



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

**(11) PI 0812956-8 B1**



**(22) Data do Depósito:** 09/06/2008

**(45) Data de Concessão:** 24/04/2019

**(54) Título:** APARELHO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA, E, MÉTODO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA

**(51) Int.Cl.:** H05B 6/04.

**(30) Prioridade Unionista:** 10/06/2007 US 11/760772.

**(73) Titular(es):** INDUCTOTHERM CORP..

**(72) Inventor(es):** KUNO WEISS; OLEG S. FISHMAN.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2008066353 de 09/06/2008

**(87) Publicação PCT:** WO 2008/154508 de 18/12/2008

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 10/12/2009

**(57) Resumo:** APARELHO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA, E, MÉTODO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA São providos um aparelho e um processo de aquecimento por indução de uma peça de trabalho (14). A peça de trabalho (14) é movida através de um indutor (12) para tratar termicamente por indução a peça de trabalho (14) com potência elétrica de frequência variável e ciclo de serviço ou controle de amplitude para controlar a magnitude de potência elétrica à medida que a frequência varia. Alternativamente a peça de trabalho (14) pode ser estacionária e o indutor (12) pode ser movido ao longo da peça de trabalho (14), ou movimento combinado e coordenado da peça de trabalho (14) e indutor (12) pode ser usado.

“APARELHO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA, E, MÉTODO DE TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO DE UMA PEÇA DE TRABALHO CONTÍNUA OU DISCRETA”

### **Campo da Invenção**

[001] A presente invenção se refere ao tratamento térmico por indução de peças de trabalho contínuas ou discretas em que controle de modulação de largura de pulso ou controle de amplitude são usados para controlar tratamento térmico por indução das peças de trabalho.

### **Fundamentos da Invenção**

[002] Peças alongadas, tal como um eixo motor, requerem o tratamento térmico de elementos selecionados sobre uma peça. Por exemplo, um primeiro aspecto característico, tal como um pinhão, pode ser previsto em uma extremidade de um eixo de transmissão, e um segundo aspecto característico, tal como uma junta universal pode ser prevista na extremidade oposta. A engrenagem e o acoplamento são de configurações físicas diferentes e requerem diferentes padrões de tratamento térmico para endurecimento metalúrgico destes componentes. Além disso, uma propriedade termicamente tratada pode necessitar ser temperada após o tratamento térmico para aliviar as tensões metalúrgicas no material da peça.

[003] Um método de tratamento térmico das peças e de elementos sobre a peça é pela sua varredura por indução elétrica ou tratamento térmico progressivo. Neste método, a peça genericamente se desloca através de um ou mais indutores exploradores, ainda que em outros conjuntos, a peça possa ser estacionária e um ou mais indutores de exploração (bobinas) possam se deslocar ao longo da extensão da peça. Potência elétrica de CA é aplicada ao indutor explorador para criar um campo magnético em torno do indutor. O campo se acopla magneticamente com a peça para indutivamente aquecer a peça. A potência de CA para o indutor explorador pode ser variada à medida

que a peça passa através do indutor. Por exemplo, a Patente U.S. 3 743 808 ensina controlar a potência de indução e/ou a velocidade do indutor explorador comparando a potência instantânea e a velocidade instantânea com um perfil de distribuição de potência conhecido. A velocidade através da qual a peça passa através do indutor (taxa de exploração) pode ser usada para controlar o grau de aquecimento na seção transversal da peça que está acoplada com o campo magnético.

[004] A profundidade de penetração de aquecimento por indução (profundidade de penetração de corrente induzida,  $\delta$ ) de uma peça pode ser calculada pela fórmula:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu F}}$$

onde  $\delta$  é em metros,  $\rho$  é a resistividade elétrica da peça em ohms-metro;  $\mu$  e  $F$  é a frequência da potência de indução fornecida em Hertz. Por conseguinte, a profundidade de penetração é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência da corrente aplicada. Se a peça tem elementos, com um primeiro aspecto que requer aquecimento a uma profundidade de penetração rasa (e.g., 2,5mm) e um segundo aspecto que requer aquecimento a uma maior profundidade de penetração (e.g., 4,5 mm), o método convencional usa um inversor com uma frequência de saída fixa, por exemplo, 10 000 Hz, para obter a profundidade de penetração mais rasa. Pela equação acima, a frequência de saída do inversor deve ser inferior a 10 000 Hz do segundo aspecto da peça, porém uma que a frequência é fixa, a exploração térmica por indução do segundo aspecto tem de desacelerada para permitir a penetração térmica mais profunda por indução térmica no segundo aspecto característico.

[005] Outrossim, devido à taxa de exploração mais lenta, a potência de saída do inversor para a bobina de indução tem de ser reduzida para evitar aquecimento demasiado da superfície do segundo aspecto característico. Também uma propriedade termicamente tratada pode exigir a têmpera da

característica termicamente tratada para reduzir as tensões na característica. Tipicamente a característica é primeiramente tratada em uma primeira exploração com baixa potência e alta frequência fixa para termicamente tratar à profundidade de penetração requerida, a seguir aquecida em uma segunda exploração com baixa frequência fixa para tempera da característica.

[006] Um objetivo da presente invenção é variar a frequência de saída do inversor enquanto ajustando o nível de potência de saída do inversor por modulação por duração de impulso, conforme requerida para indutivamente termo tratar e/ou temperar vários elementos de uma peça a diferentes profundidades de penetração em uma varredura por indução da peça.

[007] Um outro objetivo da presente invenção é controlar a frequência de saída da fonte de potência para obter aquecimento por indução ótimo por controle da profundidade de penetração.

[008] Um outro objetivo da presente invenção é variar a frequência de saída do inversor enquanto se ajusta o nível de potência de saída do inversor por controle de amplitude ou modulação de largura de pulso conforme requerido para tratamento térmico indutivo e/ou temperamento de uma peça de trabalho a graus variáveis.

### **Breve sumário da Invenção**

[009] Sob um aspecto, a presente invenção é constituída por um aparelho para, e método de, fornecer potência de CA com frequência e ciclo de serviço variável a uma bobina de indução por exploração baseado sobre os requisitos de aquecimento da seção transversal d uma peça passando através da bobina de indução por exploração baseado sobre os requisitos de aquecimento da seção transversal de uma peça passando através da bobina de exploração. Um dispositivo sensor de posição, tal como um servo motor, pode ser usado para fornecer uma entrada para um processador que compara a posição instantânea de entrada da peça com uma tabela armazenada de valores de posição da peça. Cada um de cujos valores de posição da peça podem ser correlacionados com

frequência, nível de potência e duração de tempo que corresponde à potência térmica aplicada requerida naquela posição. Em uma modalidade da invenção, o processador utiliza um algoritmo que emite um comando de modulação por duração de pulso para os circuitos porta de comutação de um inversor para que um decréscimo na duração de pulso de tensão do inversor resulte em uma potência de saída mais baixa do inversor para compensar um aumento na potência de saída do inversor às frequências mais baixas. Reciprocamente um aumento na duração do pulso de tensão do inversor resulta em uma maior potência de saída do inversor para compensar um decréscimo às frequências mais altas.

[0010] Em um outro aspecto, a presente invenção é um aparelho para e um método de alimentar potência de CA com frequência variável e controle de amplitude ou ciclo de serviço a uma bobina de indução com base nas exigências de aquecimento da seção transversal de uma peça de trabalho que se desloca através da bobina.

[0011] Demais aspectos da invenção são expostos no presente relatório descritivo e nas reivindicações.

### **Breve descrição dos desenhos**

[0012] O breve sumário precedente assim como a descrição detalhada que se segue da invenção, é mais bem entendida quando lida em conjunção com os desenhos apensos. Para o fim de ilustrar a invenção, são mostradas nos desenhos apensos modalidades típicas da invenção que tem atualmente preferência, todavia, a invenção não está limitada às disposições e recursos apresentados nos seguintes desenhos apensos:

- A fig. 1 é uma vista esquemática simplificada de um exemplo do aparelho de aquecimento por indução com varredura da presente invenção;
- A fig. 2 é uma vista esquemática simplificada de um exemplo de uma fonte de alimentação e circuito de carga usado com o aparelho de aquecimento por indução com varredura da presente invenção;

- As figs. 3(a) e 3(b) ilustram a aplicação de modulação por duração de pulso para alterar a saída do inversor de potência plena para meia potência;

- A fig. 4(a) ilustra a alteração em magnitude de corrente de carga com uma variação na saída de frequência de um inversor sem qualquer modulação por duração de pulso;

- A fig. 4(b) ilustra a alteração em magnitude de potência de carga com uma alteração na saída de frequência de um inversor sem qualquer modulação por duração de pulso;

- A fig. 4(c) ilustra a alteração em resistência de carga com uma alteração na saída de frequência de um inversor com modulação por duração de pulso;

- A fig. 4(d) ilustra a alteração no fator Q do circuito de carga com uma alteração na saída de frequência de um inversor sem modulação por duração de pulso;

- A fig. 5(a) ilustra a relação entre a tensão de saída de um inversor e a corrente de carga com uma frequência de saída de um inversor de 3.000 Hz e sem modulação por duração de pulso;

- A fig. 5(b) ilustra a relação entre a tensão da saída de um inversor e a corrente de carga com uma frequência de saída de inversor de 10.000 Hz e sem modulação por duração de pulso;

- A fig. 5(c) ilustra a relação entre a tensão de saída de um inversor e a corrente de carga com uma frequência de saída de inversor de 30.000 Hz e sem modulação por duração de pulso em um exemplo da presente invenção;

- A fig. 6 ilustra a relação entre uma tensão de saída de um inversor e a corrente de carga para um inversor utilizando modulação de largura de pulso em um exemplo da presente invenção;

- A fig. 7 é um fluxograma simplificado ilustrando um

exemplo do esquema de controle de potência por indução da presente invenção para controlar a potência por indução com exploração quando a frequência de saída do inversor é alterada durante a exploração;

- A fig. 8 é um esquema parcial simplificado de um outro exemplo da uma fonte de alimentação e circuito de carga usados com o aparelho de aquecimento por indução da presente invenção em que um dispositivo de compatibilização de impedância é usado entre a saída do inversor e o circuito de carga;

- A fig. 9 é um esquema simplificado de um outro exemplo de fonte de alimentação e circuito de carga usados com o aparelho de aquecimento por indução da presente invenção; e

- A fig. 10 é um esquema simplificado de um outro exemplo de fonte de alimentação e circuito de carga usados com o aparelho de aquecimento por indução da presente invenção.

### **Descrição detalhada da invenção**

[0013] É mostrado nas figuras um exemplo do aparelho de aquecimento por indução da presente invenção. Na fig. 1, o inversor 10 fornece potência de CA monofásica para explorar a bobina de indução 12 através de condutores elétricos apropriados tais como barras coletoras. A entrada de CC para o inversor pode ser de qualquer fonte de potência de CC apropriada. O indutor pode compreender qualquer tipo de indutor conhecido da técnica, e pode ser, por exemplo, um indutor de espira única ou de múltiplas espiras, ou um conjunto de indutores individuais que são ligados com uma ou mais fontes de potência de CA. A peça de trabalho 14 é mantida *in situ* por um dispositivo para mover a peça de trabalho através do indutor, que pode ser, por exemplo, um conjunto de transmissão por rosca 16 com braços estendidos 16a, para reter as extremidades da peça de trabalho. Alternativamente a peça de trabalho pode ser estacionária e o indutor pode ser deslocado ao longo da peça de trabalho, ou combinado e coordenado movimento de ambos a peça de

trabalho e indutor pode ser usado. Um dispositivo para girar a peça de trabalho, tal como um motor elétrico 18, também pode ser previsto para girar a peça de trabalho enquanto se desloca através do indutor. Um dispositivo sensor de posição, tal como um servomecanismo 20, fornece sinal de saída de posição 21 ao processador 22. O sinal de saída de posição indica a posição do eixo geométrico-Y da seção transversal da peça de trabalho que está dentro do indutor (isto é, a seção da peça de trabalho que está efetivamente acoplada com o campo magnético gerado pelo fluxo de corrente no indutor).

[0014] Em alguns exemplos da invenção, um dispositivo de compatibilização de impedância 40 pode ser previsto entre a saída do inversor 10 e o circuito de carga conforme ilustrado na fig. 8. A entrada de CC para o inversor pode ser conforme mostrada na fig. 2 ou qualquer outro método apropriado. Componentes de circuito ativos e/ou passivos podem ser usados para o dispositivo de compatibilização de impedância. A título de exemplo e não de limitação, um transformador de relação fixa ou autotransformador ou um transformador ou autotransformador com múltiplas derivações e um aparelho de variação de derivação para prover flexibilidade adicional na compatibilização de impedância entre a saída do inversor e o circuito de carga podem ser usados. Alternativamente, o dispositivo de compatibilização de impedância pode usar componentes de circuito ativos ou uma combinação de componentes de circuito ativos e passivos para obter compatibilização de impedância dinâmica à medida que a impedância de uma carga varia. Por exemplo, um ou mais parâmetros de potência de saída do inversor e/ou parâmetros elétricos de carga podem ser detectados e fornecidos à circuitaria de compatibilização de impedância dinâmica para fazer ajustes dinâmicos na impedância. O dispositivo de compatibilização de impedância 40 pode ser usado em combinação com quaisquer outros exemplos da invenção.

[0015] A peça de trabalho pode ter um ou mais elementos 14a, 14b e 14c que podem requerer diferentes profundidades de penetração de corrente de



potência de aquecimento por indução para tratamento térmico e/ou têmpera quando aqueles elementos passam através do indutor. As regiões da peça de trabalho entre estes elementos podem ou não exigir tratamento térmico. Os múltiplos elementos podem ser espaçados como mostrado na fig. 1 ou localizados adjacentes entre si.

[0016] O processador 22 processa o sinal de saída dos dispositivos sensores de posição para determinar o nível de potência, frequência e duração de tempo do aquecimento por indução a ser realizado na posição de entrada da peça de trabalho em relação à bobina de indução conforme descrito em maior detalhe abaixo.

[0017] A figura 2 é uma mostra esquemática simplificada de um exemplo de uma fonte de alimentação de potência de CA para CC usada com o inversor 10 que ilustra o método de alimentação de potência ao inversor. A seção retificadora 30 compreende um retificador em ponte de onda completa 32 com uma entrada de potência nas linhas A, B e C fornecida por uma fonte apropriada tal como uma rede de potência pública. A seção de filtro 34 compreende o reator limitador de corrente  $L_{LCR}$  e o capacitor filtro CFIL. A seção inversora 10 compreende quatro dispositivos de comutação S1, S2, S3 e S4, e diodos antiparalelos associados D1, D2, D3 e D4, respectivamente. Cada dispositivo comutador pode ser qualquer dispositivo em estado sólido apropriado, tal como um transistor bipolar de porta isolada (IGBT). O circuito de carga conectado na saída do inversor 10 compreende o indutor explorador  $L_{coe}$  e a peça de trabalho 14, que tem regiões, ou características, que são acopladas com campo magnético gerado em torno do indutor quando a peça de trabalho ou indutor são deslocados entre si. A resistência da peça de trabalho e do indutor explorador ( $R_{coil}$ ) compreende a resistência de carga  $R_{load}$ .

[0018] A figura 3(a) ilustra a forma de onda de tensão de saída típica (FULL  $V_{out}$ ) do inversor de ponte mostrado na figura 2 com ausência de

modulação da duração do pulso de tensão. Os comutadores inversores S1 e S4 conduzem durante um primeiro período de tempo,  $T_1$ , e os comutadores inversores S2 e S3 conduzem durante um segundo período de tempo não-superposto,  $T_1$ , para produzir a forma de onda de saída plena ilustrada com uma frequência igual a  $1/2T_1$ . A figura 3(b) ilustra a forma de tensão de saída típica (HALF  $V_{out}$ ) do inversor de ponte com ciclo de serviço de 50% (alfa). Cada um dos comutadores inversores continua a conduzir durante o mesmo período de tempo  $T_1$ , como na fig. 3(a), porém com os períodos de condução para os comutadores S3 e S4 avançado em meio período de tempo (isto é, o ciclo de serviço é igual a 50%) para produzir a metade da tensão de saída plena. Com esta disposição, a carga é curto-circuitada cada meio período. A alteração dos períodos de condução superpostos para os comutadores S3 e S4 resulta em diferentes valores para o ciclo de serviço. Uma vez que a potência é proporcional ao quadrado da tensão alimentada, a potência aplicada ao indutor também se altera quando o ciclo de serviço varia. Na presente invenção o controle de frequência variável é realizado alterando o período de tempo,  $T_i$  enquanto que a magnitude da tensão (potência) é ajustada alterando o ciclo de serviço.

[0019] Os efeitos sobre as características de saída de uma fonte de alimentação com frequência de saída variável que não utiliza o controle de modulação de duração de pulso da presente invenção são ilustrados com um circuito de carga de linha base para uma peça de trabalho específica. Para um inversor dotado de uma potência de saída de 100.000 Watts ( $P(f_0)$ ) a 635 volts ( $V_{out}$ ), e frequência ( $f_0$ ) de 10.000 Hz, as características de circuito de carga de linha base são estabelecidas como:

$$L_0 = 30 \times 10 \text{ Henries de indutância da carga inversora}$$

$$R_0 = 0,4 \text{ ohms de resistência da carga inversora; e}$$

$$Q_0 = (2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L_0) / R_0 = 4.712 \text{ para o fator Q de circuito de}$$

carga

[0020] A corrente de carga máxima de linha base pode ser calculada como 772,45 Amperes pela Equação (1);

$$I_0 = \frac{V_{OUT}}{R_0} \cdot \left(1 - e^{\frac{-R_0}{2L_0 \cdot f_0}}\right)$$

[0021] A fig. 4(a) ilustra o decréscimo em corrente de indutor,  $I(f)$ , normalizada para a corrente de linha base, quando a frequência de saída,  $f$ , do inversor, que pode ser calculada a partir da equação (2):

$$I(f) = \frac{V_{OUT}}{R_0 \sqrt{\frac{f}{f_0}}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-R_0}{2L_0 \sqrt{f \cdot f_0}}}\right)$$

[0022] A fig. 4(b) ilustra o decréscimo em potência de calefação por indução,  $P(f)$ , normalizado para a potência de linha base, quando a frequência de saída,  $f$ , do inversor aumenta, que pode ser calculado a partir da equação (3);

$$P(f) = \frac{V_{OUT}^2}{2R_0 \sqrt{\frac{f}{f_0}}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-R_0}{2L_0 \sqrt{f \cdot f_0}}}\right)^2$$

[0023] A fig. 4(c) ilustra o aumento em resistência de carga,  $R(f)$ , quando a frequência de saída,  $f$ , do inversor aumenta, que pode ser calculada a partir da equação (4);

$$R(f) = R_0 \cdot \sqrt{\frac{f}{f_0}}$$

[0024] A fig. 4(d) ilustra o aumento no fator  $Q$  do circuito de carga quando a frequência de saída,  $f$ , de inversor aumenta, que pode ser calculada a partir da equação (5):

$$Q(f) = Q_0 \cdot \sqrt{\frac{f}{f_0}}$$

[0025] As figuras 5(a) a 5(c) ilustram as relações generalizadas nas figs. 4(a) a 4(d) para um exemplo específico em que o controle de modulação por duração de pulso da presente invenção não é usado. A fig. 5(c) representa graficamente as saídas de tensão e corrente de um inversor operando à plena

potência nominal e uma frequência de 30 000 Hz sem qualquer controle de modulação por duração de pulso.

[0026] Na fig. 5(a) a frequência de saída do inversor é baixa para 3.000 Hz e a saída de corrente (e potência) é relativamente alta sem controle por modulação de duração de pulso. Na presente invenção o controle de modulação por duração de pulso da saída do inversor pode ser usado para reduzir a saída de potência do inversor utilizando um ciclo de serviço relativamente grande.

[0027] Na fig. 5(b) a frequência do inversor está a 10.000 Hertz e a potência de saída é inferior à saída de potência a 3.000 Hertz sem controle por modulação de duração de pulso, porém ainda maior que a potência plena nominal (corrente) do inversor mostrada na fig. 5(c). Na presente invenção o controle por modulação de duração de pulso da invenção pode ser usado com um ciclo de serviço mais baixo que aquele usado a 3.000 Hz para manter a saída de potência do inversor em ou abaixo do valor nominal.

[0028] Em geral, na presente invenção, o controle por modulação de duração de pulso é usado para alterar a potência de saída do inversor a qualquer frequência operação em relação àquela que ocorreria sem controle por modulação de duração de pulso. Em geral o ciclo de serviço é diminuído e quando a frequência decresce para reduzir a potência de saída do inversor, e o ciclo de serviço é aumentado quando a frequência aumenta para aumentar a potência de saída do inversor.

[0029] A fig. 6 ilustra ainda a características da corrente de carga sem controle por modulação de duração de pulso. Quando existe uma tensão de saída de inversor não-zero, a corrente de carga,  $I_{\text{carga}}$ , pode ser calculada pela equação (6):

$$I_{\text{CARGA}} = \frac{V_{\text{SAÍDA}}}{R_{\text{CARGA}}} \left( 1 - e^{-\frac{R_{\text{CARGA}}}{L_{\text{CARGA}}} \cdot t} \right)$$

[0030] Quando existe tensão de saída de inversor zero, a corrente de

carga pode ser calculada a partir da equação (7):

$$I_{CARGA} = I_{INICIAL} \cdot e^{-\frac{R_{CARGA}}{L_{CARGA}} \cdot t}$$

onde  $I$  inicial é a magnitude de corrente quando a tensão de saída do inversor transita para zero.

[0031] Pela fig. 6, tanto mais curto o ciclo de serviço, tanto menor o valor máximo da corrente de carga (e potência) antes da corrente de carga baixar quando a tensão de saída é zero. Reciprocamente, tanto mais longo o ciclo de serviço, tanto maior o valor de pico de corrente de carga (e potência) antes da corrente de carga baixar quando a tensão de saída é zero.

[0032] A fig. 7 ilustra um fluxograma simplificado para um exemplo não limitativo do método de aquecimento por indução com exploração da presente invenção. As rotinas identificadas no fluxograma podem ser implementadas em software de computador que pode ser executado com hardware apropriado. A rotina 100 introduz uma coordenada de exploração (Y) de uma peça de trabalho (WP) que representa a posição da peça de trabalho no interior do indutor 12. A rotina 102 introduz valores de potência (Py), frequência (Fy) e tempo (Ty) para aquecimento por indução na posição Y. Estes valores podem ser previamente armazenados em um dispositivo de memória, por exemplo, como uma tabela de consulta baseado sobre valores estabelecidos pelo teste experimental da peça de trabalho com o aparelho. Alternativamente, um operador do aparelho de indução por exploração pode manualmente introduzir estes valores, ou outro método pode ser usado para determinar a frequência requerida, nível de potência, e, se usado, o valor de tempo variável para tratamento térmico por indução de cada posição da peça de trabalho. A rotina 104 computa o ciclo de serviço requerido (DCy) para a saída de inversor pela equação (8):

$$\text{Ciclo de Serviço (em \%)} = [Py / P(Fy)] \times 100$$

onde  $P(Fy)$  é calculado pela equação (3) com um circuito de carga de

linha base apropriado, determinado a partir da peça de trabalho efetiva sendo termicamente tratada por indução.

[0033] A rotina 106 controla a comutação dos dispositivos comutadores de fonte de alimentação para realizar a frequência de saída e ciclo de serviço desejados. Neste exemplo não limitativo, a rotina 106 emite sinais de controle inversor de porta para os circuitos de desbloqueio para os comutadores de inverso para realizar a frequência requerida,  $F_y$ , e ciclo de serviço,  $DC_y$ . A rotina 108 determina se a potência de saída medida efetiva está à potência prefixada  $P_y$ . A potência de saída medida efetiva pode ser introduzida pelo uso de dispositivos sensores apropriados. Se a potência medida efetiva não é igual à potência prefixada requerida, então o ciclo de serviço é apropriadamente ajustado na rotina 110, e a rotina 108 se repete. Se a potência medida efetiva é igual à potência prefixada requerida então a rotina 112 testa para ver se o tempo prefixado  $T_y$  transcorreu. Se o tempo prefixado não transcorreu, então a rotina 108 é repetida; se o tempo prefixado transcorreu, então a rotina 114 emite um sinal de controle para o sistema posicionador de peça de trabalho para avançar a peça de trabalho a posição incremental seguinte para tratamento térmico por indução e retorna à rotina 100 para execução. Em outros exemplos da invenção, o tempo para aquecimento por indução em cada posição  $Y$  será o mesmo para todas as posições da peça de trabalho dentro do indutor; para este esquema, o controle de frequência e controle de ciclo de serviço, quando a frequência varia, são usados para aquecer por indução cada posição do indutor quando cada posição é avançada através do indutor a uma taxa de velocidade constante.

[0034] Em outros exemplos da invenção, o movimento e posicionamento da peça de trabalho através do indutor podem ser predeterminados, por exemplo, onde um aparelho de exploração por indução sucessivamente trata termicamente muitas peças de trabalho idênticas. Nestes sistemas, os ajustes de potência, frequência, tempo, e ciclos de serviço em

cada posição da peça de trabalho podem ser predeterminados por teste experimental com a peça de trabalho e o aparelho de exploração por indução da presente invenção, e executados sem introdução adicional ou computação de qualquer um ou de todos estes valores para cada sucessiva peça de trabalho idêntica termo tratada com o aparelho. O posicionamento incremental ou sucessivo de partes ou características da peça de trabalho no indutor pode ser realizado como movimento de avanço passo a passo discreto da peça de trabalho ou indutor, ou uma combinação de ambos, quer como etapas diminutas finas que se aproximam de avanço contínuo da peça de trabalho ou indutor, ou etapas mais grosseiras visualmente discerníveis como movimento escalonado. Embora os termos “parte selecionada”, “múltiplas características”, e “locações” sejam utilizados para descrever seções da peça de trabalho colocada no interior do indutor para tratamento térmico por indução com frequência e ciclo de serviço variáveis, a presente invenção inclui variar a frequência e/ou ciclo de serviço enquanto a parte, característica ou locação passa através do indutor. Isto é, subseções de cada parte, característica ou locação podem ser termicamente tratadas com frequências e ciclos de serviço variáveis quando as subseções da parte, característica ou locação passam através do indutor.

[0035] Em outros exemplos da invenção o controle de modulação por duração de pulso pode ser usado para controlar a saída de potência do inversor quando a frequência de saída do inversor varia em uma posição da peça de trabalho dada, por exemplo, para realizar o tratamento térmico e tempera para uma característica da peça de trabalho. O tratamento térmico sequência adicional de características compreendendo a peça de trabalho não está limitado a tratamento térmico sequencial na ordem em que as características são posicionadas na peça de trabalho. Por exemplo, reportando-se à peça de trabalho 14 na fig. 1, as características 14a, 14b e 14c podem ser posicionadas e termicamente tratadas sucessivamente naquela

ordem através do indutor 12. Alternativamente, por exemplo, as características 14a, 14c e 14b podem ser posicionadas e termicamente tratadas em sequência naquela ordem através do indutor.

[0036] Em outros exemplos da invenção controle de modulação de largura de pulso pode ser usado para controlar a saídas de potência do inversor à medida que a frequência do inversor varia, como aqui descrito, para otimizar pulse de aquecimento por indução em vários tipos de peças de trabalho para vários tipos de tratamentos térmicos por indução, tais como, mas não limitado a, tratamento térmico de superfície, tratamento térmico de penetração em profundidades variáveis de penetração da peça de trabalho até aquecimento completo do núcleo, ou tratamento térmico por aplicação material, por exemplo, para obter ligação de um material de revestimento aplicado à superfície da peça de trabalho por aquecimento por indução. A peça de trabalho pode ser um peça de trabalho contínua, por exemplo uma tira, arame ou tubo de várias dimensões, ou oca ou maciça, ou peças de trabalho discretas tais como perfis maciços, perfis tubulares, blocos retangulares ou quadrados ou qualquer outra forma que requer aquecimento por indução total ou parcial para obter variações na estrutura metalúrgico ou características da peça de trabalho, ou para permitir aplicação de materiais à peça de trabalho original, por exemplo, em revestimento, brasagem ou difusão.

[0037] Por exemplo uma peça de trabalho contínua, tal como, mas não limitada a um arame pode ser alimentada continuamente por um ou mais indutores que são conectados à saída de um inversor, ou diretamente ou por via um dispositivo de compatibilização de impedância. Um aparelho apropriado pode ser provido para alimentar o arame através do um ou mais indutores, tal como, mas não limitado a, um carretel de suprimento de arame em um lado do um ou mais indutores e um carretel de enrolamento acionado por potência no lado oposto do um ou mais indutores. O arame contínuo pode



ser representado como uma progressão contínua de seções transversais da peça de trabalho contínuo que passam através do um ou mais indutores enquanto controle de modulação de largura de pulso é usado para controlar a saída de potência do inversor à medida que a frequência do inversor varia para obter o tipo desejado de tratamento térmico para cada uma das seções transversais progressivas passando através do um ou mais indutores. Além disso em outros exemplos da invenção um ou mais parâmetros da peça de trabalho, tais como, mas não limitados a, o diâmetro de seção transversal de cada seção transversal progressiva do arame pode ser detectado dinamicamente antes de ser alimentado através do um ou mais indutores de forma que desvios de um diâmetro de seção transversal nominal podem ser detectados e usados no ajuste do controle de modulação de largura de pulso e frequência à medida que o diâmetro de seção transversal desvia do nominal para obter um tratamento térmico por indução desejado nas seções transversais progressivas. Por este método, por exemplo, temperatura de superfície aquecida por indução uniforme pode ser mantida até mesmo enquanto o diâmetro das seções transversais progressivas da peça de trabalho desvia de um valor nominal. A detecção do diâmetro de seção transversal das seções transversais progressivas pode ser realizada, por exemplo, por um conjunto de visada a laser adequadamente posicionado em torno do arame. O diâmetro de seção transversal é representativo de uma variação paramétrica da peça de trabalho que pode ser detectada para ajuste do controle de modulação de largura de pulso e frequência da presente invenção. Ainda mais a velocidade com a qual o arame está se movendo através do um ou mais indutores pode ser variada para ajustar o período de tempo que cada uma das seções transversais progressivas é acoplada com o campo magnético gerado por fluxo de corrente através do um ou mais indutores para obter o tratamento térmico por indução desejado de cada uma ou das seções transversais progressivas. Em outros exemplos da invenção a uma ou mais bobinas de

indução podem se mover também ao longo do comprimento da peça de trabalho, ou só ou em combinação com movimento da peça de trabalho.

[0038] Para peças de trabalho discretas uma série de peças de trabalho discretas podem ser alimentadas através de uma ou mais bobinas de indução por um aparelho de transporte apropriado enquanto o tratamento térmico de cada seção transversal progressiva de cada peça de trabalho discreta é obtido de uma maneira similar ao tratamento térmico de peças de trabalho contínuas como descrito acima. Em algumas aplicações uma peça de trabalho discreta pode ser alimentada individualmente através de uma ou mais bobinas de indução, ou a peça de trabalho pode ser mantida estacionária e a uma ou mais bobinas de indução podem ser movidas ao longo do comprimento da peça de trabalho, ou um movimento coordenado tanto da peça de trabalho quanto da uma ou mais bobinas de indução pode ser usado.

[0039] Em outros exemplos da invenção presente, controle de amplitude, ou só ou em combinação com controle de modulação de largura de pulso como descrito acima, pode ser usado para variar a potência de saída do inversor a qualquer frequência operacional a partir da qual que iria ocorrer sem controle de amplitude ou um só, ou em combinação com controle de modulação de largura de pulso.

[0040] Um método de obter controle de amplitude é ilustrado no diagrama esquemático simplificado mostrado na fig. 9. O retificador 32a pode ser composto de elementos de comutação ativos 33a-33f, tais como retificadores controlados de silício, de forma que a amplitude da voltagem de saída de CC do retificador (entrada para o inversor 10) pode ser variada por controle dos elementos de comutação ativos para prover controle de amplitude de saída do inversor em combinação com saída de frequência variável do inversor 10.

[0041] Alternativamente um regulador de pulsador, representado pelo circuito regulador de pulsador 42, de exemplo não limitativo na fig. 10, pode

ser usado para prover potência de CC regulada à entrada do inversor 10 para variar a potência de saída do inversor em qualquer frequência operacional a partir da qual que iria ocorrer sem controle de amplitude.

[0042] Alternativamente controle de amplitude pode substituir controle de modulação de largura de pulso em quaisquer dos exemplos acima da invenção.

[0043] É observado que os exemplos precedentes foram apresentados meramente para a finalidade de explanação e não devem ser de modo algum interpretados como limitativos da presente invenção. Embora a invenção tenha sido descrita com referência a várias modalidades, é entendido que os termos que foram usados aqui são termos de descrição e ilustração, mais exatamente do que termos limitativos. Além disso, embora a invenção tenha sido descrita aqui com referência específicos dispositivos, materiais e modalidades, a invenção não é proposta para estar limitada aos particulares expostos aqui; mais exatamente, a invenção se estende a todas as estruturas, métodos e aplicações funcionalmente equivalentes, tal como se enquadram dentro do âmbito das reivindicações apenas. Aqueles versados na técnica, tendo o benefício dos ensinamentos do presente relatório descritivo, podem efetuar numerosas modificações e variações podem ser introduzidas sem se afastar do âmbito e espírito da invenção nos seus aspectos.

## REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho de tratamento térmico por indução de uma peça de trabalho contínua ou discreta, o aparelho compreende:

uma fonte de potência (10) que tem uma saída de CA com uma modulação de largura de pulso;

um indutor (12) conectado à saída de CA para gerar um campo magnético de CA;

um meio para produzir movimento relativo entre a peça de trabalho contínua ou discreta (14) e o indutor para acoplar magneticamente seções transversais progressivas da peça de trabalho contínua ou discreta (14) com o campo magnético; e

um meio para detecção das seções transversais progressivas magneticamente acopladas com o campo magnético de CA,

caracterizado pelo fato de compreender:

um meio para ajustar seletivamente a frequência da saída de CA quando cada uma das seções transversais progressivas é magneticamente acoplada com o campo magnético de CA para tratamento térmico por indução em resposta a uma variação em dimensão de seção transversal das seções transversais progressivas magneticamente acopladas com o campo magnético de CA; e

um meio para ajustar seletivamente a potência da saída de CA variando o ciclo de serviço da saída de CA quando cada uma das seções transversais progressivas é acoplada com o campo magnético de CA para tratamento térmico por indução e a frequência da saída de CA é ajustada em resposta à variação em dimensão de seção transversal das seções transversais progressivas.

2. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de incluir um meio para ajustar seletivamente o período de tempo que cada uma das seções transversais progressivas é acoplada com o campo

magnético de CA para tratamento térmico por indução.

3. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a variação na dimensão de seção transversal compreende uma variação no diâmetro de seção transversal da peça de trabalho contínua ou discreta (14).

4. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de incluir um dispositivo de compatibilização de impedância (40) conectado entre a saída de CA da fonte de potência e o indutor.

5. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que a fonte de potência é um inversor com uma entrada de CC e uma saída de CA e o meio para ajustar seletivamente a potência da saída de CA compreende adicionalmente variar a amplitude da entrada de CC para o inversor.

6. Método de tratamento térmico por indução de uma peça de trabalho contínua ou discreta (14) que compreende as etapas de:

alimentar potência elétrica a pelo menos um indutor (12) para gerar um campo magnético de CA em torno do pelo menos um indutor;

posicionar sequencialmente a peça de trabalho contínua ou discreta (14) em seções transversais progressivas da peça de trabalho contínua ou discreta (14) relativa ao pelo menos um indutor (12) para submeter as seções transversais progressivas a um tratamento térmico trazendo as seções transversais progressivas na proximidade do campo magnético de CA; e

detectar as seções transversais progressivas relativas ao pelo menos um indutor (12) que são submetidas ao tratamento térmico,

caracterizado pelo fato de compreender:

variar seletivamente a frequência da potência elétrica enquanto cada uma das seções transversais progressivas é submetida sequencialmente ao tratamento térmico; e

variar seletivamente a magnitude da potência elétrica variando o ciclo de serviço da potência elétrica enquanto cada uma das seções transversais progressivas da peça de trabalho contínua ou discreta (14) é posicionada sequencialmente na proximidade do campo magnético de CA e a frequência da potência elétrica é ajustada.

7. Método de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de incluir uma etapa de variar seletivamente o tempo de tratamento térmico que cada uma das seções transversais progressivas é indutivamente acoplada com o campo magnético.

8. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 ou 7, caracterizada pelo fato de que o tratamento térmico é um tratamento térmico de superfície, um tratamento térmico de penetração em seção transversal ou um tratamento térmico de ligação.

9. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 8, caracterizado pelo fato de incluir uma etapa de compatibilizar a impedância da fonte de potência elétrica com a impedância da peça de trabalho contínua ou discreta (14).

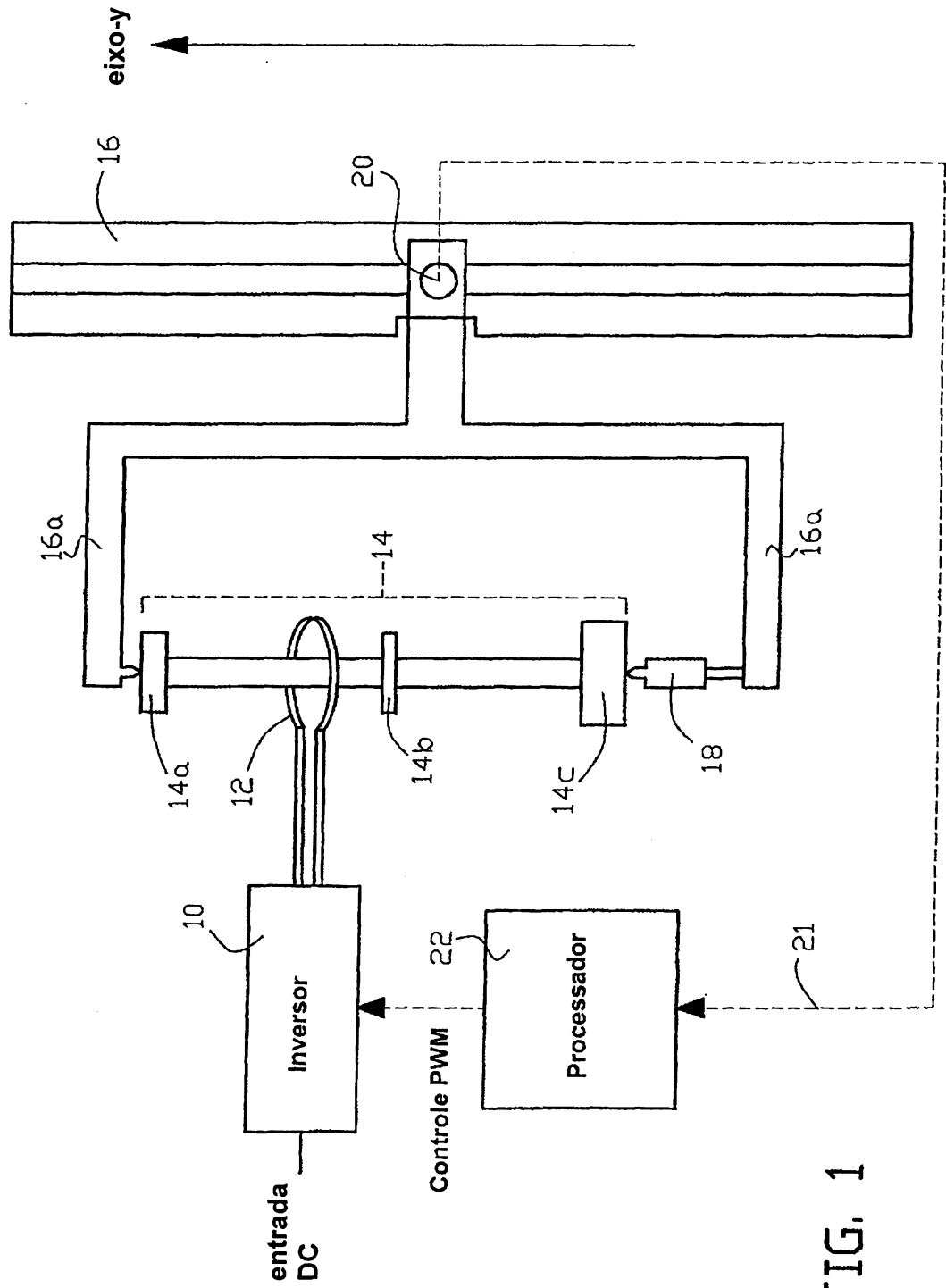


FIG. 1

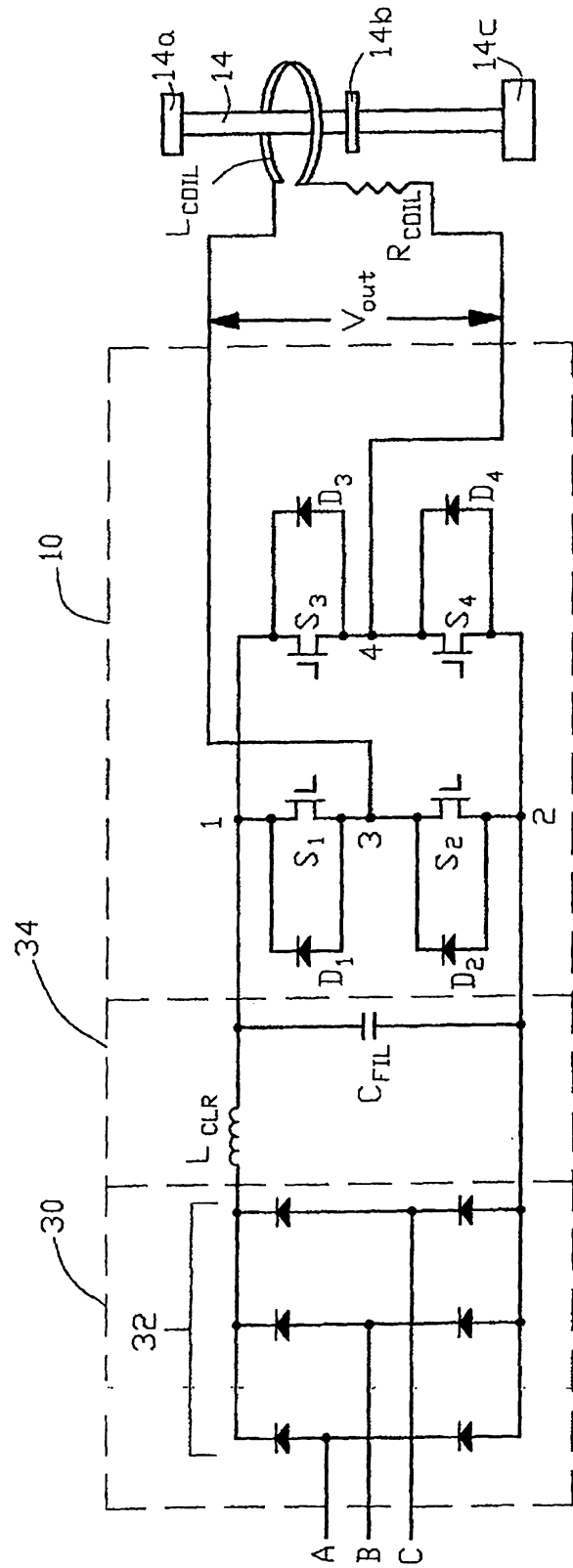


FIG. 2



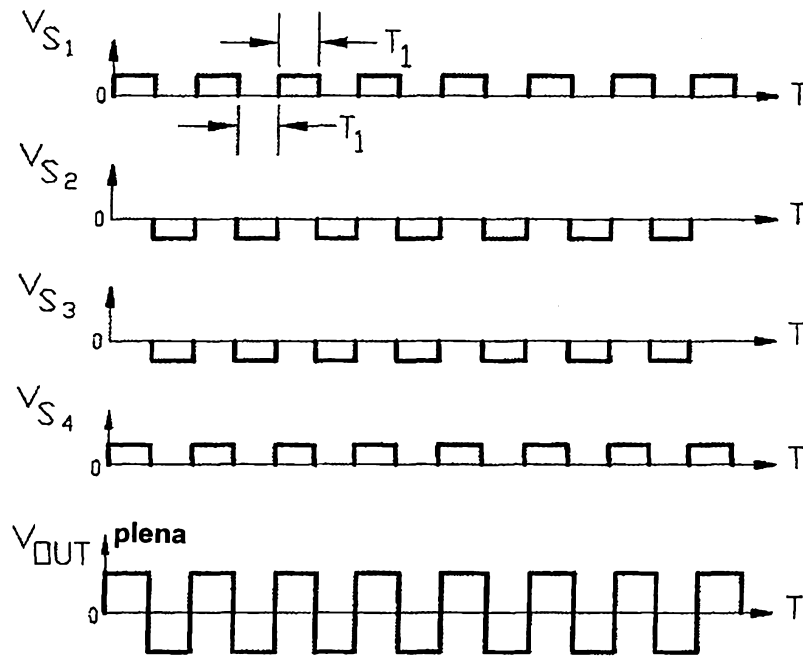


FIG. 3(a)

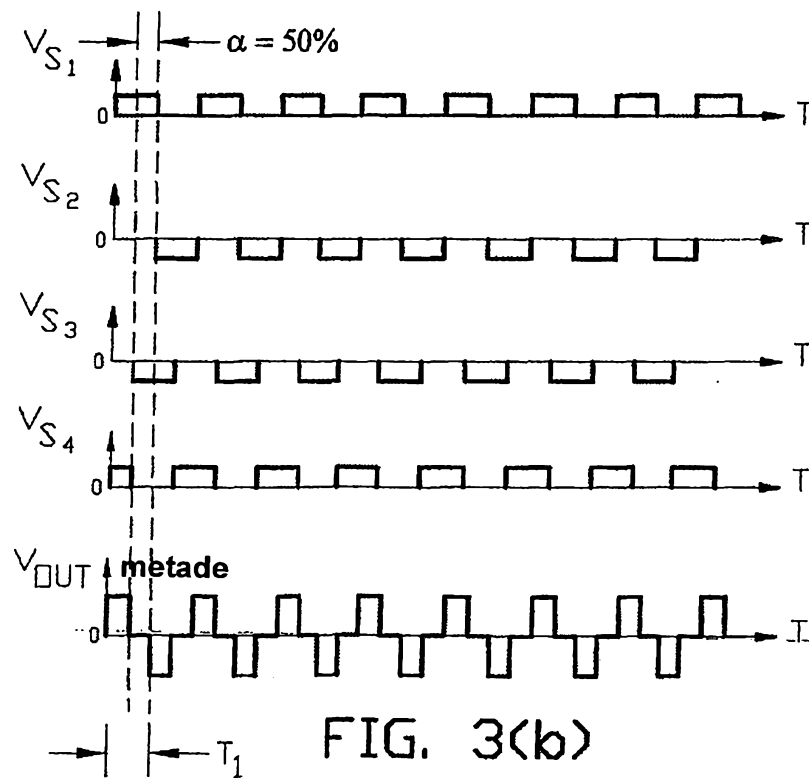


FIG. 3(b)

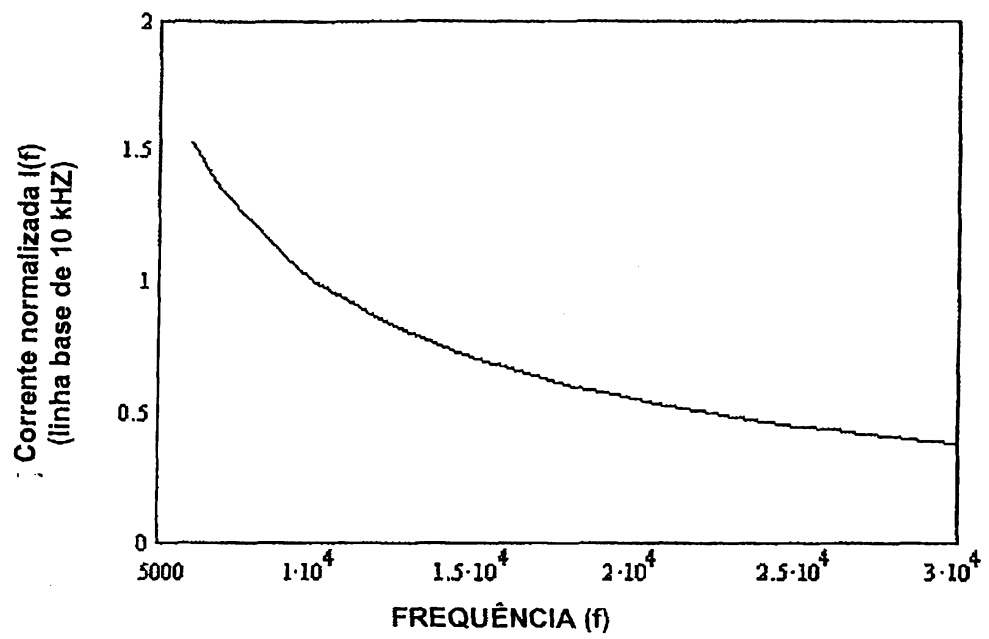


FIG. 4(a)

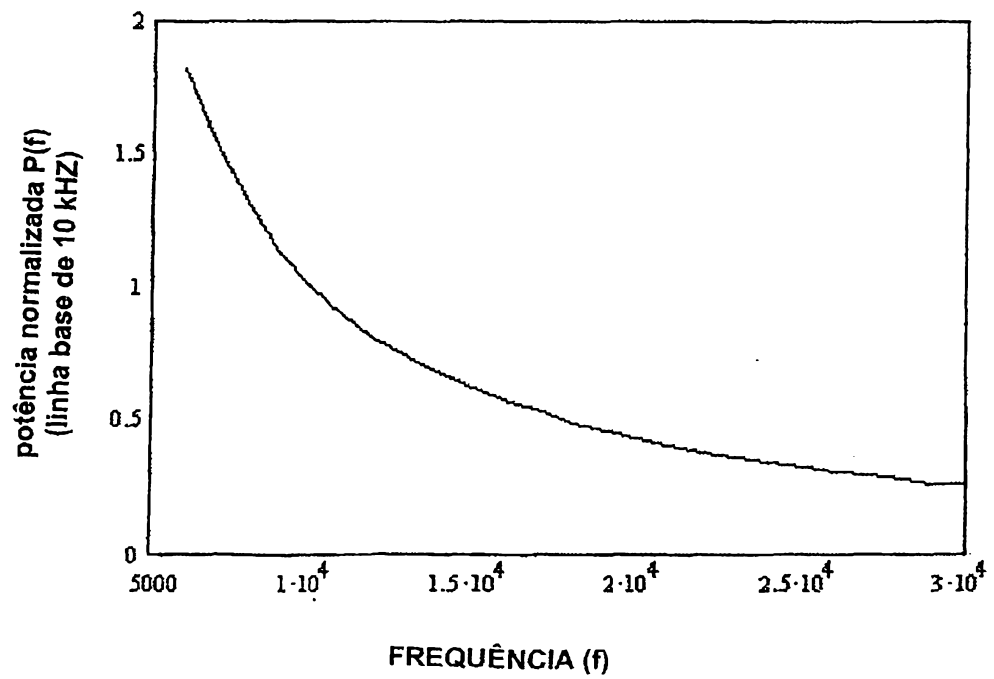


FIG. 4(b)

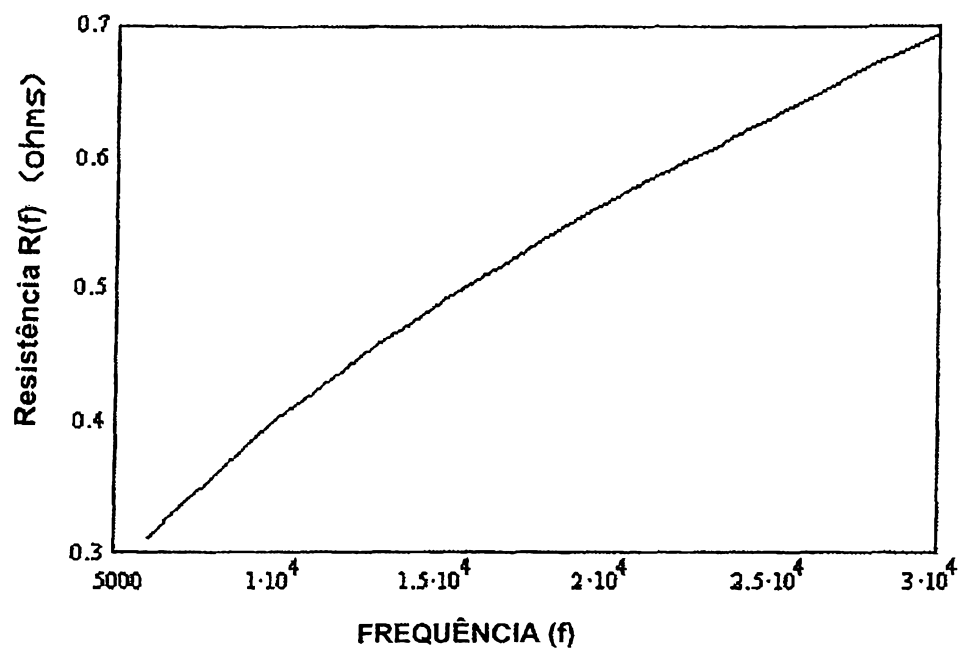


FIG. 4(c)

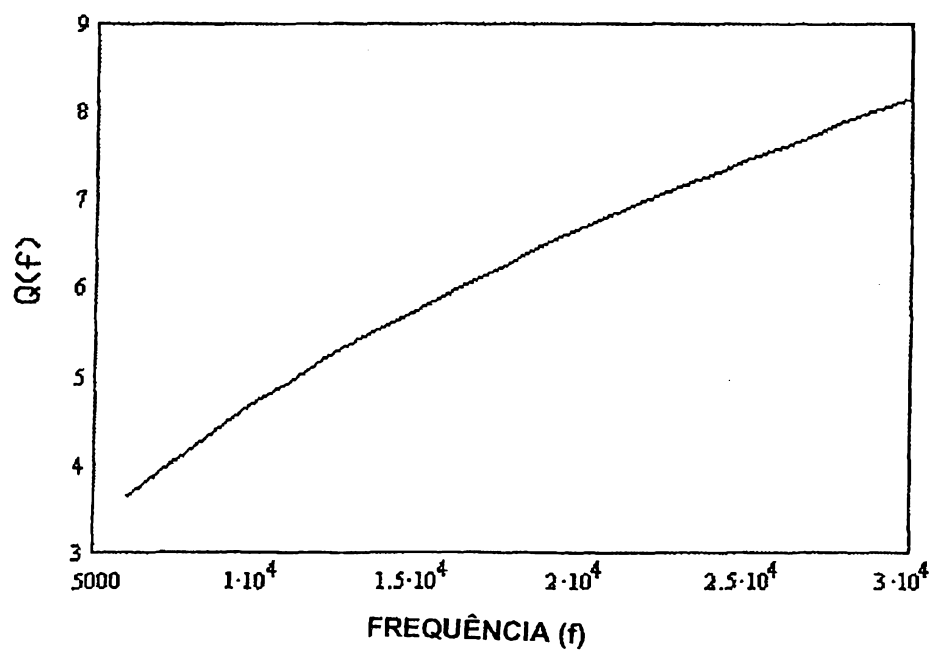


FIG. 4(d)

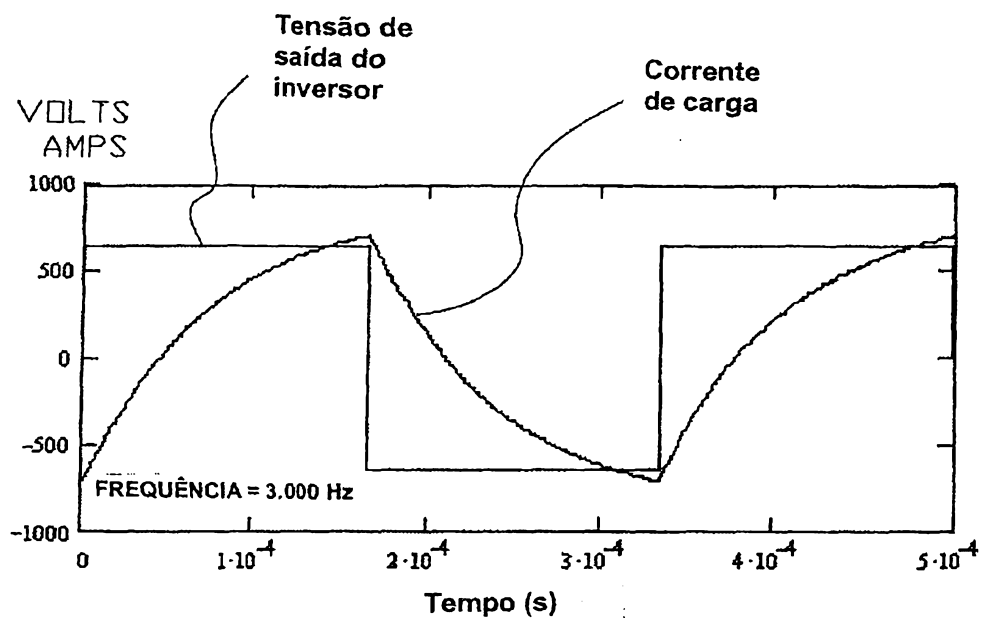


FIG. 5(a)

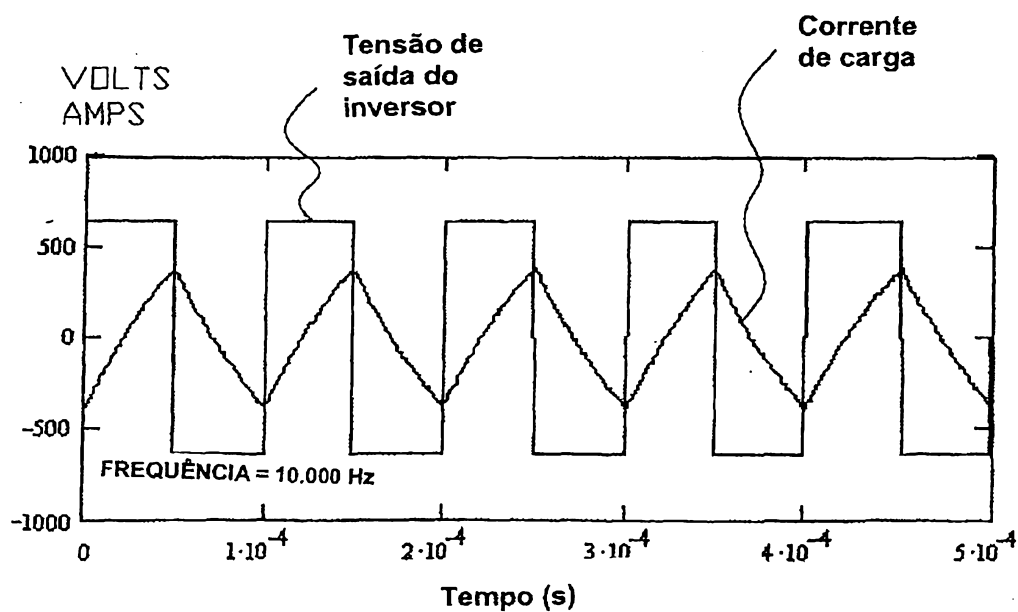


FIG. 5(b)

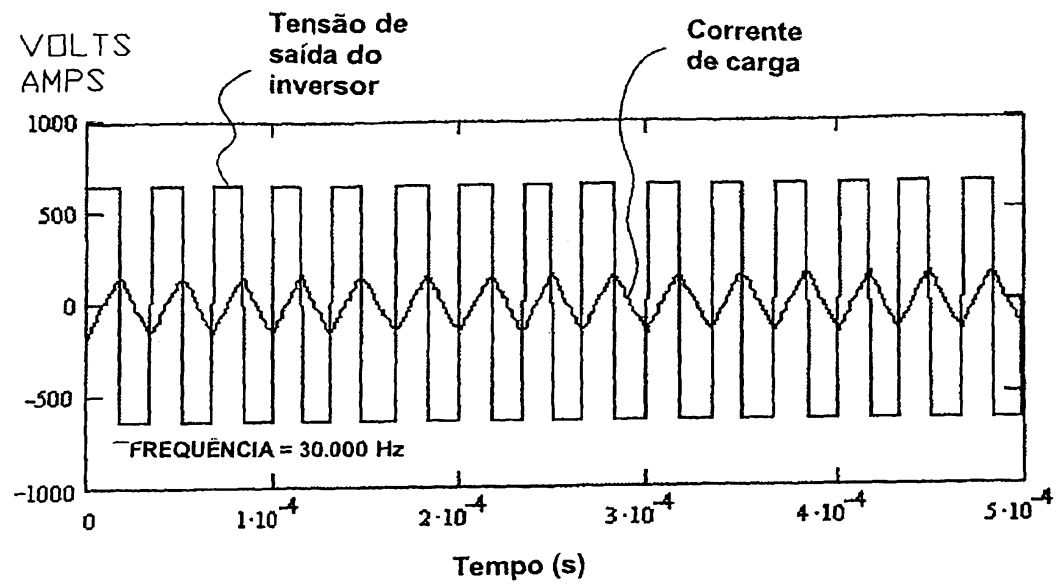


FIG. 5(c)

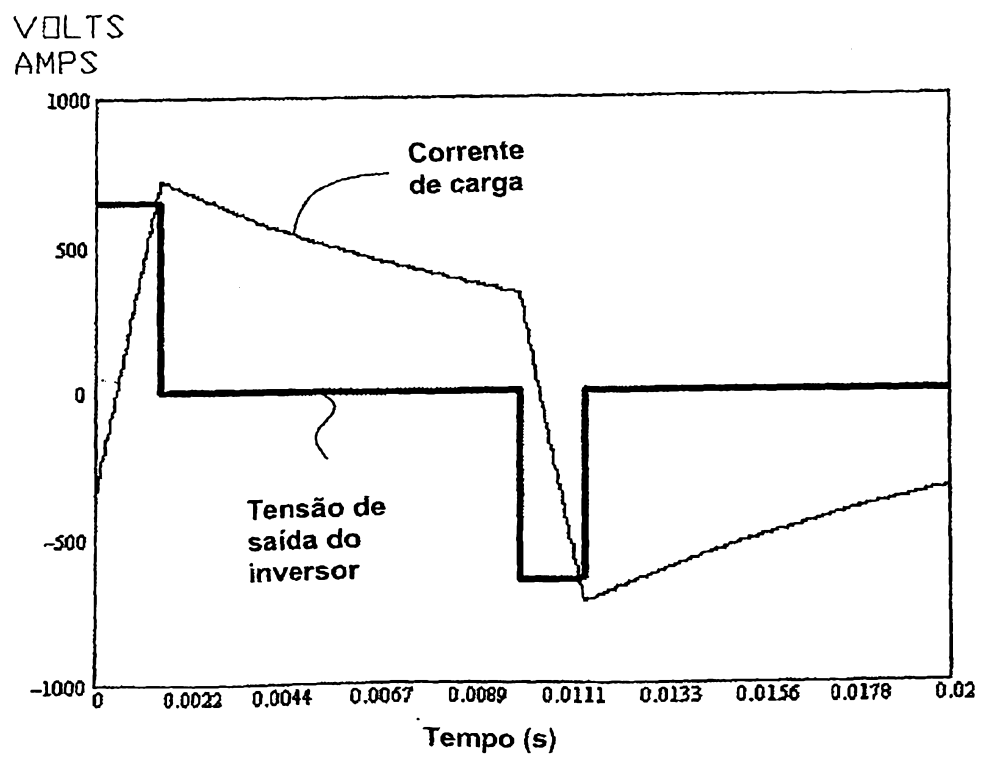
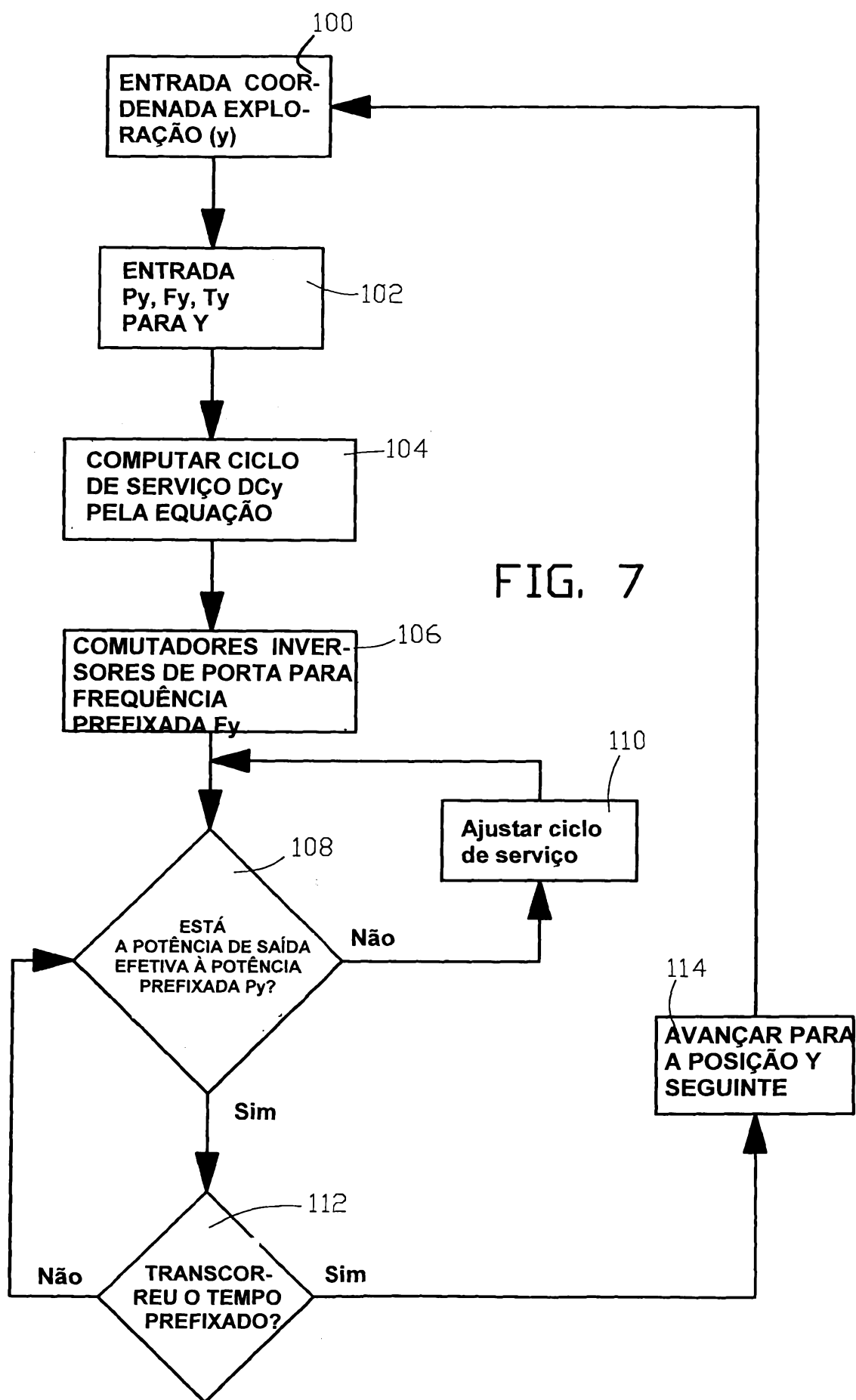


FIG. 6



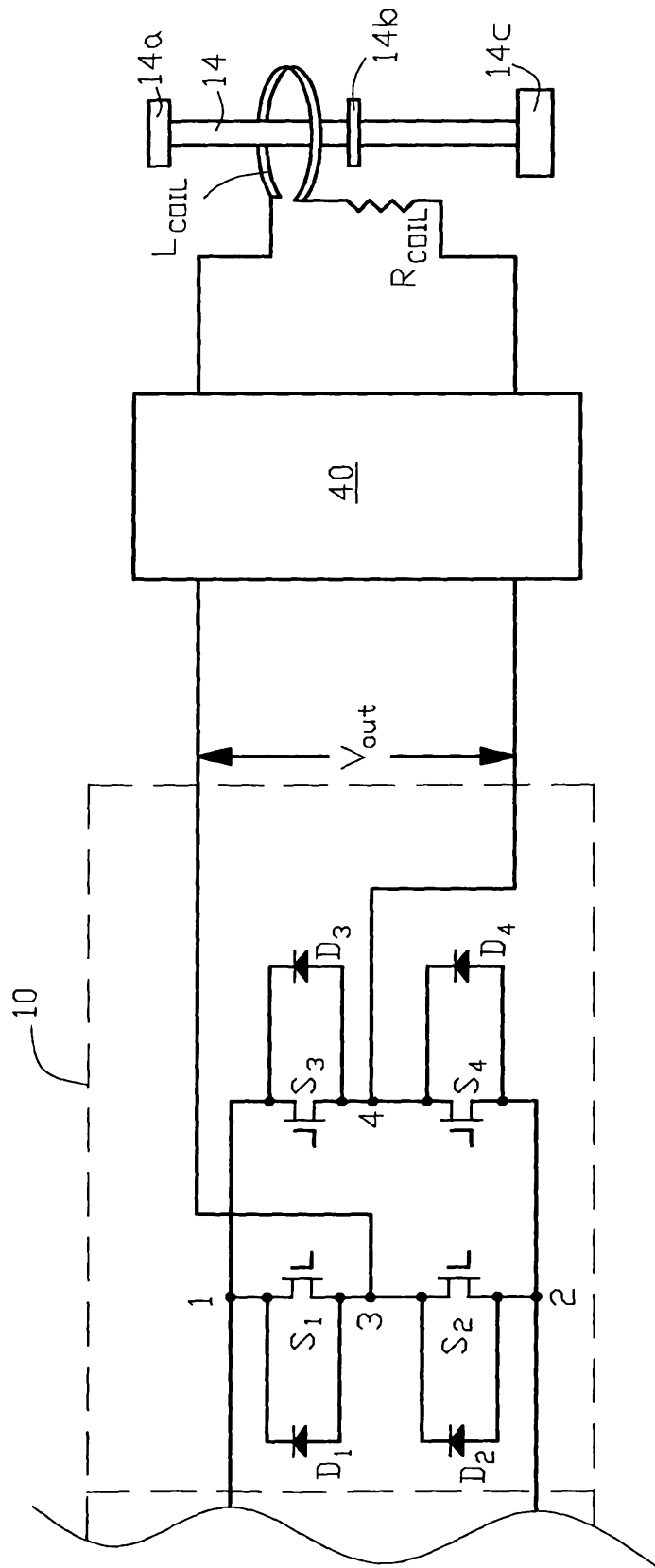


FIG. 8

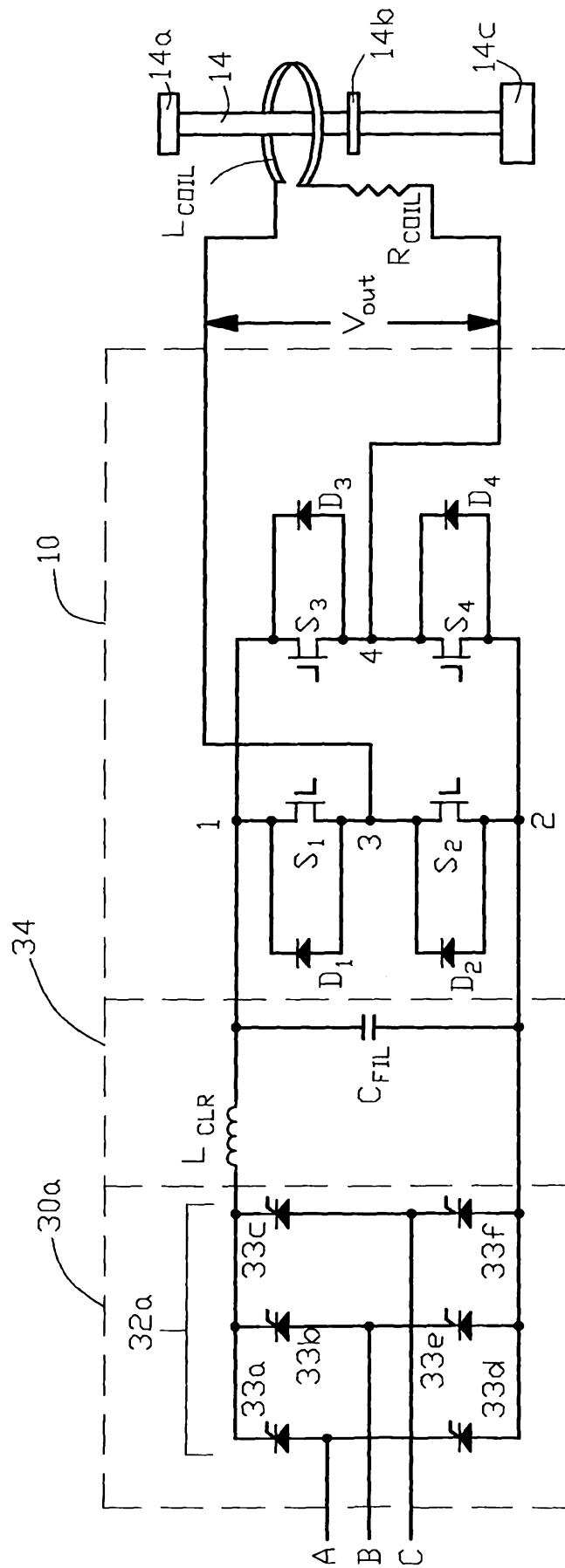


FIG. 9



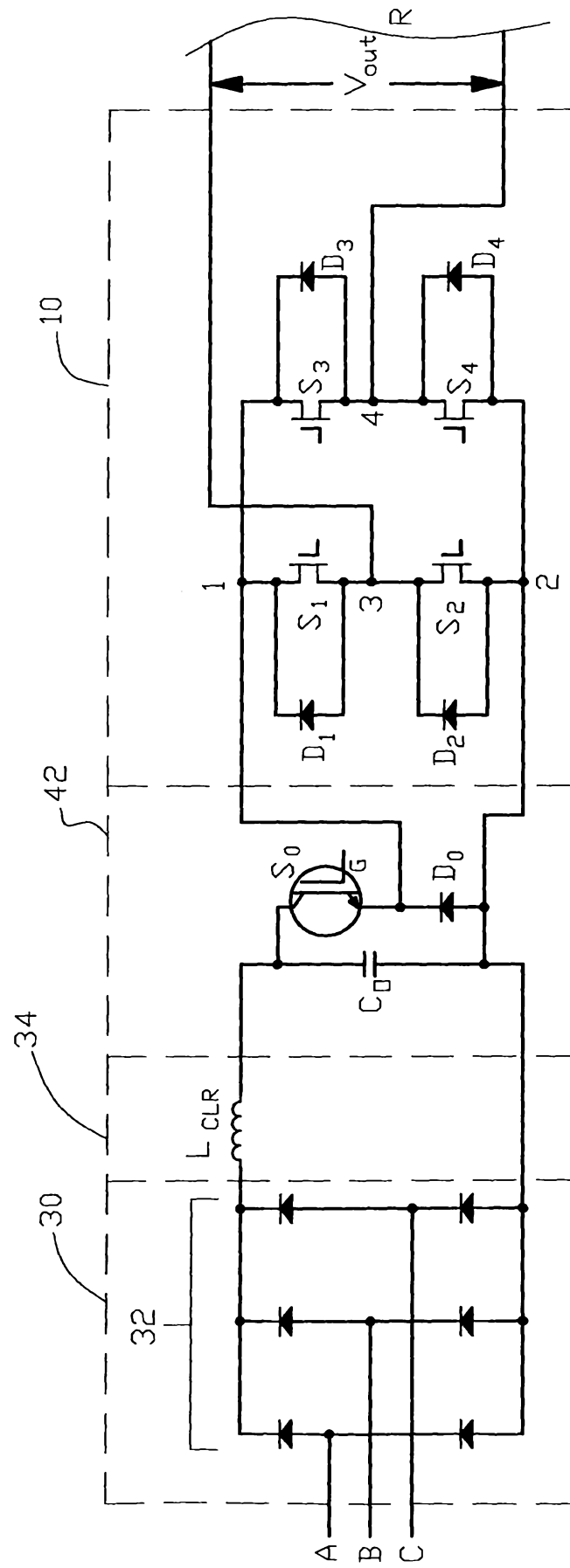


FIG. 10