos 18 e do braço de suporte 26 poderia estar na

faixa de aproximadamente 2 a aproximadamente 50 toneladas.

O sistema de fonte elétrica 14 compreende um primeiro transformador principal 46, que é eletricamente conectado em uma lateral de entrada a uma fonte de alta voltagem como recebida a partir de um utilitário elétrico e em uma lateral de saída, fornece uma voltagem intermediária mais baixa, tipicamente entre 30 e 33 kV, e um segundo transformador de fornalha 48, que é eletricamente conectado em uma lateral de entrada à lateral de saída do transformador principal 46 e em uma lateral de saída, fornece uma voltagem de fornalha ainda menor em uma alta corrente, que é fornecida ao conjunto de eletrodos 18, como será descrito em mais detalhes aqui abaixo. Em uma instalação típica de fornalha de arco elétrico, o transformador principal 46 seria eletricamente conectado a uma pluralidade de transformadores de fornalha 48 de uma pluralidade de fornalhas de arco elétrico 12.

Nessa modalidade, o transformador da fornalha 48 inclui um comutador de derivação 52, que fornece a derivação do transformador da fornalha 48 para fornecer controle da voltagem da fornalha a uma de uma pluralidade de voltagens pré-determinadas. Esse controle da voltagem da fornalha, e a corrente associada, habilita que a fornalha de arco elétrico 12 seja operada com uma faixa de arcos, cada um exigindo uma voltagem e uma corrente definida.

Nessa modalidade, o comutador de derivação 52 compreende uma derivação 54 que é móvel entre um de uma pluralidade de contatos de derivação ao longo do enrolamento primário na lateral de entrada do transformador da fornalha 48,

e uma unidade de controle 56, nessa modalidade, uma unidade motorizada para mover a derivação 54 tal como para ser comutada entre os contatos de derivação se exigido.

O sistema de fonte elétrica adicionalmente compreende um fechamento em triângulo 62 que compreende uma pluralidade de conectores 64, nessa modalidade, chapas de terminal de cobre, que são eletricamente conectadas à lateral de saída do transformador da fornalha 48 e fornecem conexão elétrica aos cabos de energia da fornalha 66, que são eletricamente conectados à barra coletora 20 do conjunto de eletrodos 18.

Nessa modalidade, os transformadores 46, 48 estão localizados em um espaço vazio para assegurar um ambiente seguro e limpo, e o fechamento em triangulo 62 está localizado em uma parede do espaço vazio adjacente à fornalha de arco elétrico 12.

O sistema de fonte elétrica adicionalmente compreende uma unidade de controle 74 para controlar a unidade de acionamento 40 do conjunto de suporte 26 em posicionar verticalmente os eletrodos 30 das unidades de eletros 22a-c no corpo da fornalha 16.

A unidade de controle 74 inclui pelo menos um dispositivo de medição de corrente 76 para medir a corrente à medida que direcionada pela fornalha de arco elétrico 12, e um dispositivo de medição de voltagem 78 para medir a voltagem aplicada através da fornalha de arco elétrico 12.

Nessa modalidade, a unidade de controle 74 inclui primeiro e segundo dispositivo de medição de corrente 76a,

b, onde o primeiro dispositivo de medição de corrente 76a mede a corrente na lateral de entrada do transformador da fornalha 48 e o segundo dispositivo de medição de corrente 76b mede a corrente na lateral de saída do transformador da fornalha 48.

Nessa modalidade, o dispositivo de medição de voltagem 78 mede a voltagem de fase entre a barra do transformador da fornalha 48 e o corpo da fornalha 16.

A unidade de controle 74 inclui um controlador lógico programável (PLC) 80 que é operativamente conectado a pelo menos um dispositivo de medição de corrente 76 e a um dispositivo de medição de voltagem 78 através de respectivos conversores analógico-digital (A/D), que fornecem valores digitais que são representativos dos valores analógicos medidos de corrente e voltagem, e a unidade de acionamento 40 do conjunto de suporte 26 através de um conversor D/A, que fornece um sinal analógico à unidade de acionamento 40 representativo do valor digital correspondente à taxa determinada de movimento, tal como, desse modo para habilitar o controle da posição dos eletrodos 30 das unidades de eletrodos 22a-c no corpo da fornalha 16, e assim o arco gerado entre os eletrodos 30.

Nessa modalidade, o PLC 80 é controlado via um algoritmo de controle de laço fechado. Assegurando que o tempo de resposta do PLC 80 pelo menos alcança o tempo de resposta mecânico do conjunto de suporte 26, o controle preciso e de alta velocidade do conjunto de eletrodos 18 é alcançado, evitando problemas associados com ressonância indesejada.

Nessa modalidade, o PLC 80 utiliza um algoritmo de controle baseado em um fator de taxa r, que representa a taxa exigida de movimento dos eletrodos 30, como manifestado por movimento do braço de suporte 36 do conjunto de suporte 26.

$$r = x^2/k \quad (1)$$

$$x = n - p \quad (2)$$

$$p = (a/b)*(c/2) \quad (3)$$

onde:

k é uma constante dependente do sistema;

n é um valor de ponto de ajuste;

a é o valor de corrente medida por pelo menos um dispositivo de medição de corrente 76;

b é o valor secundário de corrente nominal do transformador da fornalha 48; e

c é a taxa de contagem do PLC 80.

O fator de taxa r é uma correlação matemática de dados reais que foram coletados quando operando fornalhas de arco elétrico de diferentes tamanhos, ou seja, 450 kVA, 800 kVA, 1 MVA, 2 MVA e 3 MVA, quando refinando finos de minério e derretendo finos metálicos.

Nessa modalidade, um valor de ponto de ajuste inicial n_i é determinado como segue.

$$n_i = (d/b)*(c/2) \quad (4)$$

onde: d é a corrente nominal de carga completa da fornalha de arco elétrico 12.

A título de exemplo, para uma razão de transformador redutor d/b de 10/250 e onde o PLC 80 tem uma taxa de

contagem de 4000, então empregando a Equação (4),

$$n_i = (10/250)*(4000/2)$$

$$n_i = 80$$

Usando esse valor de ponto de ajuste inicial n_i, fornece inicialmente operação estável da fornalha de arco elétrico 12, e, durante operação, o valor do ponto de ajuste n é alterado de modo a compensar condições de fornalha e desse modo fornece otimização do arco gerado entre os eletrodos 30 tal como para inserir uma energia ótima no material no corpo da fornalha 16. Nessa modalidade, o PLC 80 é operativo para comparar a potencia real como entrada na fornalha de arco elétrico 12, determinada a partir dos valores de voltagem e de corrente medidos por pelo menos um dispositivo de medição de corrente 76 e por pelo menos um dispositivo de medição de voltagem 78, com a potencia como deveria teoricamente ser alcançada para a derivação 54 ajustada do transformador de fornalha 48, e para alterar o valor de ponto de ajuste n como uma função dessa comparação.

Nessa modalidade, à constante dependente do sistema k é inicialmente atribuído um valor calculado, de modo a fornecer inicialmente operação estável da fornalha de arco elétrico 12.

A constante dependente do sistema k é determinada como segue:

$$k = \text{int}((T_m*E_t/1000)/100)*100 \qquad (5)$$

onde:

T_m é o ponto de fusão (líquidos) do material introduzido em graus Kelvin.

E_t é a energia elétrica total exigida para acionar o processo em termos de kWh por tonelada métrica de um material introduzido.

A título de exemplo, para materiais óxidos, o ponto de fusão T_m e a energia elétrica total E_t são determinados como segue.

$$T_m = 1189,157$$

$$+ C_0x(12,22238 + (-0,14321xC_0) + (0,030606xC_4) + (0,022817xC_6) + (-0,54851xC_5) + (-0,3636xC_7))$$

$$+ C_5x((-0,26564xC_5) + (0,209113xC_6) + (-1,13507xC_7) + (-0,3511xC_4) + (33,49343))$$

$$+ C_4x(-6,53514 + (0,107294xC_4) + (-0,35228xC_7))$$

$$+ C_6x((-18,8445 + (0,800383xC_6))$$

$$+ C_7x38,97819$$

onde:

$C_0 = \%FeOx100x1,625/C_S$

$C_4 = \%SIO_2x100/C_S$

$C_5 = \%CaOx100/C_S$

$C_6 = \%MgOx100/C_S$

$C_7 = (\%Al2O3 + \%Cr2O3)x100/C_S$

$C_S = \%FeO*1,625 + \%SIO_2 + \%CaO + \%MgO + \%Al_2O_3 + \%Cr_2O_3$

$E_t = (E_o + H_{react})/3,6/0,85$

Onde:

E_o é a saída de energia em MJ.

H_{react} é aquecimentos de reação em MJ, que representa a soma da mudança de entalpia termodinâmica (ΔH_{295k}) associada com cada reação acontecendo no processo, com exemplos

sendo:

$ZnO + C = Zn + CO \quad \Delta H_{295k} = +237,551$ kJ/mol C.

$FeO + C = Fe + CO \quad \Delta H_{295k} = +161,514$ kJ/mol C.

O termo 3,6 é o fator de conversão para 3600 kJ, que corresponde a 1000 kWh.

O termo 0,85 representa o fator de eficiência para converter energia elétrica em energia de calor.

A saída de energia E_o é determinada como segue:

$$E_o = En_{Ga/Fu} + En_{Si} + En_{Met}$$

Onde:

$En_{Ga/Fu}$ é o valor de energia associado com o efluente gasoso da fornalha e fumaça.

En_{Si} é o valor de energia associado com a escória da fornalha.

En_{Met} é o valor de energia associado com a fase metálica derretida.

Por exemplo, para refinar um material produzindo uma escória tendo um líquido de 1345° C e uma exigência de energia de 957 kWh/t, a seguinte Equação (5), a constante dependente de sistema k é determinada como segue.

$$k = Int(((1345 + 273) \times (957/1000)) / 100) \times 100$$

$$k = 1500$$

Em uma modalidade, o PLC 80 é operativo para ajustar a constante dependente do sistema k, em uma faixa de +/- 5%, de modo a otimizar o uso de energia, com a constante dependente do sistema k sendo influenciada por, entre outros, o tamanho da fornalha, o tipo de material que está sendo derretido, a temperatura operacional ótima e a fluidez de

escória. A experimentação tem, entretanto, estabelecido que a constante dependente do sistema k usualmente tem um valor entre aproximadamente 500 e aproximadamente 3000, tal que o valor ótimo da constante dependente do sistema k é rapidamente determinado.

Nessa modalidade, a unidade de acionamento 40 do conjunto de suporte 26 é atuada por uma voltagem de acionamento analógica v que é emitida pelo conversor D/A do PLC 80, com a escala da voltagem de acionamento v determinando a taxa de movimento da unidade de acionamento 40, e o PLC 80 é operativo para derivar a voltagem de controle v de acordo com o seguinte algoritmo de saída.

$$v = (r/k)*(ABS(x)/x)*I$$

onde:

I é a escala de voltagem para uma unidade de acionamento 40 do conjunto de suporte 26.

A voltagem de acionamento v é uma de uma voltagem positiva ou negativa, nessa modalidade, com uma voltagem positiva definindo um movimento verticalmente para baixo e uma voltagem negativa definindo um movimento verticalmente para cima.

A título de exemplificação, a Figura 2 ilustra gráficos representativos do perfil de energia de entrada de uma fornalha convencional de arco elétrico comparado ao perfil de energia de entrada de uma fornalha de arco elétrico 12 alcançado pelo uso da unidade de controle 74 da presente invenção. Esses gráficos claramente ilustram a função da unidade de controle 74 em fornecer uma maior entrada de ener-

gia para a fornalha de arco elétrico 12.

A operação do sistema de fornalha de arco elétrico agora será descrita a seguir no refinamento de um lote de aço fundido, que é mostrado como um "aquecimento".

O corpo da fornalha 16, onde vazio, é primeiro carregado com uma pequena quantidade, tipicamente aproximadamente 20 kg, do material a ser refinado.

A fornalha de arco elétrico 12 é então operada para refinar esse material, que leva uma pequena poça do produto derretido a formar na base do reservatório do corpo da fornalha 16.

Portanto, mais material é alimentado na poça do produto derretido no reservatório do corpo da fornalha 16, onde o refinamento é executado fornecendo energia ao material alimentado como alimentado no corpo da fornalha 16. Nessa modalidade, o material é alimentado continuamente no corpo da fornalha 16 usando um alimentador, onde a taxa de alimentação do alimentador alcança a energia elétrica fornecida pelos eletrodos 30. Em modalidades preferenciais, o alimentador é um de um alimentador vibratório ou de correia.

Dessa forma, a pequena poça do produto derretido desenvolve em uma grande piscina do produto derretido que preenche o reservatório do corpo da fornalha 16.

Embora a energia exigida para acionar as várias reações e produzir vários produtos gasosos e líquidos pode ser energia elétrica ou energia química, onde a energia química é fornecida por pelo menos um componente, tal como silicone metálico, que compreende parte do material de alimen-

tação, a energia elétrica fornecida via os eletrodos 30 é usualmente o maior contribuidor de energia nas operações de refinamento.

Nesse processo, o conjunto de eletrodos 18 é abaixado tal que os eletrodos 30 das unidades de eletrodos 22a-c descarrega um arco no material de alimentação, que inicia o ciclo de derretimento, onde a posição vertical do conjunto de eletrodos 18, e assim os eletrodos 30 no corpo da fornalha 16, é controlado pela unidade de controle 74 da maneira definida acima, de modo a otimizar a operação da fornalha de arco elétrico 12. Sob tal controle inteligente, a corrente secundária, o comprimento do arco e a entrada de energia são regulados. Controlando-se a posição vertical dos eletrodos 30 dessa maneira, o consumo de eletrodos, desgaste refratário, oscilação, e custos de energia total são todos reduzidos, enquanto a produtividade da fornalha e a vida do fechamento em triangulo são simultaneamente aumentadas.

Inicialmente, um comutador de derivação 52 do sistema de fonte elétrica é ajustado tal que a derivação 56 está localizada em um contato de derivação de voltagem intermediário, mas, depois de um curto período, tipicamente uns poucos minutos, os eletrodos 30 penetram no material de alimentação suficientemente tal como a permitir que o comutador de derivação 52 do sistema de fonte elétrica seja ajustado para um contato de derivação de alta voltagem, também referido como uma derivação de arco longo. O arco longo maximiza a transferência de energia ao material de alimentação e uma piscina de produto derretido se desenvolve no corpo da for-

nalha 16. Ajustar o comutador de derivação 52 do sistema de fonte elétrica tal que a derivação 56 seja ajustada inicialmente para um contato de derivação de alta voltagem, pode levar a danos de radiação ao corpo da fornalha 16.

No início do derretimento, o arco é errático e instável, com amplas oscilações em corrente sendo observadas e executadas por movimento rápido dos eletrodos 30. À medida que a temperatura da atmosfera da fornalha aumenta, o arco estabiliza e uma vez que uma piscina derretida é formada, o arco se torna quase estável e a entrada de energia média aumenta.

À medida que o material de alimentação caindo faz contato com a superfície do produto derretido, o calor gerado pelos arcos elétricos leva o material de alimentação a ser convertido em pelo menos três produtos, esses sendo um gás que pode conter monóxido de carbono e elementos de baixo ponto de ebulição, tal como zinco e fósforo, uma fase metálica, e uma fase de escória derretida que contém sílica e óxido de cálcio como seus componentes principais e sobrepõe a fase metálica. Quando o material de alimentação compreende sulfetos, o material de alimentação é convertido em um produto derretido adicional, conhecido como mate, que é colocado entre as fases metálica e de escória.

Quando o reservatório do corpo da fornalha 16 está cheio, a alimentação do material de alimentação no corpo da fornalha 16 é parada e o conjunto de eletrodos 18 é elevado tal que os eletrodos 30 das unidades de eletrodos 22a-c são removidos do corpo da fornalha 16.

A fase de escória é então removida do corpo da fornalha 16 virando o reservatório do corpo da fornalha 16, tal que a fase de escória é vertida em uma concha. Onde o reservatório do corpo da fornalha 16 também inclui uma fase mate, gerada a partir do uso de sulfetos, a fase mate é vertida em uma concha separada.

Seguindo a remoção da fase de escória e qualquer fase mate, o corpo da fornalha 16 é então retornado para a posição perpendicular, e o procedimento repetido pela introdução de material de alimentação adicional.

Depois de repetidamente carregar o reservatório do corpo da fornalha 16 e remover a fase de escória gerada e qualquer fase mate, tipicamente até oito ciclos, o reservatório do corpo da fornalha 16 se torna cheio da fase metálica desejada.

O corpo da fornalha 16 é então derivado para verter fase metálica derretida em uma concha. Essa derivação da fase metálica derretida é alcançada inclinando-se o reservatório da fornalha através de um ângulo exatamente superior a 90 graus a partir da posição perpendicular.

Seguindo a derivação da fase metálica derretida, o corpo da fornalha 16 é inclinado de volta a sua posição perpendicular para uso com uma nova carga de material. Durante esse período, os eletrodos 30 e o corpo da fornalha 16 são inspecionados por danos refratários, e, se necessário, reparos são feitos.

Em uma modalidade, quando finos metálicos, tal como ferrocromo, ferromanganésio e ferrovanádio, constituem o

material de alimentação, a fase metálica derretida resultante é refinada, tal que certos elementos, por exemplo, zinco, fósforo, súlfur, alumínio, silicone e carbono, bem como gases dissolvidos, tal como oxigênio, são substancialmente removidos da fase metálica derretida resultante.

Exemplo

A presente invenção será agora descrita a título de exemplo com relação ao seguinte Exemplo não limitante.

Nesse Exemplo, a fornalha de arco elétrico 12 é uma fornalha de 2,5 MVA que tem uma voltagem nominal em carga completa de 207 V e uma corrente nominal em carga completa de 7200 A, e foi usada para refinar uma mistura de areia de cromita, contendo 38% do peso de Cr_2O_3, e finos de carboneto de silício.

Nesse Exemplo, o transformador da fornalha 24 tem um valor de corrente secundária nominal de 7500 A, e o PLC 80 tem uma taxa de contagem de 4000.

Seguindo a Equação (4), o valor de ponto de ajuste inicial é determinado como segue.

$$n_i = (7200/7500)*(4000/2)$$

$$n_i = 1920$$

Onde a energia elétrica total E_t exigida para acionar a operação de refinamento é 1255 kWh/t de Cr_2O_3, e o T_m líquido da escória é 1415° C, então seguindo a Equação (5), o fator dependente do sistema k é determinado como segue.

$$k = Int(((1415 + 273)*(1225/1000))/100)*100$$

$$k = 2000$$

Para um fator dependente do sistema k de 2000, o fator de taxa r é determinado de acordo com a Equação (1). A Figura 3 ilustra um gráfico do fator de taxa r como uma função dos valores medidos de corrente.

Seguindo a Equação (6) e para um fator de escala de voltagem I de 10, o PLC 80 é operativo para fornecer uma voltagem de acionamento v na faixa de 0 a +10 volts ou 0 a -10 volts, que, nesse Exemplo, é o sinal quantitativo exigido para acionar a unidade de acionamento 40 da unidade de suporte 26 para mover o conjunto de eletrodos 18 verticalmente para cima ou para baixo.

A Tabela I ilustra um conjunto de parâmetros para uma faixa de valores medidos de corrente, que induzem o valor representativo de corrente p como determinado pelo PLC 80, o desvio x entre o valor de ponto de ajuste n e o valor representativo de corrente p, o fator de taxa r, a voltagem de acionamento v correspondente ao fator de taxa r, e a velocidade de movimento s correspondente à voltagem de acionamento v.

Voltagem (V)	Corrente (A)	Valor de PLC p	Desvio x	Fator de Taxa r	Voltagem de Acionamento v	Velocidade de Eletrodo para baixo (+) ou para cima (-) (mm/s)
207	0	0	1920	1843	9,22	114
207	720	192	1728	1493	7,46	92
207	1440	384	1536	1180	5,90	73
207	2160	576	1344	903	4,52	56

207	2880	768	1152	564	3,32	41
207	3600	960	960	461	2,30	29
207	4320	1152	768	295	1,47	18
207	5040	1344	576	166	0,83	10
207	5760	1536	384	74	0,37	5
207	6480	1728	192	18	0,09	1
207	7200	1920	0	0	0,00	0
207	8330	2221	-301	45	-0,23	-3
207	8490	2264	-344	59	-0,30	-4
207	9360	2496	-576	166	-0,83	-10
207	9990	2664	-744	277	-1,38	-17
207	11000	2933	-1013	513	-2,57	-32
207	11420	3045	-1125	633	-3,17	-39
207	12220	3259	-1339	896	-4,48	-55
207	13100	3493	-1573	1238	-6,19	-77
207	13500	3600	-1680	1411	-7,06	-87
207	13990	3731	-1811	1639	-8,20	-101

TABELA 1

Finalmente, entende-se que a presente invenção foi descrita em sua modalidade preferencial e pode ser modificada de muitas formas diferentes sem abandonar o escopo da invenção como definido pelas reivindicações em anexo.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de controle para controlar uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico, onde a fornalha de arco elétrico compreende um transformador de fornalha tendo uma lateral de entrada principal e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

pelo menos um dispositivo de medição de corrente para medir uma corrente à medida que é direcionada pela fornalha de arco elétrico;

um dispositivo de medição de tensão para medir uma tensão aplicada através da fornalha de arco elétrico; e

uma unidade de controle para dinamicamente determinar um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos de corrente e de tensão, e fornecer uma saída de atuação para acionar um arranjo de elevação a ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente;

em que a unidade de controle compreende um processador para executar um algoritmo de controle para determinar dinamicamente um fator de taxa r, onde $r = x^2/k$, sendo x um desvio em um valor do ponto de ajuste e k sendo uma constante dependente do sistema, e para fornecer uma saída de atuação baseada no fator de taxa r determinado dinamicamente.

2. Sistema de controle, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que pelo menos um dispo-

sitivo de medição de corrente é operativo para medir a corrente em uma ou ambas as laterais de entrada e de saída do transformador da fornalha.

3. Sistema de controle, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que pelo menos um dispositivo de medição de corrente compreende um primeiro dispositivo de medição de corrente para medir a corrente na lateral de entrada do transformador da fornalha e um segundo dispositivo de medição de corrente para medir a corrente na lateral de saída do transformador da fornalha.

4. Sistema de controle, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dispositivo de medição de tensão é operativo para medir a tensão entre uma barra do transformador da fornalha e uma soleira da fornalha.

5. Sistema de controle, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, **CARACTERIZADO** pelo fato de que x = n - p e p = (a/b)*(c/2), sendo n um valor do ponto de ajuste, sendo a o valor da corrente medido por pelo menos um dispositivo de medição de corrente, sendo b um valor de corrente secundária nominal do transformador da fornalha, e sendo c uma taxa de contagem do processador.

6. Sistema de controle, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, **CARACTERIZADO** pelo fato de que k = int((Tm*Et/1000)/100)*100, com Tm sendo o ponto de fusão (líquidos) da escória em graus Kelvin e Et sendo a energia elétrica total solicitada para acionar a fornalha de arco elé-

trico em termos de kWh por tonelada métrica de um material carregado.

7. Sistema de controle, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o processador é operativo para fornecer uma tensão de acionamento v como a saída de atuação para acionar o arranjo de elevação.

8. Sistema de controle, de acordo com a reivindicação 7, **CARACTERIZADO** pelo fato de que v = (r/k)*(ABS(x)/x)*I, com I sendo uma tensão de escala para uma unidade de acionamento do arranjo de elevação.

9. Sistema de controle, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o processador é um controlador lógico programável (PLC).

10. Fornalha de arco elétrico, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende o sistema de controle do tipo definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 9.

11. Fornalha de arco elétrico, de acordo com a reivindicação 10, **CARACTERIZADA** pelo fato de que é usada no refinamento de materiais, tal como finos de minério, ou no derretimento de materiais, tal como finos metálicos.

12. Método de controlar uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico, onde esta compreende um transformador de fornalha tendo uma lateral de entrada principal e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende as etapas de:

medir pelo menos uma corrente à medida que é direcionada pela fornalha de arco elétrico;

medir uma tensão aplicada através da fornalha de arco elétrico;

determinar dinamicamente um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos da corrente e da tensão, em que um fator de taxa r é dinamicamente determinado, onde $r = x^2/k$, sendo x um desvio em um valor do ponto de ajuste e k sendo uma constante dependente do sistema; e

fornecer uma saída de atuação baseada no fator de taxa r determinado dinamicamente para acionar um arranjo de elevação a ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

13. Método, de acordo com a reivindicação 12, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a etapa de medição de corrente compreende a etapa de:

medir uma corrente em uma ou ambas as laterais de entrada e de saída do transformador da fornalha.

14. Método, de acordo com a reivindicação 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a etapa de medição de corrente compreende as etapas de:

medir a corrente na lateral de entrada do transformador de fornalha; e

medir a corrente na lateral de saída do transformador da fornalha.

15. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 12 a 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a etapa de medição de tensão compreende a etapa de:

medir uma tensão entre uma barra do transformador de fornalha e uma soleira da fornalha.

16. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 12 a 15, **CARACTERIZADO** pelo fato de que x = n - p e p = (a/b)*(c/2), sendo n um valor do ponto de ajuste, sendo a o valor da corrente medido por pelo menos um dispositivo de medição de corrente, sendo b um valor de corrente secundária nominal do transformador da fornalha, e sendo c uma taxa de contagem do processador.

17. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 12 a 16, **CARACTERIZADO** pelo fato de que k = int((Tm*Et/1000)/100)*100, com Tm sendo o ponto de fusão (líquidos) da escória em graus Kelvin e Et sendo a energia elétrica total solicitada para acionar a fornalha de arco elétrico em termos de kWh por tonelada métrica de um material carregado.

18. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 12 a 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a etapa de fornecer saída de atuação compreende a etapa de:

fornecer uma tensão de acionamento v como uma saída de atuação para acionar um arranjo de elevação a ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, **CARACTERIZADO** pelo fato de que v = (r/k)*(ABS(x)/x)*I, com I

sendo uma tensão de escala para uma unidade de acionamento do arranjo de elevação.

20. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 12 a 19, **CARACTERIZADO** pelo fato de que é usado no refinamento de materiais, tal como finos de minério, ou no derretimento de materiais, tal como finos metálicos.

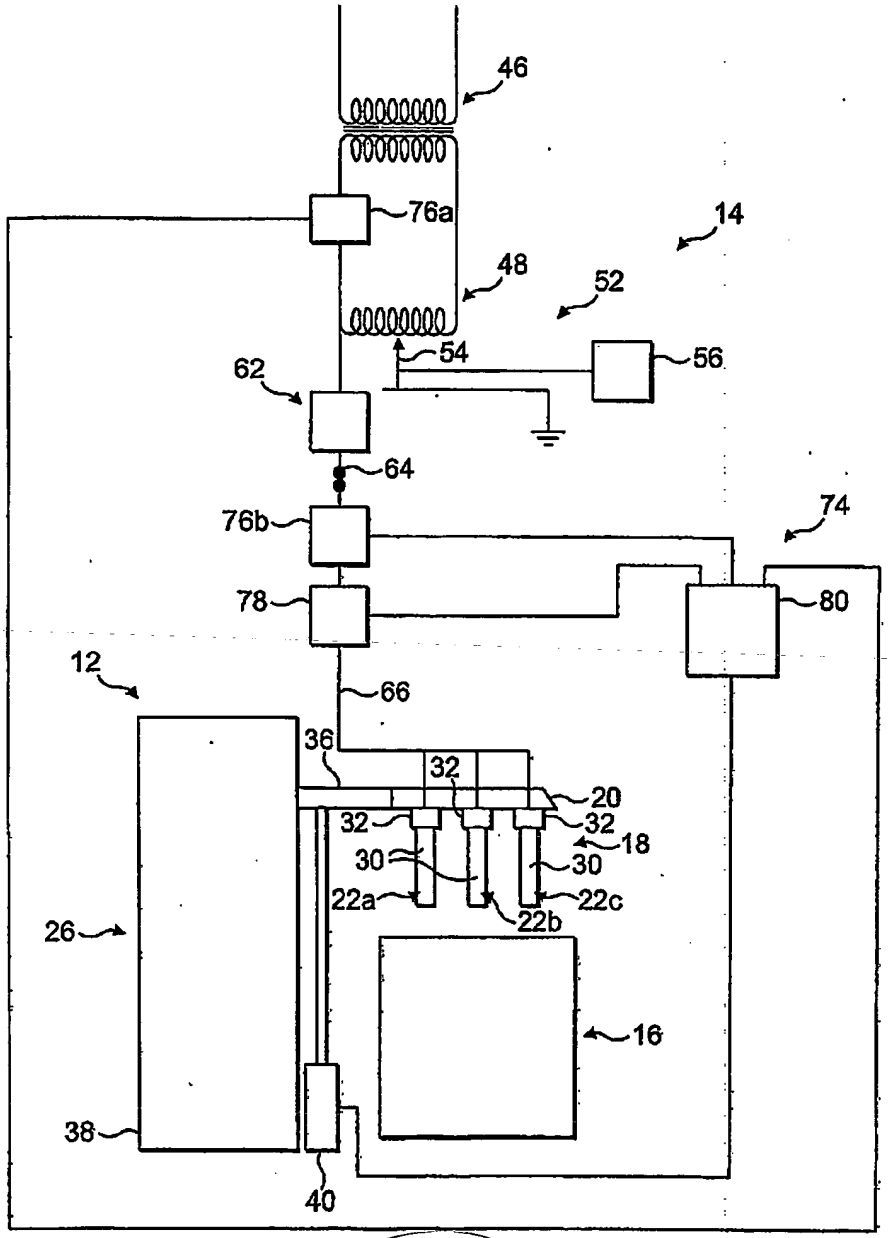

46
76a
14
48
52
54
56
62
64
74
76b
78
80
12
66
36
32
20
32
32
18
30
30
22a
22c
22b
26
16
38
40

FIG. 1

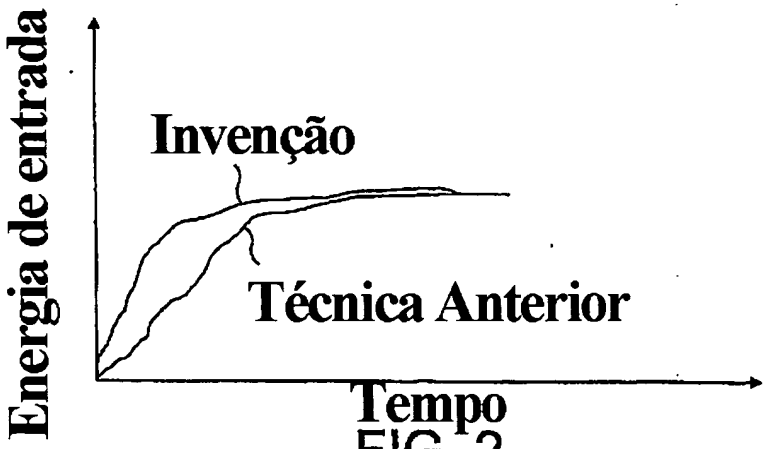

Energia de entrada
Invenção
Técnica Anterior
Tempo

FIG. 2

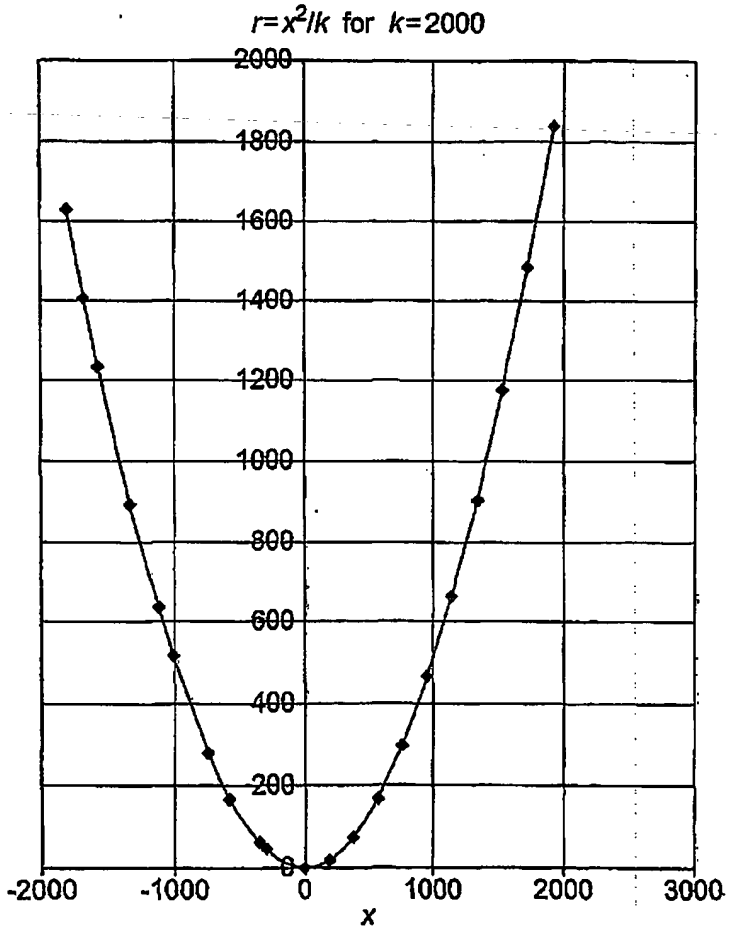

r=x²/k for k=2000
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-2000
-1000
0
1000
2000
3000
x

FIG. 3

RESUMO

"SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA FORNALHA DE ARCO ELÉTRICO"

Um método e um sistema de controle para controlar uma posição vertical de pelo menos um eletrodo de uma fornalha de arco elétrico são descritos, onde a fornalha de arco elétrico compreende um transformador de fornalha que tem uma lateral de entrada principal e uma lateral de saída secundária que é eletricamente conectada a pelo menos um eletrodo. O sistema de controle compreende: pelo menos um dispositivo de medição de corrente para medir uma corrente à medida que direcionada pela fornalha de arco elétrico; um dispositivo de medição de voltagem para medir uma voltagem aplicada através da fornalha de arco elétrico; e uma unidade de controle para determinar dinamicamente um ponto de ajuste para a posição vertical de pelo menos um eletrodo baseado nos valores medidos da corrente e da voltagem, e fornecer uma saída de atuação para acionar um arranjo de elevação para ajustar a posição vertical de pelo menos um eletrodo tal como a seguir o ponto de ajuste determinado dinamicamente.