



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

(21) **PI 1001388-1 A2**



(22) Data de Depósito: 05/05/2010  
(43) Data da Publicação: 27/12/2011  
(RPI 2138)

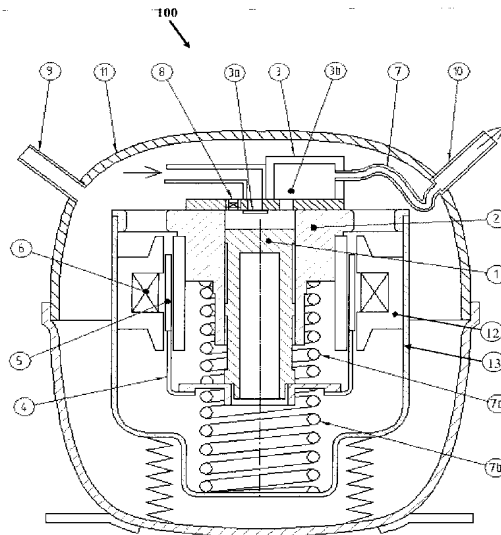
(51) *Int.Cl.:*  
F04B 49/06

(54) **Título:** SISTEMA DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE, MÉTODO DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE E COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE

(73) **Titular(es):** Whirlpool S.A.

(72) **Inventor(es):** Paulo Sérgio Dainez

(57) **Resumo:** SISTEMA DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE, MÉTODO DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE E COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE. A presente invenção refere-se a um sistema e a um método de controle para pistão de compressor linear ressonante (100) especialmente projetados para operar na sua máxima eficiência, sendo tal sistema capaz de acionar o dito compressor sem o uso de sensores para medir grandezas ou variáveis mecânicas. A presente invenção faz referência ainda a um método de controle para pistão de um compressor linear ressonante, cujas etapas permitem estimar a velocidade e o deslocamento do referido pistão, a fim de controlar de forma eficiente o motor do compressor. Adicionalmente, a presente invenção refere-se a um compressor linear ressonante (100) dotado de um sistema de controle tal como proposto no objeto ora reivindicado.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**SISTEMA DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE, MÉTODO DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE E COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE**".

5 A presente invenção refere-se a um sistema de controle para pistão de compressor linear ressonante especialmente projetado para operar na sua máxima eficiência, sendo tal sistema capaz de acionar o dito compressor sem o uso de sensores para medir grandezas ou variáveis mecânicas.

10 A presente invenção faz referência ainda a um método de controle para pistão de um compressor linear ressonante, cujas etapas permitem estimar a velocidade e o deslocamento do referido pistão, a fim de controlar de forma eficiente o motor do compressor.

15 Adicionalmente, a presente invenção refere-se a um compressor linear ressonante dotado de um sistema de controle tal como proposto no objeto ora reivindicado.

Descrição do Estado da Técnica

20 Os compressores de pistão alternativos geram pressão comprimindo o gás no interior de um cilindro, por meio do movimento axial do pistão, de modo que o gás do lado de baixa pressão, também conhecida como pressão de sucção ou evaporação, entra no interior do cilindro através da válvula de sucção. O gás é então comprimido dentro do cilindro pelo movimento do pistão, e após comprimido, sai do cilindro pela válvula de descarga para o lado de alta pressão, também chamada de pressão de descar-  
25 ga ou condensação.

Especialmente para os compressores lineares ressonantes, o pistão é acionado por um atuador linear o qual é formado por um suporte e imãs que pode ser acionado por uma ou mais bobinas. O compressor linear ainda compreende uma ou mais molas as quais conectam a parte móvel  
30 (pistão, suporte e imãs) à parte fixa, sendo esta formada pelo cilindro, estator, bobina, cabeçote e estrutura. As partes móveis e as molas formam o conjunto ressonante do compressor.

Tal conjunto ressonante, acionado pelo motor linear, tem a função de desenvolver um movimento alternativo linear, fazendo com que o movimento do pistão no interior do cilindro exerça uma ação de compressão do gás admitido pela válvula de sucção, até o ponto em que ele pode ser descarregado por meio da válvula de descarga para o lado de alta pressão.

A amplitude de operação do compressor linear é regulada pelo equilíbrio da potência gerada pelo motor, com a potência consumida pelo mecanismo de compressão, além das perdas geradas neste processo. A fim de alcançar a máxima eficiência termodinâmica e a máxima capacidade de refrigeração é necessário que o deslocamento máximo do pistão se aproxime o máximo possível do final de curso, reduzindo, desta forma, o volume morto de gás no processo de compressão.

Para viabilizar este processo, torna-se necessário que o curso do pistão seja conhecido com grande precisão, de modo a evitar o risco de um impacto do pistão com o final do curso, ou cabeçote do equipamento. Este impacto poderia gerar além de ruído acústico, a perda de eficiência do aparelho ou mesmo a quebra do compressor.

Desta forma, quanto maior o erro na estimação/medição da posição do pistão, maior será o coeficiente de segurança necessário entre o deslocamento máximo e o final do curso, para operar o compressor com segurança, levando à perda de desempenho do produto.

De outro lado, caso seja necessário reduzir a capacidade de refrigeração do compressor devido a uma menor necessidade do sistema de refrigeração, é possível reduzir o curso máximo de operação do pistão, reduzindo a potência fornecida ao compressor, e deste modo, é possível controlar a capacidade de refrigeração do compressor obtendo uma capacidade variável.

Uma característica adicional importante na operação dos compressores lineares ressonantes é a sua frequência de acionamento. Algumas técnicas anteriores mostram que o acionamento do compressor na sua frequência de ressonância leva o equipamento a trabalhar na sua eficiência máxima.

Todavia, tais técnicas normalmente fazem uso de sensores de posição e/ou velocidade para a operação do sistema, o que aumenta consideravelmente os custos finais do produto.

5 A seguir é feita uma breve descrição de soluções do estado da técnica hoje empregadas para conhecer o curso do pistão do compressor. Os documentos abaixo relacionados fazem uso de sensores de posição, tais como o caso brasileiro PI 0001404-4. Este apresenta ainda como desvantagem a dificuldade de isolamento e ruído de contato elétrico.

10 O documento PI 0203724-6 refere-se a uma bomba de fluidos e uma placa de transferência de fluidos, tais elementos sendo particularmente aplicáveis a compressores lineares para detectar a posição do respectivo e evitar que este último venha a colidir com a placa de transferência de fluidos, ou placa de válvulas, por ocasião de variações nas condições de operação do compressor, ou mesmo variações na tensão de alimentação. Tal  
15 técnica emprega um sensor indutivo montado na placa de válvulas, a fim de medir a distância pistão / placa diretamente no topo do pistão. É uma solução de alta precisão, mas necessita de um espaço para a instalação do sensor na placa de válvulas e tem um custo mais elevado, além do fato de precisar de calibração.

20 Outras soluções do estado da técnica, como aquelas descritas nos documentos US 5.897.296, JP 1336661 e US 5.897.269 fazem uso de um sensor de posição, logo tais aplicações apresentam maior complexidade de implementação e/ou manutenção, além de custo mais elevado. Cabe ressaltar ainda que, nestes últimos casos há a necessidade de um número maior de fios e conexões externas ao compressor, o que dificulta sobremaneira  
25 o seu uso em ambientes de grande variação de temperatura e pressão.

Por outro lado, algumas técnicas anteriores que não utilizam sensor de posição, tais como os documentos norte-americanos US 5.342.176, US 5.496.153, US 4.642.547 e US 6.176.683 além dos casos KR  
30 96-79125, KR 96-15062, WO 00079671 e WO 03044365, não apresentam uma boa precisão, ou estabilidade de operação, sendo necessário, muitas vezes, o emprego de outros tipos de sensores, como medidores de tempera-

tura ou acelerômetro para a detecção de impacto, além de um dimensionamento mais oneroso para o compressor diante das exigências de desempenho exigidas para o seu correto funcionamento.

5 Com base no acima exposto, a presente invenção prevê um sistema e um método de controle para pistão de compressor linear ressonante, especialmente projetados para acionar o compressor na sua máxima eficiência, sem fazer uso de sensores voltados para medir grandezas ou variáveis mecânicas.

#### Objetivos da Invenção

10 Um primeiro objetivo da presente invenção é propor um sistema de controle para pistão de compressor linear ressonante, sendo este capaz de acionar o compressor na sua frequência de ressonância, de modo a obter a máxima eficiência do equipamento em sistemas de refrigeração.

15 Um segundo objetivo da presente invenção é propor um método capaz de estimar o deslocamento e a velocidade do pistão de um compressor linear ressonante, a partir de um modelo massa/mola e de um modelo elétrico do motor do compressor, fazendo uso apenas e tão somente de grandezas elétricas medidas do dito motor.

20 Um terceiro objetivo da presente invenção é reduzir o custo do compressor a partir da eliminação de sensores normalmente destinados a medir grandezas ou variáveis mecânicas, tais como sensores de posição, velocidade, temperatura e pressão, e a consequente redução do número de fios e conexões necessárias para o funcionamento do compressor linear ressonante.

25 Um objetivo adicional da presente invenção é acionar o compressor linear ressonante com reduzido coeficiente de segurança entre o deslocamento máximo do pistão e o final de curso, de modo a otimizar o funcionamento do equipamento, além de obter o máximo desempenho do compressor, sem comprometer a confiabilidade e a segurança do produto.

30 Finalmente, é outro objetivo da presente invenção prover uma solução substancialmente mais simplificada, frente às técnicas anteriores, para a sua produção em escala industrial.

### Breve Descrição da Invenção

Uma maneira de alcançar os objetivos da presente invenção é através da provisão de um sistema de controle para pistão de compressor linear ressonante, o compressor linear ressonante sendo parte integrante de um circuito de refrigeração, o compressor linear ressonante compreendendo pelo menos um cilindro, pelo menos um cabeçote, pelo menos um motor elétrico e pelo menos uma mola, o cilindro acomodando operativamente o pistão, o sistema de controle compreendendo pelo menos uma unidade eletrônica de controle, a unidade eletrônica de controle compreendendo pelo menos um circuito eletrônico observador e pelo menos um circuito de controle associados eletricamente entre si, a unidade eletrônica de controle sendo associada eletricamente ao motor elétrico do compressor linear ressonante, o circuito eletrônico observador sendo configurado para medir pelo menos uma grandeza elétrica do motor elétrico do compressor linear ressonante, o circuito eletrônico observador sendo configurado para estimar pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor do compressor linear ressonante e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear ressonante, o circuito eletrônico observador sendo configurado para estimar e prover pelo menos um parâmetro de controle do sistema para o circuito de controle a partir da grandeza elétrica medida e conjunto de parâmetros elétricos e mecânicos estimados, o circuito de controle sendo configurado para acionar o motor elétrico do compressor linear ressonante a partir dos parâmetros de controle estimados, os parâmetros de controle estimados compreendendo pelo menos um deslocamento máximo do pistão do compressor, o circuito de controle acionando o motor do compressor linear ressonante a partir dos parâmetros de controle estimados.

Uma segunda maneira de alcançar os objetivos da presente invenção é através da provisão de um método de controle para pistão de compressor linear ressonante, o compressor linear ressonante compreendendo pelo menos um motor elétrico, o motor elétrico sendo acionado por um inversor de frequência, o método de controle compreendendo as seguintes etapas:

- a) medir a cada ciclo de operação do compressor linear ressonante, com uma frequência de discretização, uma corrente medida do motor elétrico;
- 5 b) calcular um ciclo de operação do compressor linear ressonante, a partir da corrente medida do motor elétrico, e com base no ciclo de operação calculado, calcular uma frequência de ressonância do compressor linear ressonante;
- c) calcular a cada ciclo de operação do compressor linear ressonante, na frequência de discretização, uma corrente calculada do motor, um deslocamento do pistão e uma velocidade do pistão;
- 10 d) calcular a cada ciclo de operação do compressor linear ressonante, na frequência de discretização, um erro de corrente calculado pela diferença entre a corrente medida e a corrente calculada do motor;
- e) calcular, em um ciclo de operação, com base no deslocamento do pistão calculado na etapa c, um deslocamento máximo do pistão do compressor linear ressonante;
- 15 f) calcular, em um ciclo de operação, uma potência de entrada real no motor elétrico a partir da corrente medida e de uma tensão de operação aplicada pelo inversor do motor elétrico;
- 20 g) calcular, em um ciclo de operação, uma potência dissipada em uma resistência elétrica do motor a partir da corrente medida;
- h) calcular uma força de amortecimento total, produzida em um ciclo de operação, a partir de um coeficiente de amortecimento total e da velocidade do pistão calculada na etapa c;
- 25 i) calcular uma potência dissipada pelo amortecimento total a partir da força de amortecimento total calculada na etapa anterior e da velocidade do pistão calculada na etapa c;
- j) calcular uma força contínua equivalente em função da potência de entrada real no motor elétrico calculada na etapa f e em função do ciclo de operação calculado na etapa b
- 30 k) calcular, a partir do deslocamento máximo e velocidade do pistão e na corrente medida, um valor de tensão de operação a ser aplicado

no motor elétrico do compressor linear ; e

l) aplicar no motor elétrico do compressor linear ressonante o valor de tensão de operação calculado na etapa k.

5 Vale mencionar que o método acima ainda compreende uma etapa voltada para calcular um coeficiente de mola total do compressor linear ressonante, a partir da frequência de ressonância calculada na etapa b, e um coeficiente de amortecimento total do compressor linear ressonante, calculado a partir do balanço da potência.

10 De outro modo, os objetivos da presente invenção são alcançados através da provisão de um método de controle para pistão de compressor linear ressonante, o compressor linear ressonante compreendendo pelo menos um motor elétrico, o motor elétrico sendo acionado eletricamente por um inversor de frequência, o método de controle compreendendo as seguintes etapas:

15 i) medir, a partir de um circuito eletrônico microprocessado, e em um ciclo de operação do compressor linear ressonante, uma corrente medida do motor elétrico;

20 ii) calcular com base na corrente medida e em uma tensão de operação aplicada ao inversor do motor elétrico, pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear;

iii) calcular, com base nos valores medidos e calculados nas etapas i e ii, um deslocamento máximo e uma velocidade do pistão do compressor linear ressonante;

25 iv) ajustar, a partir do deslocamento máximo e velocidade do pistão obtidos na etapa iii, um novo valor para a tensão de operação a ser aplicada no inversor do motor elétrico do compressor linear; e

v) aplicar no inversor do motor elétrico do compressor linear ressonante a tensão de operação ajustada na etapa iv.

30 Finalmente, os objetivos da presente invenção são alcançados através da provisão de um compressor linear ressonante que compreende um método de controle para pistão tal como definido no objeto ora reivindi-

cado.

### Breve Descrição dos Desenhos

A presente invenção será descrita a seguir em maiores detalhes, com referência aos desenhos anexos, nos quais:

- 5                    figura 1 – representa uma vista esquemática de um compressor linear ressonante;
- figura 2 – ilustra uma vista esquemática do modelo mecânico do compressor linear ressonante empregado na presente invenção;
- figura 3 – ilustra uma vista esquemática do modelo elétrico do  
10 compressor linear ressonante, objeto da presente invenção;
- figura 4 – ilustra um diagrama de blocos do modelo do compressor linear ressonante;
- figura 5 – mostra um diagrama de blocos do modelo do observador de estados para o compressor linear ressonante, objeto da presente  
15 invenção;
- figura 6 – mostra um diagrama de blocos simplificado do controle, conforme os ensinamentos da presente invenção;
- figura 7 – mostra um diagrama de blocos do controle e inversor, objeto da presente invenção;
- 20                    figura 8 – ilustra um diagrama de blocos do sistema de controle de pistão, empregando valores de corrente e velocidade, conforme uma concretização preferida da presente invenção;
- figura 9 – ilustra um diagrama de blocos do sistema de controle de pistão, empregando valores de tensão e frequência, em uma segunda  
25 concretização do objeto da presente invenção;
- figura 10 – representa um fluxograma do método de controle, conforme as etapas e etapas previstos no objeto da presente invenção;
- figura 11 – mostra um gráfico destacando, entre outras grandezas, o perfil da corrente medida no motor do compressor linear, objeto da  
30 presente invenção;
- figura 12 – mostra um gráfico da força de pressão do gás;
- figura 13 – mostra um gráfico das forças de mola equivalente,

de amortecimento equivalente e contínua equivalente (Offset); e

figura 14 – mostra um gráfico da força resultante (soma das 3 forças equivalentes), conforme o objeto da presente invenção.

#### Descrição Detalhada das figuras

5 A figura 1 mostra uma vista esquemática de um compressor linear ressonante 100, aplicado na presente invenção. Em tal equipamento, o pistão é acionado por um atuador linear, o qual é formado por um suporte 4 e ímãs 5 acionados por uma ou mais bobinas 6. A mesma figura mostra  
10 ainda que uma ou mais molas 7a e 7b conectam a parte móvel (pistão 1, suporte 4 e ímãs 5) a parte fixa formada pelo cilindro 2, estator 12, bobinas 6, cabeçote 3 e estrutura 13. As partes móveis e molas formam o conjunto ressonante do presente compressor 100.

Deste modo, o conjunto ressonante acionado pelo motor linear tem a função de desenvolver um movimento alternativo linear, fazendo com  
15 que o movimento do pistão no interior do cilindro exerça uma força de compressão do gás admitido pela válvula de sucção 3a, até o ponto em que ele pode ser descarregado através da válvula de descarga 3b, para o lado de alta pressão.

A amplitude de operação do compressor linear 100 é regulada  
20 pelo equilíbrio da potência gerada pelo motor e a potência consumida pelo mecanismo na compressão, além das perdas geradas neste processo. Para atingir a máxima eficiência termodinâmica e a sua máxima capacidade de refrigeração, é necessário que o deslocamento do pistão se aproxime o máximo possível do seu final do curso, reduzindo, assim, o volume morto de  
25 gás no processo de compressão.

Para viabilizar este processo é necessário que o curso do pistão seja conhecido com grande precisão, a fim de evitar o risco de um impacto do pistão com o final do curso (cabeçote), uma vez que este impacto pode gerar desde ruído acústico, e perda de eficiência, até a quebra do  
30 compressor. Desta forma quanto maior o erro na estimação/medição da posição do pistão, maior será o coeficiente de segurança necessário entre o deslocamento máximo e o final do curso, para operar o compressor com se-

gurança, levando à perda de desempenho no equipamento final.

Frente ao acima exposto, a presente invenção provê um sistema e método de controle para pistão de compressor linear capaz de estimar com precisão a velocidade e o deslocamento do referido pistão, a partir de uma série de parâmetros de funcionamento do dito compressor, de maneira mais simplificada e eficiente. Tal compressor é parte integrante de um circuito de refrigeração, e como já mencionado, este compreende pelo menos um cilindro 2, pelo menos um cabeçote 3, pelo menos um motor elétrico, além de pelo menos uma mola 7a/7b, de modo que o cilindro 2 acomoda operativamente o pistão 1.

Conforme os ensinamentos da presente invenção, o sistema de controle ora proposto compreende pelo menos uma unidade eletrônica de controle 15, sendo a dita unidade formada por pelo menos um circuito eletrônico observador 20 e pelo menos um circuito de controle 30 associados eletricamente entre si. A unidade eletrônica de controle 15 está associada eletricamente ao motor elétrico do compressor linear ressonante 100.

A figura 6 mostra um diagrama de blocos simplificado para o sistema de controle objeto da presente invenção.

De maneira geral, o dito circuito eletrônico observador 20 é configurado para medir pelo menos uma grandeza elétrica do motor elétrico do compressor linear ressonante 100, sendo tal circuito observador 20 configurado para estimar pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor do compressor linear ressonante 100 e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear ressonante 100.

O circuito eletrônico observador 20 é configurado e implementado, preferencialmente, a partir de um circuito eletrônico microprocessado, ou outro equivalente.

As figuras 6 a 10 ilustram diagramas de blocos nos quais os parâmetros elétricos e mecânicos são estimados. Em outras palavras, tem-se que o circuito eletrônico observador 20 é configurado para estimar e prover pelo menos um parâmetro de controle  $P_c$  do sistema para o circuito de controle 30 a partir da grandeza elétrica medida e conjunto de parâmetros

elétricos e mecânicos estimados.

O circuito de controle 30, por sua vez, é configurado para acionar o motor elétrico do compressor linear ressonante 100 a partir dos parâmetros de controle  $P_c$  estimados. Tais parâmetros de controle  $P_c$  estimados  
5 compreendem pelo menos um deslocamento máximo  $D_{MAX}$  do pistão 1 do compressor 100.

De modo preferencial, os parâmetros de controle  $P_c$  compreendem ainda uma velocidade do pistão  $v_e(t)$  do compressor 100, de modo que o circuito de controle 30 aciona o motor do compressor linear ressonante  
10 100 a partir dos valores da velocidade do pistão  $v_e(t)$  e deslocamento máximo  $D_{MAX}$  estimados.

De modo preferível ainda, tem-se que a grandeza elétrica medida é composta por um valor de corrente de operação  $i_m$ , ou simplesmente corrente medida  $i_m$ , do motor do compressor linear ressonante 100.

Uma característica bastante inovadora do presente sistema de controle refere-se à modelagem matemática proposta, formada a partir de um modelo elétrico e mecânico do compressor linear 100.  
15

A figura 2 ilustra um modelo mecânico do compressor linear 100, enquanto a figura 3 mostra um modelo elétrico para o mesmo equipamento.  
20

De modo mais detalhado, tem-se que o conjunto de parâmetros elétricos é calculado a partir de um modelo matemático elétrico do compressor linear ressonante 100, sendo tal modelo definido com base em um circuito elétrico RL em série com uma fonte de tensão, equacionado através da  
25 equação abaixo:

$$V_{ENT}(t) = V_R(i_e(t)) + V_L(i_e(t)) + V_{MT}(v_e(t)) \quad (1)$$

em que:

$$V_R(i_e(t)) = R \cdot i_e(t) \quad ; \text{ Tensão da Resistência [V];}$$

$$V_L(i_e(t)) = L \cdot \frac{di_e(t)}{dt} \quad ; \text{ Tensão do Indutor [V];}$$

$$V_{MT}(v_e(t)) = K_{MT} \cdot v_e(t) \quad ; \text{ Tensão Induzida no Motor ou FCEM [V];}$$

$$30 \quad V_{ENT}(t) \quad ; \text{ Tensão de Alimentação [V];}$$

$$R \quad ; \text{ Resistência Elétrica do Motor do Compressor}$$

L	; Indutância do Motor do Compressor (100)
$K_{MT}$	; Constante de Força e Tensão do Motor
$\bar{v}_e(t)$	; Velocidade do Pistão Calculada
$i_e(t)$	; Corrente Estimada ou Calculada do Motor

5 No que tange à modelagem mecânica do compressor, tem-se que o conjunto de parâmetros mecânicos é calculado a partir de um modelo matemático mecânico do compressor linear ressonante 100, de modo que o referido modelo é definido com base em um sistema mecânico massa/mola equacionado através da equação:

$$m \cdot \frac{d^2 d_e(t)}{dt^2} = F_{MT}(i_e(t)) - F_{ML}(d_e(t)) - F_{AM}(v_e(t)) - F_G(d_e(t)) \quad (2)$$

10 em que:

$F_{MT}(i_e(t)) = K_{MT} \cdot i_e(t)$	; Força do Motor [N];
$F_{ML}(d_e(t)) = K_{ML} \cdot d_e(t)$	; Força da Mola [N];
$F_{AM}(v_e(t)) = K_{AM} \cdot v_e(t)$	; Força de Amortecimento [N];
$F_G(d_e(t))$	; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];

15 $K_{MT}$	; Constante de Motor
$K_{ML}$	; Constante de Mola
$K_{AM}$	; Primeira Constante de Amortecimento
m	; Massa da Parte Móvel
$d_e(t)$	; Deslocamento do pistão do compressor calculado
20	

De uma maneira mais abrangente, e conforme os ensinamentos da presente invenção, é possível afirmar que o conjunto de parâmetros elétricos e conjunto de parâmetros mecânicos, quando combinados, definem um conjunto de parâmetros eletromecânicos, sendo estes equacionados na

25 forma matricial (3) como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) \\ y(t) &= C.x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

em que:

$x(t) = (v_e(t) \quad d_e(t) \quad i_e(t))^T$	; Vetor de Estados
$y(t) = i_e(t)$ ,	; Saída do Sistema

- $u(t) = V_{ENT}(t)$ , ; Tensão de Alimentação [V]  
 $g(t) = F_G(d(t))$  ; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];  
 $A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM}}{m} & -\frac{K_{ML}}{m} & \frac{K_{MT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{MT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}$  ; Matriz dinâmica do Sistema  
 $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}^T$ , ; Vetor de Entrada de Alimentação  
5  $F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$ , ; Vetor de Entrada de Pressão  
 $C = (0 \ 0 \ 1)$  ; Vetor de Saída  
 $K_{MT}$  ; Constante de Motor  
 $K_{ML}$  ; Constante de Mola  
 $K_{AM}$  ; Primeira Constante de Amortecimento  
10  $R$  ; Resistência Elétrica do Motor do Compressor  
 $L$  ; Indutância do Motor do Compressor (100)  
 $m$  ; Massa da Parte Móvel  
 $d_e(t)$  ; Deslocamento do pistão do compressor calculado  
15  $v_e(t)$  ; Velocidade do Pistão Calculada  
 $i_e(t)$  ; Corrente do Motor

Com base no equacionamento matricial proposto na presente invenção, e tal como mostrado em um diagrama de blocos a partir da figura 4, tem-se que a única saída do sistema é a corrente elétrica do motor do compressor 100, uma vez que a modelagem desenvolvida leva em conta apenas a medição de grandezas elétricas.

Cabe ressaltar que, a força de pressão do gás  $F_G(d(t))$ , mencionada no equacionamento matricial acima, é variável com as pressões de sucção e descarga, bem como com o deslocamento do pistão 1, conforme ilustrado na figura 12, entre outras grandezas lineares e não lineares do sistema, fato este que justifica a sua aplicação na modelagem proposta no presente objeto, caso contrário erros significativos poderiam produzir efeitos indesejados no controle do compressor linear 100.

Deste modo, a presente invenção compensa os efeitos causados no sistema pela força de pressão do gás, uma vez que esta provoca pelo menos três efeitos principais no aludido equipamento, os quais são:

1. variação na frequência de ressonância;
- 5 2. consumo de energia que é transferido para o gás; e
3. deslocamento do ponto médio de oscilação do pistão 1 (“offset” no deslocamento).

A fim de resolver os efeitos acima, a presente solução substitui a força de pressão do gás  $F_G(d(t))$  por outras 3 forças lineares que compensam os efeitos desta força de pressão, os quais são: uma força de mola equivalente, uma força de amortecimento equivalente e uma força contínua equivalente, tais como ilustradas nas figuras 13 e 14.

A equação abaixo mostra o cálculo da força de pressão do gás e as suas respectivas forças atuantes:

$$F_G(t) = K_{AMEq} \cdot v d + K_{MLEq} \cdot d + F_{Cont} \quad (4)$$

15 A força de mola equivalente é ajustada para compensar os efeitos da variação na frequência de ressonância, enquanto a força de amortecimento equivalente é ajustada para compensar o consumo de potência. De outro lado, a força contínua equivalente é ajustada para compensar o deslocamento do ponto médio de oscilação do pistão.

20 Deve-se destacar que somar uma força mola equivalente é o mesmo que somar uma segunda constante de mola  $K_{MLEq}$  na equação mecânica devido à natureza linear das referidas forças. O mesmo princípio é válido para a segunda constante de amortecimento  $K_{AMEq}$  na equação mecânica. A força de pressão do gás é substituída, conforme a presente invenção, por uma força contínua  $F_{Cont}$ .

25 Desta forma, o sistema ora proposto pode ser representado pelas equações abaixo, de modo que, neste modelo, a matriz  $A$  é variável, em função de  $K_{MLEq}$  e  $K_{AMEq}$ , e a entrada  $g(t)$  é contínua.

$$\begin{pmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{d}(t) \\ \dot{i}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM} + K_{AMEq}}{m} & -\frac{K_{ML} + K_{MLEq}}{m} & \frac{K_{FMT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{VMT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(t) \\ d(t) \\ i(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} \cdot V_{ENT}(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot F_{Cont} \quad (5)$$

Ou:

$$\dot{x}(t) = A(K_{MLEq}, K_{AMEq}) \cdot x(t) + B \cdot u(t) + F \cdot g(t)$$

$$y(t) = C \cdot x(t)$$

Em que:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v(t) \\ d(t) \\ i(t) \end{pmatrix}, \quad y(t) = i(t), \quad u(t) = V_{ENT}(t), \quad g(t) = F_{Cont}$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM} + K_{AMEq}}{m} & -\frac{K_{ML} + K_{MLEq}}{m} & \frac{K_{FMT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{VMT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$C = (0 \quad 0 \quad 1)$$

Vale destacar que nesta última representação não importa o valor isolado de  $K_{ML}$  e  $K_{MLEq}$ , ou qual a parcela de cada constante, mais sim o valor total  $K_{ML} + K_{MLEq}$ , o que significa dizer que é possível substituir esta soma por um único coeficiente, chamado de coeficiente de mola total  $K_{MLT}$ .

$$K_{MLT} = K_{ML} + K_{MLEq} \quad (6)$$

Tal coeficiente de mola total  $K_{MLT}$  é ajustado a cada ciclo do motor linear, conforme uma frequência de ressonância  $F_R$  do sistema, como mostra a equação 7 abaixo. A frequência de ressonância é ajustada a cada ciclo pela leitura do período da corrente real ou medida  $i_m$  do motor. A figura 11 ilustra o perfil de corrente medida  $i_m$  do motor característico neste tipo de aplicação e o período da frequência de ressonância.

$$F_R = \frac{1}{T_R}$$

$$K_{MLT} = m \cdot 4 \cdot (\pi \cdot F_R)^2 \quad (7)$$

Em que:

15  $F_R$  – frequência de ressonância

$T_R$  – período da frequência de ressonância

De modo análogo, é importante conhecer o valor total da constante de amortecimento ( $K_{AM} + K_{AMEq}$ ), logo é possível substituí-la por um único coeficiente, denominado aqui de coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$ , o qual é ajustado a cada ciclo do motor linear.

$$K_{AMT} = K_{AM} + K_{AMEq} \quad (8)$$

5 Um aspecto importante da presente invenção refere-se ao ajuste de balanço de potência do sistema. Tal ajuste é desenvolvido caso a potência medida na entrada do sistema seja maior que a potência consumida pela força de amortecimento total do observador 20, mais a perda na chamada resistência do observador 20, logo, neste caso, torna-se necessário incrementar o coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$ , caso contrário devemos decrementar o coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ).

O equacionamento abaixo mostra o cálculo das principais grandezas associadas às potências no sistema de controle, objeto da presente invenção:

$$15 \quad a = \frac{T_R}{\Delta t} \quad (9)$$

$$P_e = \frac{1}{T_R} \sum_{n=0}^a u_C[n].i_M[n].\Delta t \quad (10)$$

$$P_R = \frac{1}{T_R} \sum_{n=0}^a R.i[n]^2.\Delta t \quad (11)$$

$$F_{AMT}[k] = K_{AMT}.v[k] \quad (12)$$

$$P_{AM} = \frac{1}{T_R} \sum_{n=0}^a F_{AMT}[n].v[n].\Delta t \quad (13)$$

20 Em que:

$a$  – número de amostras em um período da frequência de ressonância;

$P_e$  – potência medida na entrada do motor;

$P_R$  – potência na resistência calculada pelo estimador;

$F_{AM}$  – força produzida pelo amortecimento total calculado pelo estimador;

25  $P_{AM}$  – potência dissipada pelo amortecimento total calculado pelo estimador;

$T_R$  – período da frequência de ressonância ou período de um ciclo de acionamento;

$\Delta t$  – período de amostragem ou período entre duas amostras consecutivas.

A figura 7 mostra em maiores detalhes os principais blocos fun-

cionais do sistema de controle para pistão 1, conforme os ensinamentos da presente invenção.

A figura 8 ilustra um diagrama de blocos para uma concretização preferencial do sistema de controle ora reivindicado.

5 Tal sistema, fundamentado no conjunto de parâmetros eletromecânicos acima descritos, é realimentado por um erro de corrente do observador  $i_{eo}$  multiplicado por um vetor de ganhos  $K$ , sendo o erro de corrente  $i_{eo}$  calculado pela diferença entre a corrente medida  $i_m$  e a corrente calculada do motor  $i_e(t)$ ,

10 Matematicamente, o modelo eletromecânico do observador de estados do compressor linear ressonante 100 é equacionado na forma matricial por:

$$\begin{aligned} i_{eo}(t) &= i_m(t) - i_e(t) \\ \dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) + K.i_{eo}(t) \quad (14) \\ y(t) &= C.x(t) \end{aligned}$$

Mais uma vez, deve-se destacar que o motor elétrico do compressor linear ressonante 100 é acionado, através da unidade de controle  
15 15, em uma frequência de ressonância  $F_R$  calculada a cada ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear 100. O referido ciclo de operação  $T_R$  é medido através da corrente medida  $i_m$  e calculado para ter o mesmo período da corrente medida  $i_m$ . A figura 11, conforme já mencionado para o sistema da presente invenção, ilustra o perfil da dita corrente medida  $i_m$ , sendo possível  
20 obter o seu período de operação a partir da observação dos instantes nos quais a corrente  $i_m$  passa por zero.

É importante salientar que a operação do compressor 100 na frequência de ressonância  $F_R$  permite alcançar o máximo desempenho para todo o sistema, sem comprometer a confiabilidade e segurança do equipa-  
25 mento final.

De modo bastante preferível, tem-se que a corrente calculada do motor  $i_e(t)$ , o deslocamento do pistão  $d_e(t)$  e a velocidade do pistão  $v_e(t)$  do compressor linear 100 são calculados em uma frequência de discretização  $F_d$  substancialmente superior à frequência de ressonância  $F_R$ , sendo tal  
30 frequência de discretização  $F_d$  operável em torno de 10 vezes ou mais a fre-

quência de ressonância  $F_R$ .

O deslocamento máximo  $D_{MAX}$  é calculado a partir do deslocamento do pistão  $d_e(t)$  durante um ciclo de operação  $T_R$ . Analogamente, tem-se que o conjunto de parâmetros mecânicos é calculado a cada ciclo de operação  $T_R$ .

A partir da figura 8 é possível constatar ainda que o acionamento do compressor linear ressonante 100 é provido com base em uma tensão de operação  $u_c$ , sendo esta tensão  $u_c$  calculada com base nos valores de deslocamento máximo  $D_{MAX}$  e velocidade de deslocamento  $v_e(t)$  do pistão 1 calculados. Tais valores são comparados com valores de referência, através de controladores de estado, como controladores PI (proporcional e integral) ou PID (proporcional, integral e derivativo).

Como já comentado anteriormente, a presente invenção provê um método inovador para controle de pistão de compressor linear ressonante 100. Tal método prevê um compressor dotado de um motor elétrico, sendo este acionado por um inversor de frequência.

O referido método compreende, essencialmente, as seguintes etapas:

a) medir a cada ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, com uma frequência de discretização  $F_d$ , uma corrente medida  $i_m$  do motor elétrico;

b) calcular um ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, a partir de uma corrente medida  $i_m$  do motor elétrico, e com base no ciclo de operação  $T_R$  calculado, calcular uma frequência de ressonância  $F_R$  do compressor linear ressonante 100;

c) calcular a cada ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, na frequência de discretização  $F_d$ , uma corrente calculada do motor  $i_e(t)$ , um deslocamento do pistão  $d_e(t)$  e uma velocidade do pistão  $v_e(t)$ ;

d) calcular a cada ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, na frequência de discretização  $F_d$ , um erro de corrente  $i_{eo}$  calculado pela diferença entre a corrente medida  $i_m$  e a corrente calculada do

motor  $i_e(t)$ ;

e) calcular, com base no deslocamento do pistão  $d_e(t)$  calculado na etapa c, um deslocamento máximo  $D_{MAX}$  do pistão 1 do compressor linear ressonante 100;

5 f) calcular, em um ciclo de operação  $T_R$ , uma potência de entrada real  $P_e$  no motor elétrico a partir da corrente medida  $i_m$  e de uma tensão de operação  $u_c$  aplicada pelo inversor do motor elétrico;

g) calcular, em um ciclo de operação  $T_R$ , uma potência dissipada  $P_R$  em uma resistência elétrica do motor R a partir da corrente medida  $i_m$ ;

10 h) calcular uma força de amortecimento  $F_{AMT}$  total, produzida em um ciclo de operação  $T_R$ , a partir de um coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$  e da velocidade do pistão  $v_e(t)$  calculada na etapa c;

i) calcular uma potência dissipada pelo amortecimento total  $P_{AMT}$  a partir da força de amortecimento total  $F_{AMT}$  calculada na etapa anterior e da velocidade do pistão  $v_e(t)$  calculada na etapa c;

j) calcular uma força contínua equivalente  $F_{Cont}$  em função da potência de entrada real  $P_e$  no motor elétrico calculada na etapa f e em função do ciclo de operação  $T_R$  calculado na etapa b;

20 k) calcular, a partir do deslocamento máximo  $D_{MAX}$  e velocidade do pistão  $v_e(t)$ , e na corrente medida  $i_m$ , um valor de tensão de operação  $u_c$  a ser aplicado no motor elétrico do compressor linear 100; e

l) aplicar no motor elétrico do compressor linear ressonante 100 o valor de tensão de operação  $u_c$  calculado na etapa k.

25 O presente método ainda conta com uma etapa voltada para calcular o coeficiente de mola total  $K_{MLT}$  do compressor linear ressonante 100, a partir da frequência de ressonância  $F_R$  calculada na etapa b.

30 Adicionalmente, o método ora proposto prevê uma etapa para calcular o coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$  do compressor linear ressonante 100, a partir das potências de entrada real  $P_e$ , dissipada  $P_R$  e dissipada pelo amortecimento total  $P_{AMT}$ .

No que diz respeito à correção do dito coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$ , tem-se que este é ajustado uma vez por ciclo, a partir das

seguintes etapas:

m) se a potência de entrada real  $P_e$  calculada for maior do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total  $P_{AMT}$  com a potência dissipada  $P_R$ , então incrementar o valor do coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$  para um próximo ciclo de operação  $T_R$ ; e

n) se a potência de entrada real  $P_e$  calculada for menor do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total  $P_{AMT}$  com a potência dissipada  $P_R$ , então decrementar o valor do coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$  para um próximo ciclo de operação  $T_R$ ;

De outro modo, o coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$  é calculado com base no equacionamento abaixo:

$$P_{AMT} = P_e - P_R$$

$$K_{AMT} = \frac{2 \cdot P_{AMT}}{(2 \cdot \pi \cdot F_R \cdot D_{MAX})^2} \quad (15)$$

O coeficiente de mola total  $K_{MLT}$  é calculado através da equação:

$$K_{MLT} = m \cdot 4 \cdot (\pi \cdot F_R)^2 \quad (16)$$

Em que:

$F_R$  = frequência de ressonância

A partir dos coeficientes de mola total  $K_{MLT}$  e de amortecimento total  $K_{AMT}$  é calculado e ajustado o modelo do observador, de modo a compensar a variação das pressões de sucção e descarga (obtendo um sistema adaptativo), para o modelo contínuo este ajuste somente afeta a matriz dinâmica  $A$  e o projeto do vetor de ganho  $K$ . Na prática para sistemas discretos (ou discretizados), com o processo de discretização e a variação dos coeficientes de mola total  $K_{MLT}$  e de amortecimento total  $K_{AMT}$ , leva também a uma variação nas matrizes  $B$  e  $F$ .

Deste modo, a partir dos coeficientes de mola total  $K_{MLT}$  e de amortecimento total  $K_{AMT}$  é calculado um conjunto de matrizes  $A$ ,  $B$  e  $F$ , a fim de se projetar um vetor de ganho  $K$ . Em outras palavras, tem-se que uma primeira matriz de coeficiente  $A$ , uma segunda matriz de coeficiente  $B$ , uma terceira matriz de coeficiente  $F$  e um vetor de ganhos  $K$ , em um ciclo de ope-

ração  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, são calculados a partir do coeficiente de mola total  $K_{MLT}$  e coeficiente de amortecimento total  $K_{AMT}$ . Neste caso, o presente sistema gera um modelo de coeficientes variáveis, também chamado de sistema adaptativo, que é ajustado a cada ciclo de o-  
 5 peração do compressor 100.

O método reivindicado na presente invenção leva em conta uma modelagem matemática do compressor linear 100, tal como já observa-  
 do para o sistema de controle ora proposto.

Em um primeiro momento, o método prevê o uso de um mode-  
 10 lo matemático elétrico do compressor 100 definido com base em um circuito elétrico RL em série com uma fonte de tensão, equacionado através da e-  
 quação 1 já detalhada anteriormente para o sistema de controle para pistão 1. Para melhor entendimento, a equação 1 é reproduzida abaixo.

$$V_{ENT}(t) = V_R(i_e(t)) + V_L(i_e(t)) + V_{MT}(v_e(t)) \quad (1)$$

Os parâmetros e valores referentes à equação acima são os  
 15 mesmos detalhados anteriormente para o sistema de controle, objeto da presente invenção.

De modo análogo, o método de controle para pistão, conforme os ensinamentos da presente invenção, leva em conta uma modelagem ma-  
 temática mecânica do compressor linear 100, sendo esta definida com base  
 20 em um sistema mecânico massa/mola equacionado através da equação 2 abaixo, já representada anteriormente:

$$m \cdot \frac{d^2 d(t)}{dt^2} = F_{MT}(i_e(t)) - F_{ML}(d_e(t)) - F_{AM}(v(t)) - F_G(d_e(t)) \quad (2)$$

Os parâmetros mecânicos do equacionamento acima são a-  
 queles já definidos para o sistema de controle para pistão 1, objeto da pre-  
 sente invenção. Como já mencionado, a força de pressão do gás no cilindro  
 25  $F_G(d(t))$  é calculada pela equação 4, reproduzida abaixo para melhor enten-  
 dimento:

$$F_G(t) = K_{AMEq} \cdot Vd + K_{MLEq} \cdot d + F_{Cont} \quad (4)$$

De outra forma, o método de controle proposto compreende um modelo matemático eletromecânico do compressor linear 100 equacionado na forma matricial similar, tal como proposto para o presente sistema de con-

trole, a partir do equação 3 abaixo, já definida anteriormente:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) \\ y(t) &= C.x(t)\end{aligned}\quad (3)$$

Portanto, os parâmetros da equação acima são aqueles já definidos para a modelagem do sistema de controle, objeto da presente invenção.

5 No método previsto, o modelo matemático eletromecânico do compressor linear 100, tal como para o sistema desenvolvido, é realimentado por um erro de corrente do observador  $i_{eo}$  multiplicado por um vetor de ganhos  $K$ , sendo o erro de corrente do observador  $i_{eo}$  calculado pela diferença entre a corrente medida  $i_m$  e a corrente calculada do motor  $i_e(t)$ , o modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante 100 sendo equacionado pela equação 14 reproduzida abaixo, já definida anteriormente para o sistema de controle:

$$\begin{aligned}i_{eo}(t) &= i_m(t) - i_e(t) \\ \dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) + K.i_{eo}(t) \\ y(t) &= C.x(t)\end{aligned}\quad (14)$$

A figura 8 mostra, conforme já comentado, uma concretização preferencial para o sistema e método de controle propostos. Para tal configuração, as seguintes etapas adicionais são previstas:

o) ajustar uma primeira corrente elétrica de referência  $I1_{ref}$  a partir da comparação entre o deslocamento máximo  $D_{MAX}$  do pistão calculado na etapa "e" e um deslocamento de referência  $D_{REF}$  programado;

20 p) ajustar uma segunda corrente elétrica de referência  $i2_{ref}$  multiplicando a primeira corrente elétrica de referência  $I1_{ref}$  ajustada pela velocidade do pistão  $v_e(t)$  calculada na etapa c;

q) ajustar um erro de corrente de controle ( $i_{ce}$ ) pela diferença entre a segunda corrente elétrica de referência ( $I2_{ref}$ ) e a corrente medida ( $i_m$ );

25 r) ajustar a tensão de operação ( $u_c$ ) aplicada ao inversor de frequência do motor elétrico a partir do erro de corrente de controle ( $i_{ce}$ ) calculado na etapa anterior.

Como ilustra a figura 8, a primeira corrente elétrica de referên-

cia  $I_{1ref}$  é gerada em uma saída de um primeiro controlador de estados proporcional e integral  $P_{I1}$ . Este controlador pode ainda ser formado por um controle proporcional integral derivativo.

5 A mesma figura 8 mostra que a tensão de operação  $u_c$  aplicada ao inversor do motor elétrico é gerada em uma saída de um segundo controlador de estados proporcional e integral  $P_{I2}$ , ou proporcional integral derivativo.

De modo mais abrangente, o presente método de controle para pistão de compressor linear é configurado a partir das seguintes etapas:

10 i) medir, a partir de um circuito eletrônico microprocessado, e em um ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante (100), com uma frequência de discretização  $F_d$ , uma corrente medida  $i_m$  do motor elétrico;

15 ii) calcular com base na corrente medida  $i_m$  e em uma tensão de operação  $u_c$  aplicada ao inversor do motor elétrico, pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear 100;

20 iii) calcular, com base nos valores medidos e calculados nas etapas i e ii, um deslocamento máximo  $D_{MAX}$  e uma velocidade do pistão  $v_e(t)$  do compressor linear ressonante 100;

iv) ajustar, a partir do deslocamento máximo  $D_{MAX}$  e velocidade do pistão  $v_e(t)$  obtidos na etapa iii, um novo valor para a tensão de operação  $u_c$  a ser aplicada no inversor do motor elétrico do compressor linear 100; e

25 v) aplicar no inversor do motor elétrico do compressor linear ressonante 100 a tensão de operação  $u_c$  ajustada na etapa iv.

Mais uma vez, vale frisar que o valor de tensão de operação  $u_c$  é calculado em um ciclo de operação  $T_R$  do compressor linear ressonante 100, de modo que o ciclo de operação  $T_R$  define a operação do compressor linear 100 na frequência de ressonância  $F_R$ .

30 O método acima descrito também leva em conta que o conjunto de parâmetros elétricos é calculado a partir de um modelo matemático elétrico do compressor linear ressonante 100. De maneira similar ao anteri-

ormente descrito, o conjunto de parâmetros mecânicos é calculado a partir de um modelo matemático mecânico do compressor linear ressonante 100, ou ainda a partir de um modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante 100 definido com base nos conjuntos de parâmetros elétricos e mecânicos.

As equações 1 e 2 definidas na presente invenção são aplicadas também para a metodologia mais abrangente acima, ou seja, para o motor elétrico do compressor 100 modelado como um circuito elétrico RL série, e para o mesmo compressor 100 modelado como um sistema mecânico massa/mola.

O equacionamento matricial, definido pela equação 3, também é aplicado neste último método de controle, a partir da concepção de um sistema eletromecânico.

Logo, o sistema e método de controle para pistão 1 de compressor linear ressonante 100, conforme o descrito pela presente invenção, alcançam os seus objetivos na medida em que um conjunto de parâmetros estimados permite a operação do compressor 100 na sua máxima eficiência, sem fazer uso de sensores configurados para medir grandezas ou variáveis mecânicas.

De um lado, a concretização preferencial descrita na figura 8 confere ao sistema ora proposto um controle simples e eficiente para o compressor 100, empregando o deslocamento e velocidade do pistão 1 estimados pelo circuito eletrônico observador 20, enquanto a concretização alternativa, ilustrada na figura 9, permite um controle capaz de substituir o sinal da velocidade por um sinal senoidal em fase com a dita velocidade.

Ambas as soluções são capazes de otimizar a eficiência do compressor sem fazer uso de dispositivos de medição auxiliares, levando em conta ainda a estimação do deslocamento máximo  $D_{MAX}$  do pistão 1, o que contribui de maneira importante para a redução de tempo de engenharia em instalação, simplificando o processo produtivo pela redução de componentes e redução no número de conexões necessárias, e especialmente quando da manutenção do equipamento final. Tais soluções operam o pre-

sente sistema de maneira segura, permitindo assim que o pistão 1 trabalhe no seu curso máximo sem colidir com o cabeçote do compressor 100.

Finalmente, a presente invenção provê um compressor linear ressonante 100 que compreende um método de controle para pistão conforme definido no objeto ora reivindicado.

Tendo sido descrito um exemplo de concretização preferido, deve ser entendido que o escopo da presente invenção abrange outras possíveis variações, sendo limitado tão somente pelo teor das reivindicações apenas, aí incluídos os possíveis equivalentes.

## REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), o compressor linear ressonante (100) sendo parte integrante de um circuito de refrigeração, o compressor linear ressonante (100) compreendendo pelo menos um cilindro (2), pelo menos um cabeçote (3), pelo menos um motor elétrico e pelo menos uma mola, o cilindro (2) acomodando operativamente o pistão (1),

o sistema de controle sendo caracterizado pelo fato de que compreende pelo menos uma unidade eletrônica de controle (15), a unidade eletrônica de controle (15) compreendendo pelo menos um circuito eletrônico observador (20) e pelo menos um circuito de controle (30) associados eletricamente entre si,

a unidade eletrônica de controle (15) sendo associada eletricamente ao motor elétrico do compressor linear ressonante (100),

o circuito eletrônico observador (20) sendo configurado para medir pelo menos uma grandeza elétrica do motor elétrico do compressor linear ressonante (100),

o circuito eletrônico observador (20) sendo configurado para estimar pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor do compressor linear ressonante (100) e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear ressonante (100),

o circuito eletrônico observador (20) sendo configurado para estimar e prover pelo menos um parâmetro de controle ( $P_c$ ) do sistema para o circuito de controle (30) a partir da grandeza elétrica medida e conjunto de parâmetros elétricos e mecânicos estimados,

o circuito de controle (30) sendo configurado para acionar o motor elétrico do compressor linear ressonante (100) a partir dos parâmetros de controle ( $P_c$ ) estimados, os parâmetros de controle ( $P_c$ ) estimados compreendendo pelo menos um deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) do pistão (1) do compressor (100).

2. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de



$$m \cdot \frac{d^2 d_e(t)}{dt^2} = F_{MT}(i_e(t)) - F_{ML}(d_e(t)) - F_{AM}(v_e(t)) - F_G(d_e(t))$$

em que:

- $F_{MT}(i_e(t)) = K_{MT} \cdot i_e(t)$  ; Força do Motor [N];  
 $F_{ML}(d_e(t)) = K_{ML} \cdot d_e(t)$  ; Força da Mola [N];  
 $F_{AM}(v_e(t)) = K_{AM} \cdot v_e(t)$  ; Força de Amortecimento [N];  
 5  $F_G(d_e(t))$  ; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];  
 $K_{MT}$  ; Constante de Motor  
 $K_{ML}$  ; Constante de Mola  
 $K_{AM}$  ; Primeira Constante de Amortecimento  
 $m$  ; Massa da Parte Móvel  
 10  $v_e(t)$  ; Velocidade do Pistão  
 $d_e(t)$  ; Deslocamento do Pistão  
 $i_e(t)$  ; Corrente Calculada do Motor

6. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros elétricos e conjunto de parâmetros mecânicos quando combinados definem um conjunto de parâmetros eletromecânicos, o conjunto de parâmetros eletromecânicos sendo equacionado através da equação matricial

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + F \cdot g(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) \end{aligned}$$

em que:

- 20  $x(t) = (v_e(t) \quad d_e(t) \quad i_e(t))^T$  ; Vetor de Estados  
 $y(t) = i_e(t)$  , ; Saída do Sistema  
 $u(t) = V_{ENT}(t)$  , ; Tensão de Alimentação [V]  
 $g(t) = F_G(d_e(t))$  ; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM}}{m} & -\frac{K_{ML}}{m} & \frac{K_{MT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{MT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} ; \text{Matriz Dinâmica do Sistema}$$

- 25  $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}^T$  , ; Vetor de Entrada de Alimentação

$$F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T, \quad ; \text{Vetor de Entrada de Pressão}$$

$$C = (0 \ 0 \ 1) \quad ; \text{Vetor de Saída}$$

$K_{MT}$  ; Constante de Motor

$K_{ML}$  ; Constante de Mola

5  $K_{AM}$  ; Primeira Constante de Amortecimento

$R$  ; Resistência elétrica do motor do compressor

$L$  ; Indutância do motor do compressor (100)

$m$  ; Massa da Parte Móvel

$v_e(t)$  ; Velocidade do Pistão

10  $d_e(t)$  ; Deslocamento do Pistão

$i_e(t)$  ; Corrente calculada do motor

7. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 3 e 6, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros eletromecânicos é calculado a partir de um modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante (100), o modelo matemático eletromecânico do compressor linear (100) sendo definido com base na equação matricial, o sistema de controle sendo realimentado por um erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) multiplicado por um vetor de ganhos (K), sendo o erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) calculado pela diferença entre a corrente medida ( $i_m$ ) e a corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ ), o modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante (100) sendo equacionado por:

$$i_{eo}(t) = i_m(t) - i_e(t)$$

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) + K.i_{eo}(t)$$

$$y(t) = C.x(t)$$

8. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o motor elétrico do compressor linear ressonante (100) é acionado, através da unidade de controle (15), em uma frequência de ressonância ( $F_R$ ) calculada a cada ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear (100).

9. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de

que o ciclo de operação ( $T_R$ ) é medido através da corrente medida ( $i_m$ ) e calculado para ter o mesmo período da corrente medida ( $i_m$ ).

5 10. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o circuito eletrônico observador (20) é configurado a partir de um circuito eletrônico microprocessado.

10 11. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 5 e 8, caracterizado pelo fato de que a corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ ), o deslocamento do pistão ( $d_e(t)$ ) e a velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) do compressor linear (100) são calculados em uma frequência de discretização ( $F_d$ ) substancialmente superior à frequência de ressonância ( $F_R$ ).

15 12. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 1, 6 e 11, caracterizado pelo fato de que o deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) é calculado a partir do deslocamento do pistão ( $d_e(t)$ ) durante um ciclo de operação ( $T_R$ ).

20 13. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros mecânicos é calculado a cada ciclo de operação ( $T_R$ ).

25 14. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o acionamento do compressor linear ressonante (100) é provido com base em uma tensão de operação ( $u_c$ ), a tensão de operação ( $u_c$ ) sendo calculada com base nos valores de deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) e velocidade de deslocamento ( $v_e(t)$ ) do pistão (1) calculados, sendo estes valores comparados com valores de referência, através de controladores de estado.

30 15. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros eletromecânicos inclui uma força de pressão do gás no cilindro  $F_G(d(t))$  calculada por:

$$F_G(t) = K_{AMEq} \cdot v_e(t) + K_{MLEq} \cdot d_e(t) + F_{Cont}$$

Em que:

$K_{MLEq}$  = segunda constante de mola

$K_{AMEq}$  = segunda constante de amortecimento

$F_{Cont}$  = força contínua equivalente

- 5                    16. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que um coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) é definido como a soma da constante de mola com a segunda constante de mola:

$$K_{MLT} = K_{ML} + K_{MLEq}$$

- 10                    17. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que um coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) é calculado através da equação

$$K_{MLT} = m \cdot 4 \cdot (\pi \cdot F_R)^2$$

Em que:

$F_R$  = frequência de ressonância

- 15                    18. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 5 e 16, caracterizado pelo fato de que um força de mola é calculada através da equação

$$F_{ML}(d_e(t)) = K_{MLT} \cdot d_e(t)$$

- 20                    19. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que um coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) é definido como a soma da constante de amortecimento com a segunda constante de amortecimento:

$$K_{AMT} = K_{AM} + K_{AMEq}$$

- 25                    20. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de que o coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) é ajustado através do balanço de potência:

m) se a potência de entrada real ( $P_e$ ) calculada for maior do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ) com a potência dissipada ( $P_R$ ), então incrementar o valor do coeficiente de amorte-

cimento total ( $K_{AMT}$ ) para um próximo ciclo de operação ( $T_R$ );

- n) se a potência de entrada real ( $P_E$ ) calculada for menor do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ) com a potência dissipada ( $P_R$ ), então decrementar o valor do coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) para um próximo ciclo de operação ( $T_R$ ).

21. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de que o coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) é calculado através da equação

$$P_{AMT} = P_E - P_R$$

$$K_{AMT} = \frac{2 \cdot P_{AMT}}{(2 \cdot \pi \cdot F_R \cdot D_{MAX})^2}$$

- 10 Em que:

$P_E$  = Potência na Entrada do Real

$P_R$  = Potência Dissipada na Resistência do Motor

$D_{MAX}$  = Deslocamento Máximo do Pistão

- 15 22. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 5 e 19, caracterizado pelo fato de que uma força de amortecimento é calculada através da equação

$$F_{AM}(v_e(t)) = K_{AMT} \cdot v_e(t)$$

- 20 23. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 6, 7, 18 e 19, caracterizado pelo fato de que uma matriz dinâmica do sistema ( $A$ ) é calculada através da equação

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AMT}}{m} & -\frac{K_{MLT}}{m} & \frac{K_{MT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{MT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}$$

- 25 24. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 16 e 19, caracterizado pelo fato de que uma primeira matriz de coeficiente ( $A$ ), uma segunda matriz de coeficiente ( $B$ ), uma terceira matriz de coeficiente ( $F$ ) e um vetor de ganhos ( $K$ ), em um ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante

(100), são ajustados a partir do coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) e coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ).

25. Sistema de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a força contínua equivalente ( $F_{Cont}$ ) é calculada em função da potência de entrada real ( $P_e$ ) no motor elétrico e em função do ciclo de operação ( $T_R$ ).

26. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, o compressor linear ressonante (100) compreendendo pelo menos um motor elétrico, o motor elétrico sendo acionado por um inversor de frequência, o método de controle sendo caracterizado pelo fato de que compreende as seguintes etapas:

a) medir a cada ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), com uma frequência de discretização ( $F_d$ ), uma corrente medida ( $i_m$ ) do motor elétrico;

b) calcular um ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), a partir da corrente medida ( $i_m$ ) do motor elétrico, e com base no ciclo de operação ( $T_R$ ) calculado, calcular uma frequência de ressonância ( $F_R$ ) do compressor linear ressonante (100);

c) calcular a cada ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), na frequência de discretização ( $F_d$ ), uma corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ ), um deslocamento do pistão ( $d_e(t)$ ) e uma velocidade do pistão ( $v_e(t)$ );

d) calcular a cada ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), na frequência de discretização ( $F_d$ ), um erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) calculado pela diferença entre a corrente medida ( $i_m$ ) e a corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ );

e) calcular, com base no deslocamento do pistão ( $d_e(t)$ ) calculado na etapa c, um deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) do pistão (1) do compressor linear ressonante (100);

f) calcular, em um ciclo de operação ( $T_R$ ), uma potência de entrada real ( $P_e$ ) no motor elétrico a partir da corrente medida ( $i_m$ ) e de uma

tensão de operação ( $u_c$ ) aplicada pelo inversor do motor elétrico;

g) calcular, em um ciclo de operação ( $T_R$ ), uma potência dissipada ( $P_R$ ) em uma resistência elétrica do motor ( $R$ ) a partir da corrente medida ( $i_m$ );

5 h) calcular uma força de amortecimento ( $F_{AMT}$ ) total, produzida em um ciclo de operação ( $T_R$ ), a partir de um coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) e da velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) calculada na etapa c;

i) calcular uma potência dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ) a partir da força de amortecimento total ( $F_{AMT}$ ) calculada na etapa anterior e da velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) calculada na etapa c;

10 j) calcular uma força contínua equivalente ( $F_{Cont}$ ) em função da potência de entrada real ( $P_e$ ) no motor elétrico calculada na etapa f e em função do ciclo de operação ( $T_R$ ) calculado na etapa b;

k) calcular, a partir do deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) e velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ), e na corrente medida ( $i_m$ ), um valor de tensão de operação ( $u_c$ ) a ser aplicado no motor elétrico do compressor linear (100); e

l) aplicar no motor elétrico do compressor linear ressonante (100) o valor de tensão de operação ( $u_c$ ) calculado na etapa k.

27. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de ainda compreender uma etapa para calcular um coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) do compressor linear ressonante (100), a partir da frequência de ressonância ( $F_R$ ) calculada na etapa b.

28. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de que o coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) é calculado através da equação

$$K_{MLT} = m.4.(\pi.F_R)^2$$

Em que:

$F_R$  = frequência de ressonância

29. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de ainda compreender uma etapa para calcular o coeficiente de amortecimento total

( $K_{AMT}$ ) do compressor linear ressonante (100), a partir das potências de entrada real ( $P_e$ ), dissipada ( $P_R$ ) e dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ).

5 30. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de ainda compreender as seguintes etapas:

m) se a potência de entrada real ( $P_e$ ) calculada for maior do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ) com a potência dissipada ( $P_R$ ), então incrementar o valor do coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) para um próximo ciclo de operação ( $T_R$ );

10 n) se a potência de entrada real ( $P_e$ ) calculada for menor do que a soma da potência dissipada pelo amortecimento total ( $P_{AMT}$ ) com a potência dissipada ( $P_R$ ), então decrementar o valor do coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) para um próximo ciclo de operação ( $T_R$ );

15 31. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato do coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) ser calculado pelo equacionamento:

$$P_{AMT} = P_e - P_R$$

$$K_{AMT} = \frac{2 \cdot P_{AMT}}{(2 \cdot \pi \cdot F_R \cdot D_{MAX})^2}$$

20 32. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 26 a 31, caracterizado pelo fato de que uma primeira matriz de coeficiente (A), uma segunda matriz de coeficiente (B), uma terceira matriz de coeficiente (F) e um vetor de ganhos (K), em um ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), são ajustados a partir do coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) e coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ).

25 33. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de que um modelo matemático elétrico do compressor linear (100) é definido com base em um circuito elétrico RL em série com uma fonte de tensão e equacionado através da equação

$$V_{ENT}(t) = V_R(i_e(t)) + V_L(i_e(t)) + V_{MT}(v_e(t))$$

em que:

	$V_R(i_e(t)) = R \cdot i_e(t)$	; Tensão da Resistência [V];
	$V_L(i_e(t)) = L \cdot \frac{di_e(t)}{dt}$	; Tensão do Indutor [V];
	$V_{MT}(v_e(t)) = K_{MT} \cdot v_e(t)$	; Tensão Induzida no Motor ou FCEM [V];
5	$V_{ENT}(t)$	; Tensão de Alimentação [V];
	R	; Resistência Elétrica do Motor do Compressor
	L	; Indutância do Motor do Compressor (100)
	$K_{MT}$	; Constante de Força e Tensão do Motor
	$v_e(t)$	; Velocidade do Pistão Calculada
10	$i_e(t)$	; Corrente Calculada do Motor

34. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático mecânico do compressor linear (100) é definido com base em um sistema mecânico massa/mola equacionado através da equação

$$m \cdot \frac{d^2 d_e(t)}{dt^2} = F_{MT}(i_e(t)) - F_{ML}(d_e(t)) - F_{AM}(v_e(t)) - F_G(d_e(t))$$

em que:

	$F_{MT}(i_e(t)) = K_{MT} \cdot i_e(t)$	; Força do Motor [N];
	$F_{ML}(d_e(t)) = K_{ML} \cdot d_e(t)$	; Força da Mola [N];
	$F_{AM}(v_e(t)) = K_{AM} \cdot v_e(t)$	; Força de Amortecimento [N];
20	$F_G(d_e(t))$	; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];
	$K_{MT}$	; Constante de Motor
	$K_{ML}$	; Constante de Mola
	$K_{AM}$	; primeira Constante de Amortecimento
	m	; Massa da Parte Móvel
25	$v_e(t)$	; Velocidade do Pistão
	$d_e(t)$	; Deslocamento do Pistão
	$i_e(t)$	; Corrente Calculada do Motor

35. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de compreender um modelo matemático eletromecânico do compressor linear (100)

equacionado por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) \\ y(t) &= C.x(t)\end{aligned}$$

em que:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v_e(t) \\ d_e(t) \\ i_e(t) \end{pmatrix}, \quad y_e(t) = i_e(t), \quad u(t) = V_{ENT}(t), \quad g(t) = F_G(t)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM}}{m} & -\frac{K_{ML}}{m} & \frac{K_{FMT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{VMT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (0 \quad 0 \quad 1)$$

36. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático eletromecânico do compressor linear (100) é realimentado por um erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) multiplicado por um vetor de ganhos (K), sendo o erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) calculado pela diferença entre a corrente medida ( $i_m$ ) e a corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ ), o modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante (100) sendo equacionado por:

$$\begin{aligned}i_{eo}(t) &= i_m(t) - i_e(t) \\ \dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) + K.i_{eo}(t) \\ y(t) &= C.x(t)\end{aligned}$$

37. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 34, 35 e 36, caracterizado pelo fato de que a força de pressão do gás no cilindro  $F_G(d(t))$  é calculada por:

$$F_G(t) = K_{AMEq}.v_e(t) + K_{MLEq}.d_e(t) + F_{Cont}$$

Em que:

- 15  $K_{MLEq}$  = segunda constante de mola  
 $K_{AMEq}$  = segunda constante de amortecimento  
 $F_{Cont}$  = força contínua equivalente

38. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 28, caracterizado pelo fato de que o coeficiente de mola total ( $K_{MLT}$ ) é definido como a soma da constante de mola com a segunda constante de mola, calculado através da equação:

$$K_{MLT} = K_{ML} + K_{MLEq}$$

39. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 34 e 38, caracterizado pelo fato de que uma força de mola é calculada através da equação

$$F_{ML}(d_e(t)) = K_{MLT} \cdot d_e(t)$$

5 40. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 26, caracterizado pelo fato de que o coeficiente de amortecimento total ( $K_{AMT}$ ) é definido como a soma da constante de amortecimento com a segunda constante de amortecimento calculado através da equação

$$K_{AMT} = K_{AM} + K_{AMEq}$$

10 41. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 34 e 40, caracterizado pelo fato de que uma força de amortecimento total é calculada através da equação

$$F_{AM}(d_e(t)) = K_{AMT} \cdot d_e(t)$$

15 42. Método de controle para pistão (1) de compressor linear ressonante (100), de acordo com as reivindicações 34, 38, 39 e 40, caracterizado pelo fato de que Matriz dinâmica do sistema (A) é calculada através da equação

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AMT}}{m} & -\frac{K_{MLT}}{m} & \frac{K_{MT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{MT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}$$

43. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 26 e 30, caracterizado pelo fato de ainda compreender as seguintes etapas:

20 o) ajustar uma primeira corrente elétrica de referência ( $i_{1ref}$ ) a partir da comparação entre o deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) do pistão calculado na etapa "e" e um deslocamento de referência ( $D_{REF}$ ) programado;

p) ajustar uma segunda corrente elétrica de referência ( $i_{2ref}$ ) multiplicando a primeira corrente elétrica de referência ( $i_{1ref}$ ) ajustada pela velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) calculada na etapa c;

25 q) ajustar um erro de corrente de controle ( $i_{ce}$ ) pela diferença

entre a segunda corrente elétrica de referência ( $I_{2ref}$ ) e a corrente medida ( $i_m$ );

r) ajustar a tensão de operação ( $u_c$ ) aplicada ao inversor de frequência do motor elétrico a partir do erro de corrente de controle ( $i_{ce}$ ) calculado na etapa anterior.

44. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 43, caracterizado pelo fato de que a primeira corrente elétrica de referência ( $I_{1ref}$ ) é gerada em uma saída de um primeiro controlador de estados proporcional e integral ( $P_{11}$ ) ou proporcional integral derivativo.

45. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 43, caracterizado pelo fato de que a tensão de operação ( $u_c$ ) aplicada ao inversor do motor elétrico é gerada em uma saída de um segundo controlador de estados proporcional e integral ( $P_{12}$ ) ou proporcional integral derivativo.

46. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, o compressor linear ressonante (100) compreendendo pelo menos um motor elétrico, o motor elétrico sendo acionado eletricamente por um inversor de frequência, o método de controle sendo caracterizado pelo fato de que compreende as seguintes etapas:

i) medir, a partir de um circuito eletrônico microprocessado, e em um ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), com uma frequência de discretização, uma corrente medida ( $i_m$ ) do motor elétrico;

ii) calcular com base na corrente medida ( $i_m$ ) e em uma tensão de operação ( $u_c$ ) aplicada ao inversor do motor elétrico, pelo menos um conjunto de parâmetros elétricos do motor e pelo menos um conjunto de parâmetros mecânicos do compressor linear (100);

iii) calcular, com base nos valores medidos e calculados nas etapas i e ii, um deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) e uma velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) do compressor linear ressonante (100);

iv) ajustar, a partir do deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) e velocidade do pistão ( $v_e(t)$ ) obtidos na etapa iii, um novo valor para a tensão de ope-

ração ( $u_c$ ) a ser aplicada no inversor do motor elétrico do compressor linear (100); e

v) aplicar no inversor do motor elétrico do compressor linear ressonante (100) a tensão de operação ( $u_c$ ) ajustada na etapa iv.

5 47. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que o valor de tensão de operação ( $u_c$ ) é calculado em um ciclo de operação ( $T_R$ ) do compressor linear ressonante (100), o ciclo de operação ( $T_R$ ) definindo a operação do compressor linear (100) em uma frequência de ressonância  
10 ( $F_R$ ).

48. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros elétricos é calculado a partir de um modelo matemático elétrico do compressor linear ressonante (100).

15 49. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros mecânicos é calculado a partir de um modelo matemático mecânico do compressor linear ressonante (100).

20 50. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que um modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante (100) é definido com base nos conjuntos de parâmetros elétricos e mecânicos.

25 51. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático elétrico do compressor linear (100) é definido com base em um circuito elétrico RL em série com uma fonte de tensão e equacionado através da equação

$$V_{ENT}(t) = V_R(i_e(t)) + V_L(i_e(t)) + V_{MT}(v_e(t))$$

em que:

30  $V_R(i_e(t)) = R \cdot i_e(t)$  ; Tensão da Resistência [V];

$V_L(i_e(t)) = L \cdot \frac{di_e(t)}{dt}$  ; Tensão do Indutor [V];

	$V_{MT}(v_e(t)) = K_{MT} \cdot v_e(t)$	; Tensão Induzida no Motor ou FCEM [V];
	$V_{ENT}(t)$	; Tensão de Alimentação [V];
	R	; Resistência Elétrica do Motor do Compressor
	L	; Indutância do motor do compressor (100)
5	$K_{MT}$	; Constante de Força e Tensão do Motor
	$v_e(t)$	; Velocidade do Pistão Calculada
	$i_e(t)$	; Corrente Calculada do Motor

52. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático mecânico do compressor linear (100) é definido com base em um sistema mecânico massa/mola equacionado através da equação

$$m \cdot \frac{d^2 d_e(t)}{dt^2} = F_{MT}(i_e(t)) - F_{ML}(d_e(t)) - F_{AM}(v_e(t)) - F_G(d_e(t))$$

em que:

	$F_{MT}(i_e(t)) = K_{MT} \cdot i_e(t)$	; Força do Motor [N];
15	$F_{ML}(d_e(t)) = K_{ML} \cdot d_e(t)$	; Força da Mola [N];
	$F_{AM}(v_e(t)) = K_{AM} \cdot v_e(t)$	; Força de Amortecimento [N];
	$F_G(d_e(t))$	; Força da Pressão do Gás no Cilindro [N];
	$K_{MT}$	; Constante de Motor
	$K_{ML}$	; Constante de Mola
20	$K_{AM}$	; Primeira Constante de Amortecimento
	m	; Massa Da Parte Móvel
	$v_e(t)$	; Velocidade do Pistão
	$d_e(t)$	; Deslocamento do Pistão
	$i_e(t)$	; Corrente calculada do motor

25 53. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 50, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático eletromecânico do compressor linear (100) é definido com base em um sistema eletromecânico equacionado através da equação matricial

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) + F.g(t)$$

$$y(t) = C.x(t)$$

em que:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v_e(t) \\ d_e(t) \\ i_e(t) \end{pmatrix}, \quad y(t) = i_e(t), \quad u(t) = V_{ENT}(t), \quad g(t) = F_G(t)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM}}{m} & -\frac{K_{ML}}{m} & \frac{K_{FMT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{VMT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (0 \ 0 \ 1)$$

54. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com a reivindicação 50, caracterizado pelo fato de que o modelo matemático eletromecânico do compressor linear (100) é realimentado por um erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) multiplicado por um vetor de ganhos (K), sendo o erro de corrente do observador ( $i_{eo}$ ) calculado pela diferença entre a corrente medida ( $i_m$ ) e a corrente calculada do motor ( $i_e(t)$ ), o modelo matemático eletromecânico do compressor linear ressonante (100) sendo equacionado por:

$$\begin{aligned} i_{eo}(t) &= i_m(t) - i_e(t) \\ \dot{x}(t) &= A.x(t) + B.u(t) + F.g(t) + K.i_{eo}(t) \\ y(t) &= C.x(t) \end{aligned}$$

em que:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v_e(t) \\ d_e(t) \\ i_e(t) \end{pmatrix}, \quad y(t) = i_e(t), \quad u(t) = V_{ENT}(t), \quad g(t) = F_G(t)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_{AM}}{m} & -\frac{K_{ML}}{m} & \frac{K_{FMT}}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{VMT}}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

55. Método de controle para pistão de compressor linear ressonante, de acordo com as reivindicações 52 a 54, caracterizado pelo fato de que a força de pressão do gás no cilindro  $F_G(d(t))$  é calculada por:

$$F_G(t) = K_{AMEq}.v_e(t) + K_{MLEq}.d_e(t) + F_{Cont}$$

56. Compressor linear ressonante (100) caracterizado pelo fato de que compreende um método de controle para pistão como definido nas reivindicações 26 a 45 ou nas reivindicações 46 a 55.

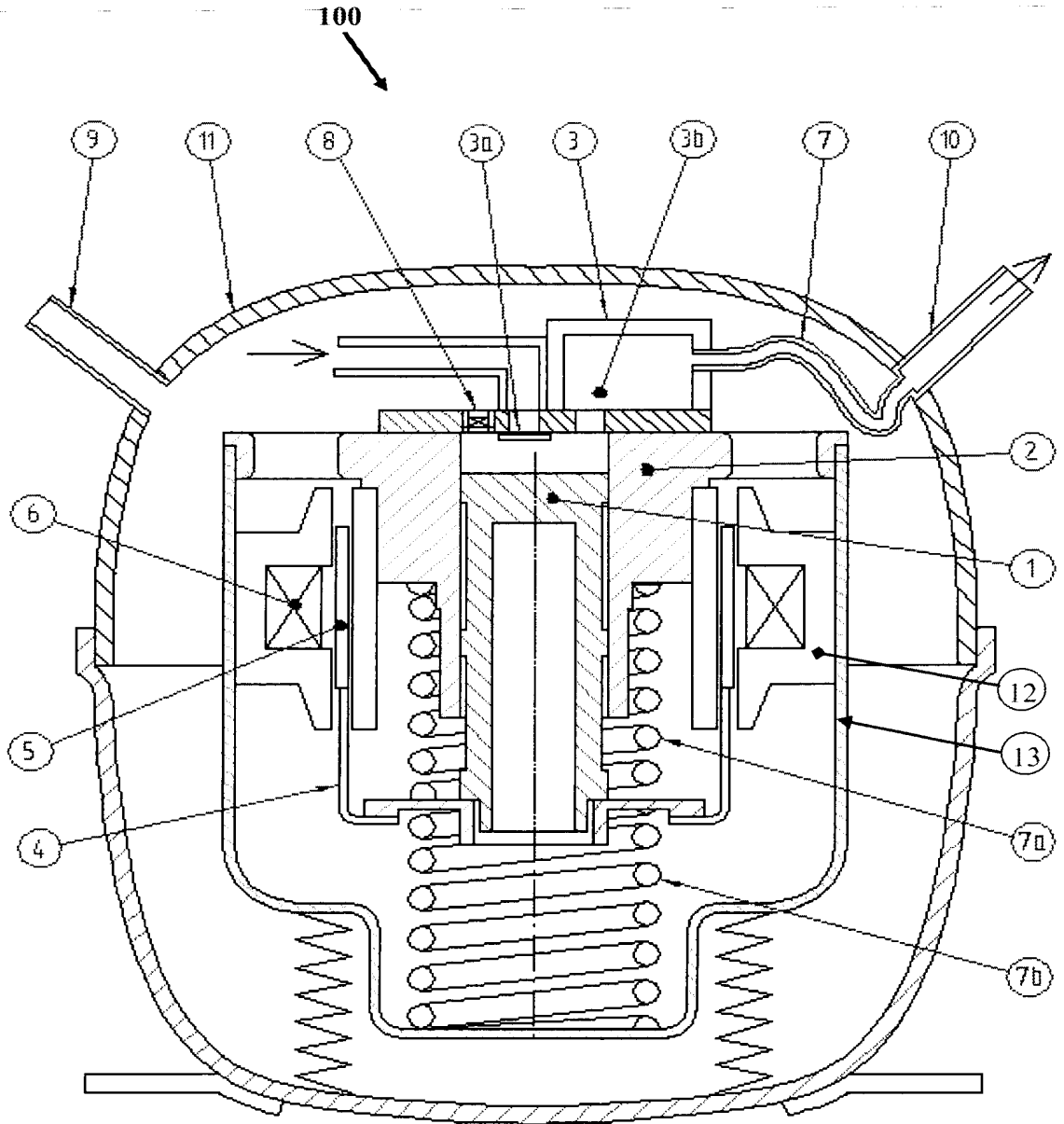


FIG. 1

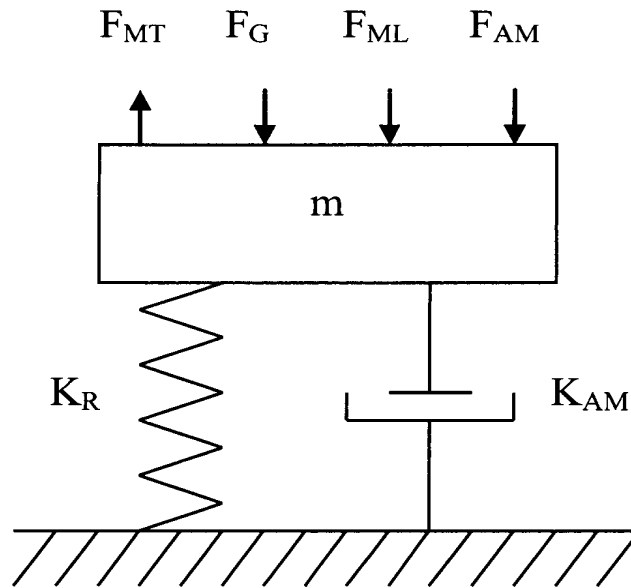


FIG. 2

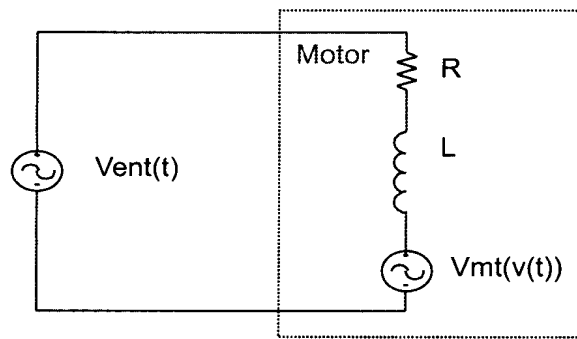


FIG. 3

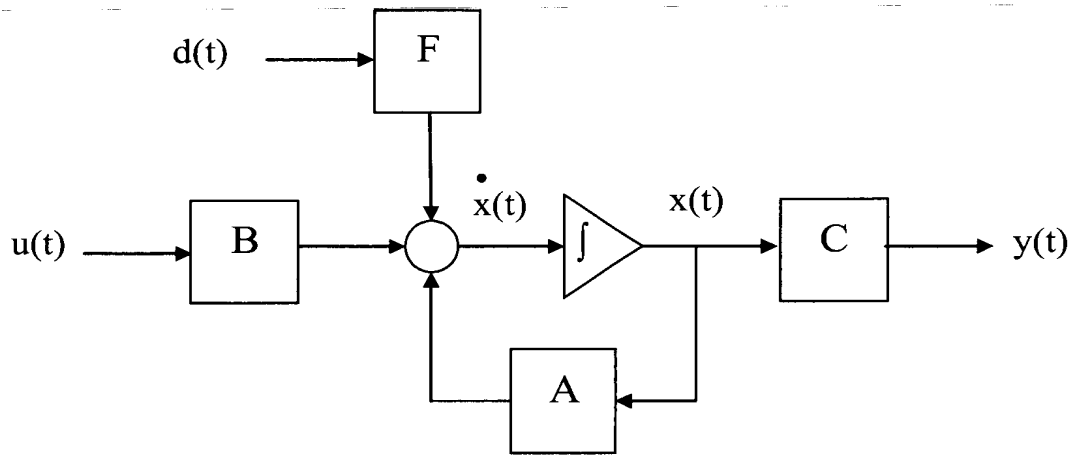


FIG. 4

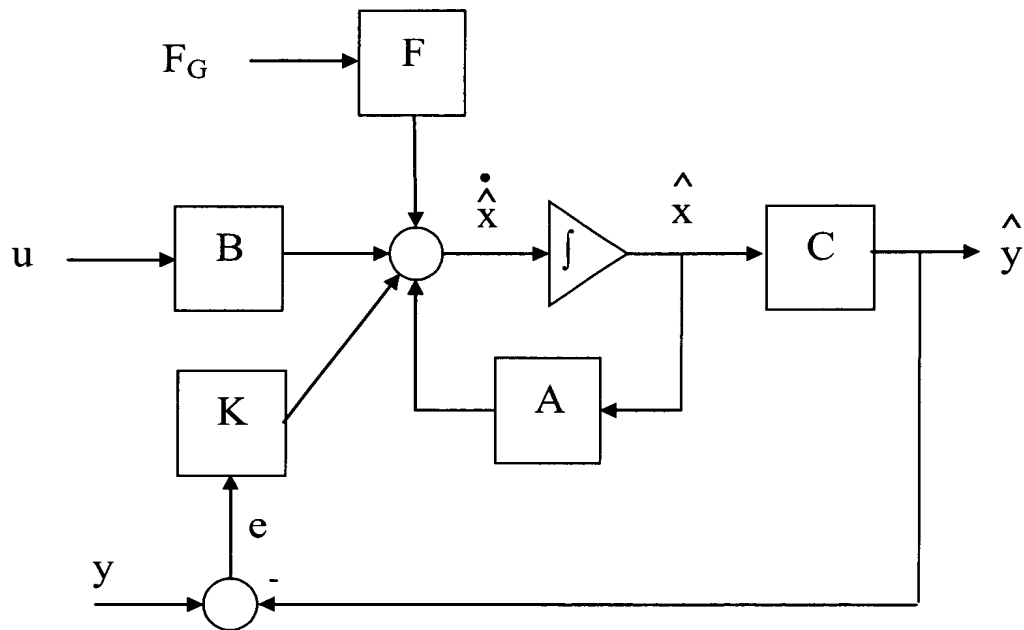


FIG. 5

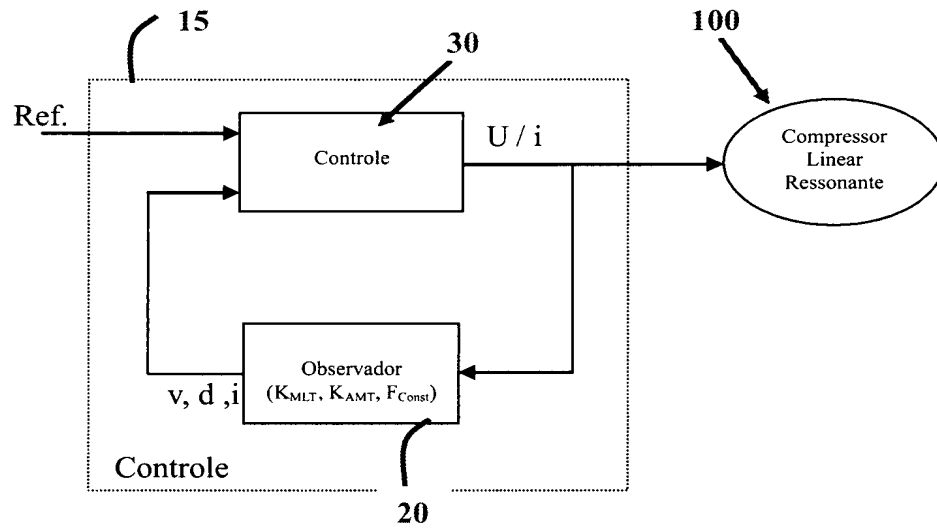


FIG. 6

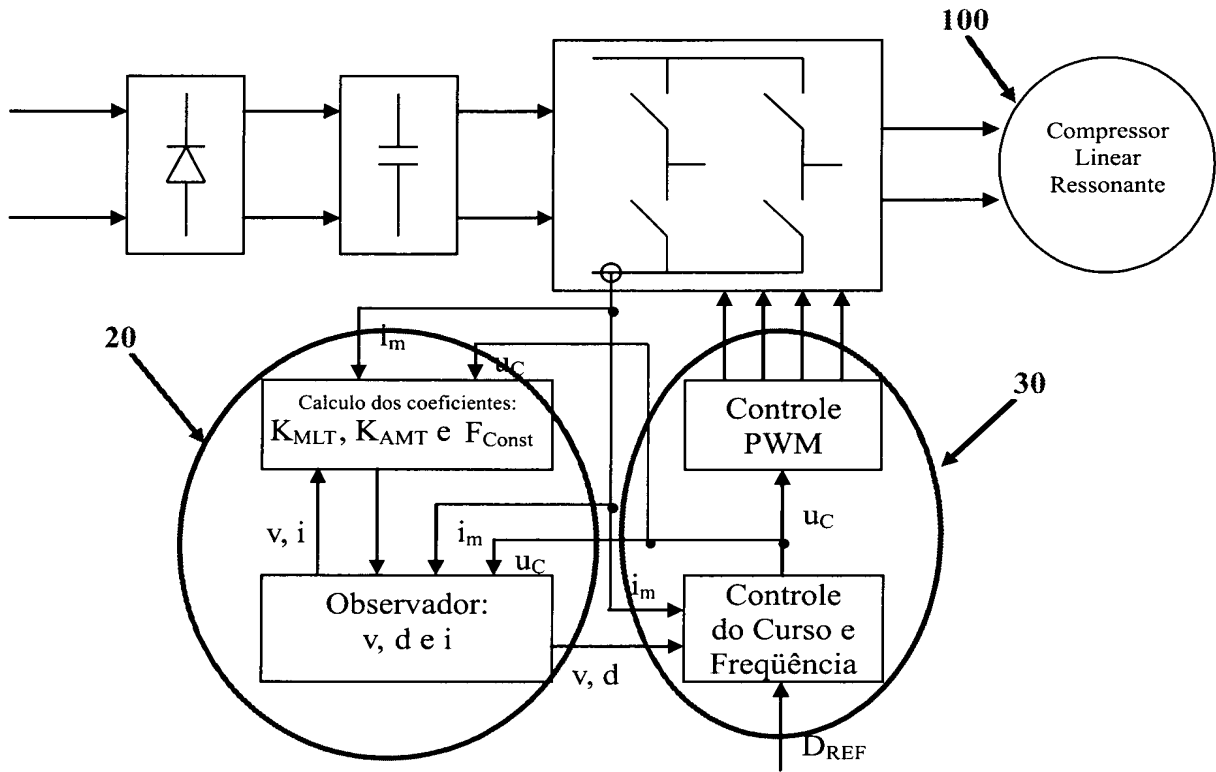


FIG. 7

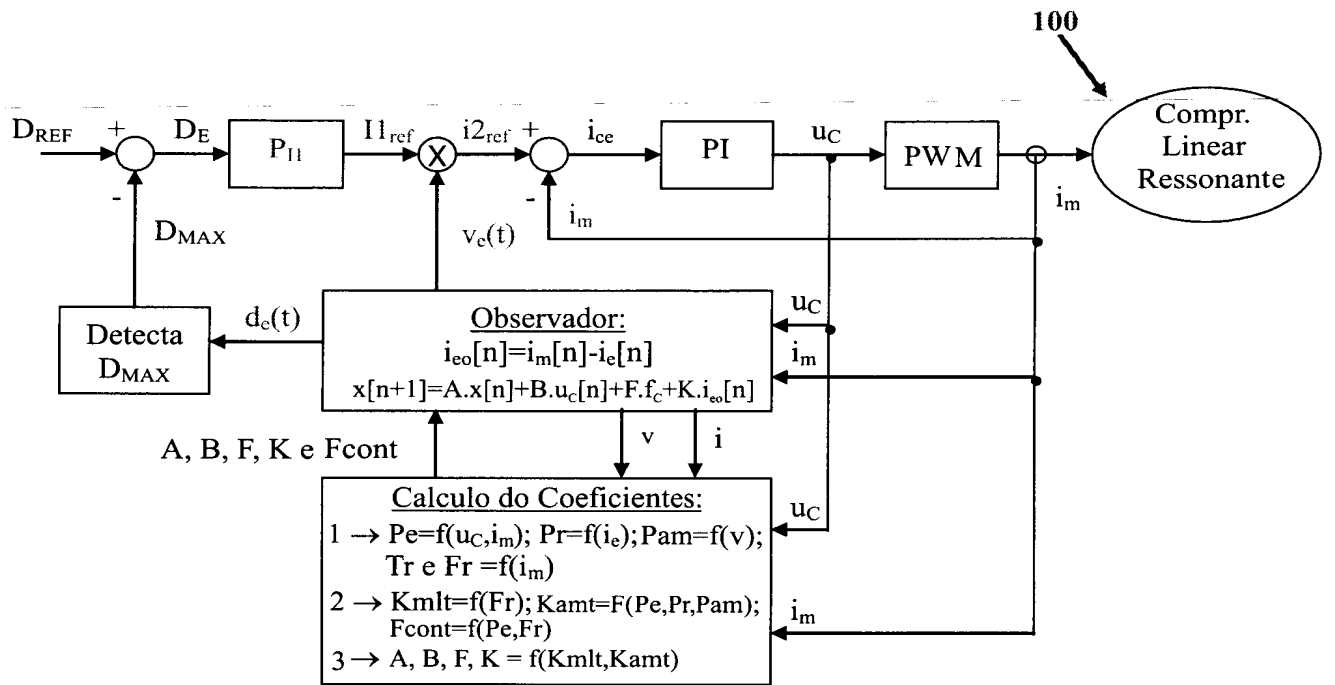


FIG. 8

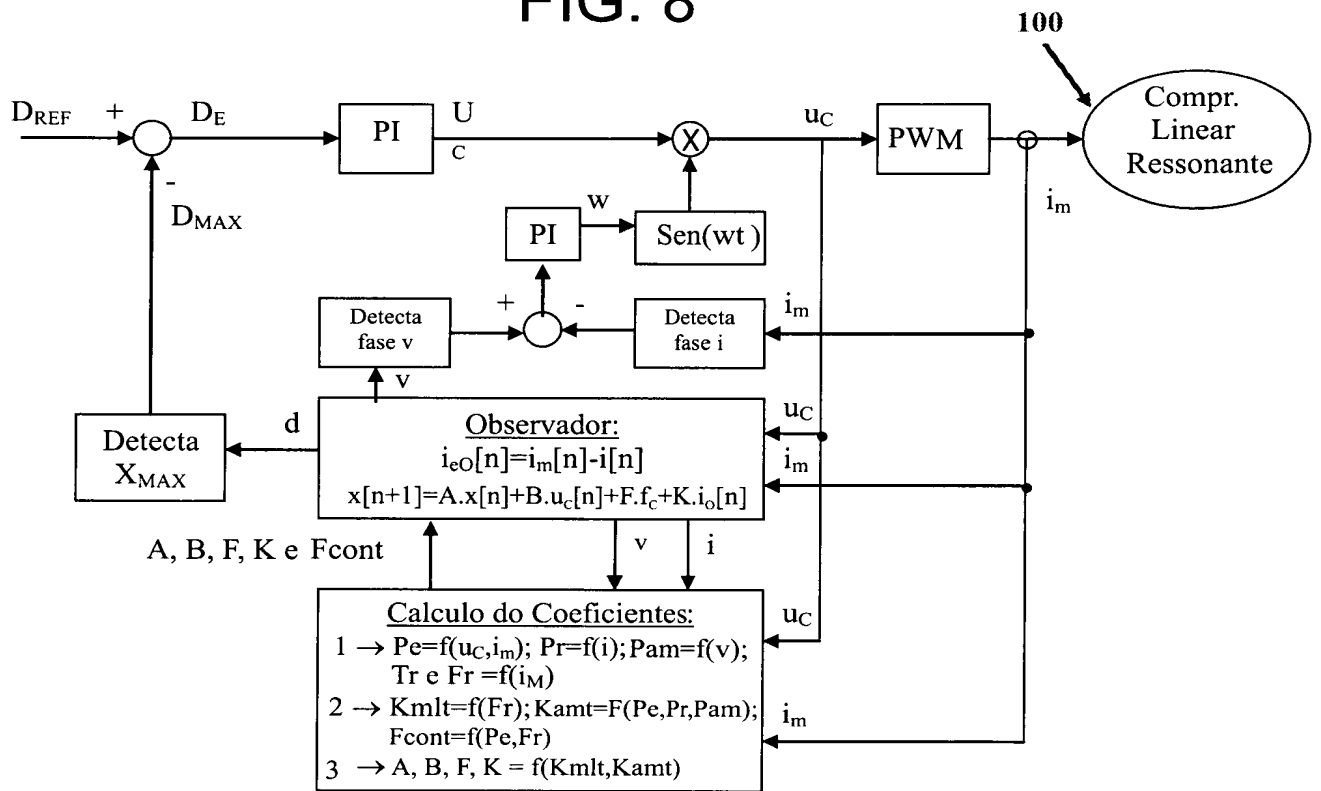


FIG. 9

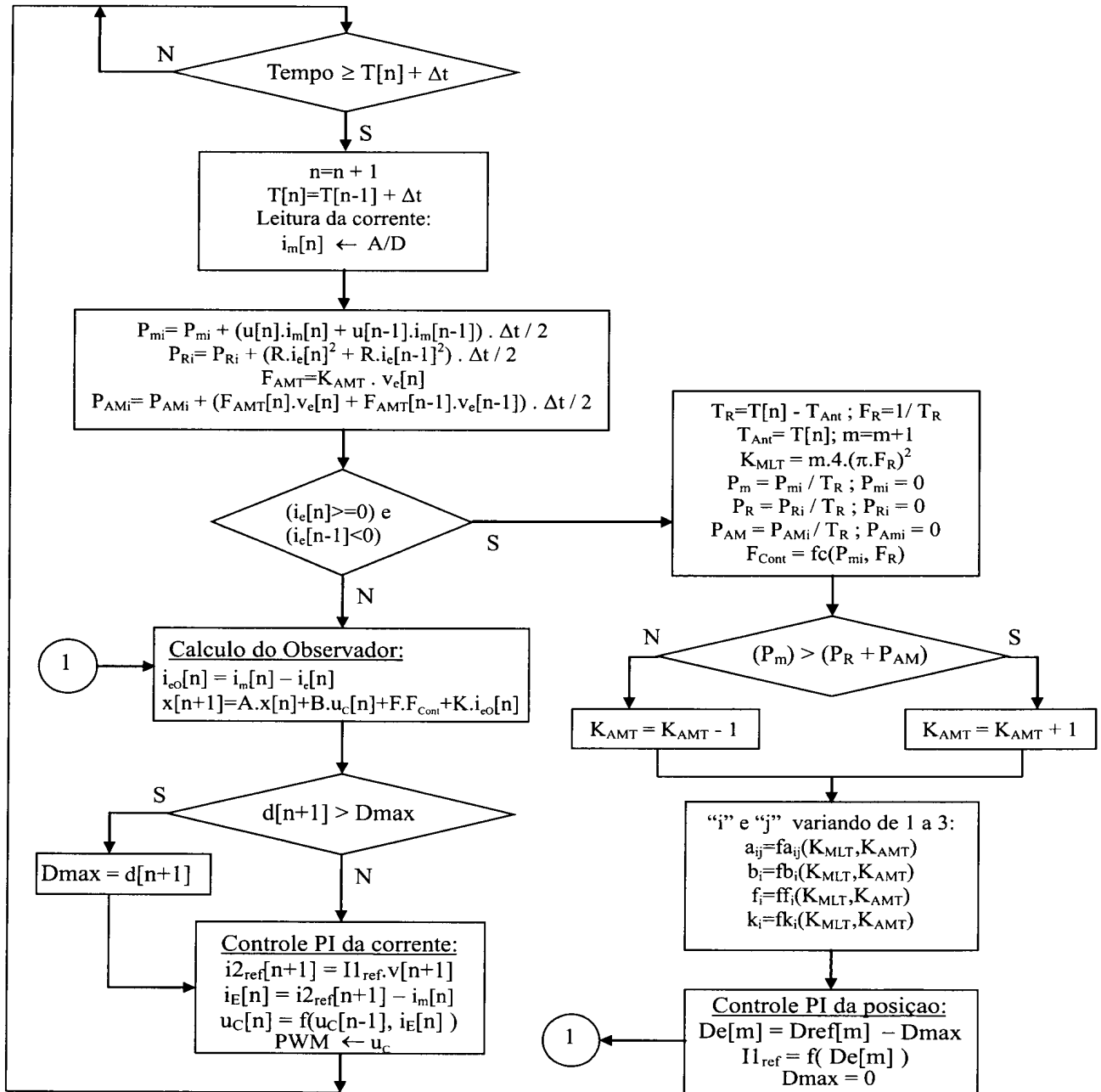


FIG. 10

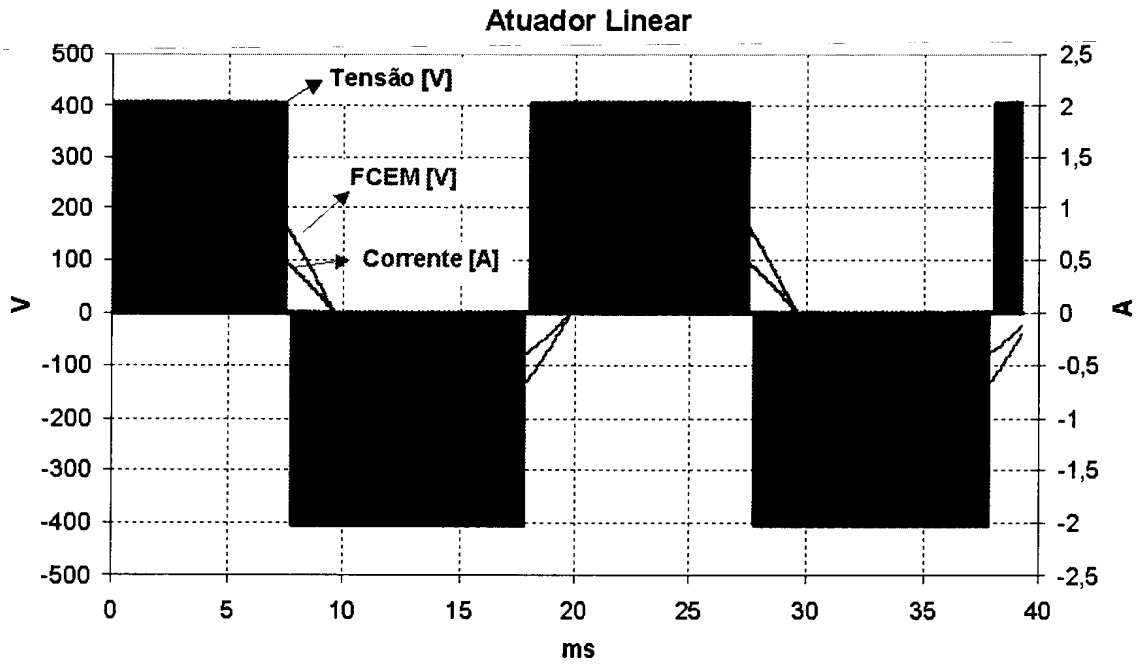


FIG. 11

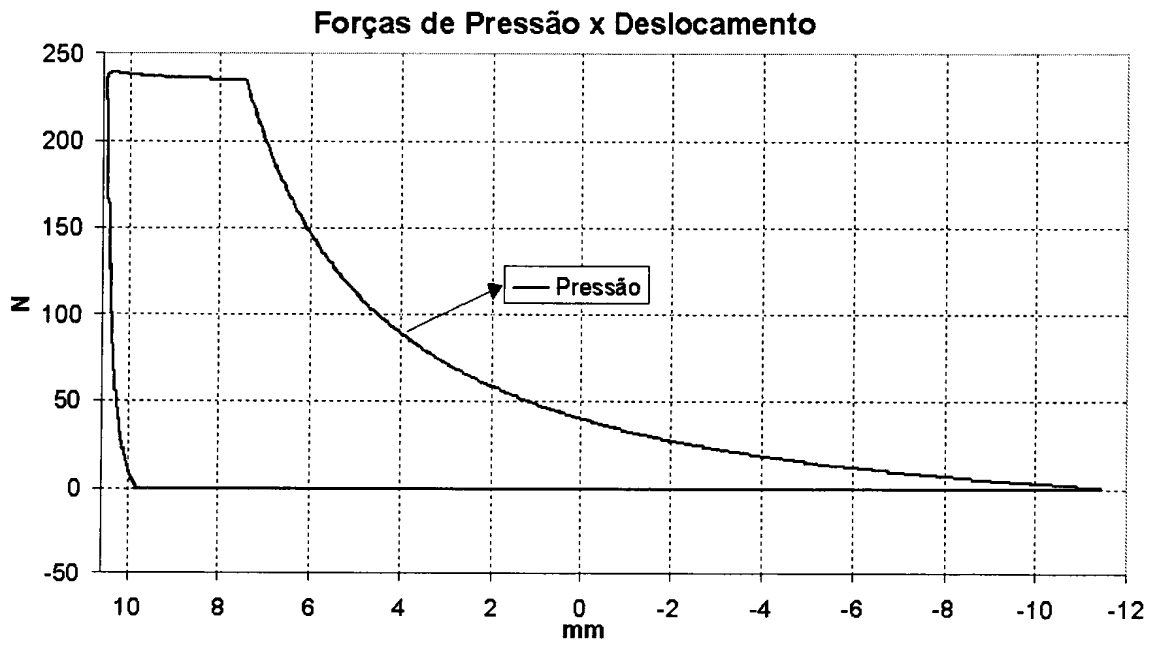


FIG. 12

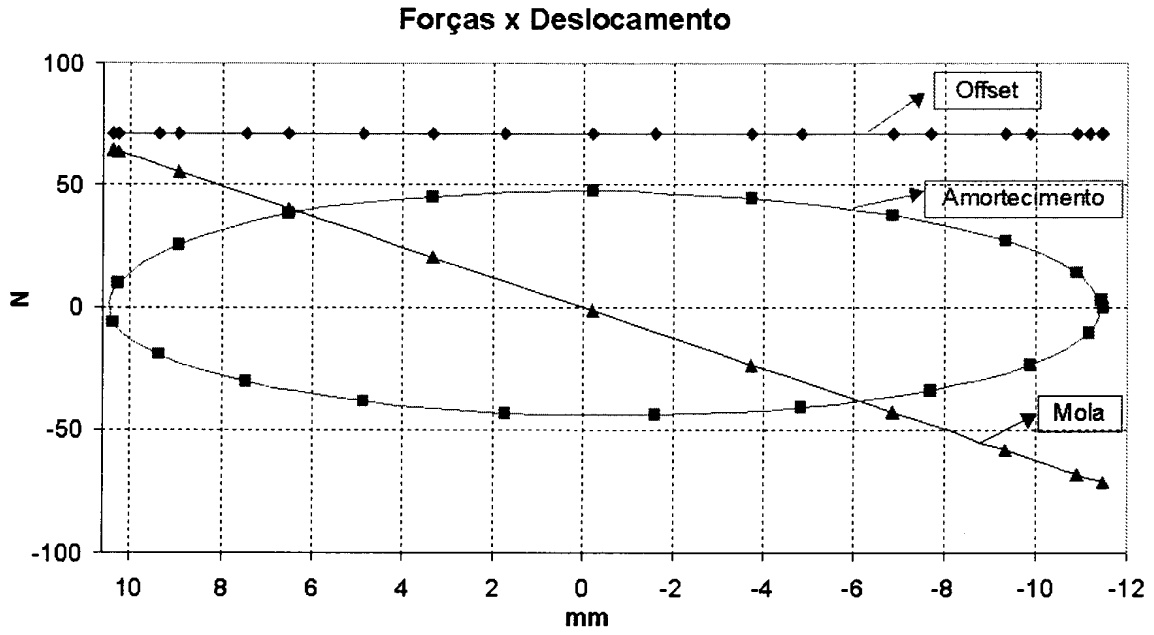


FIG. 13

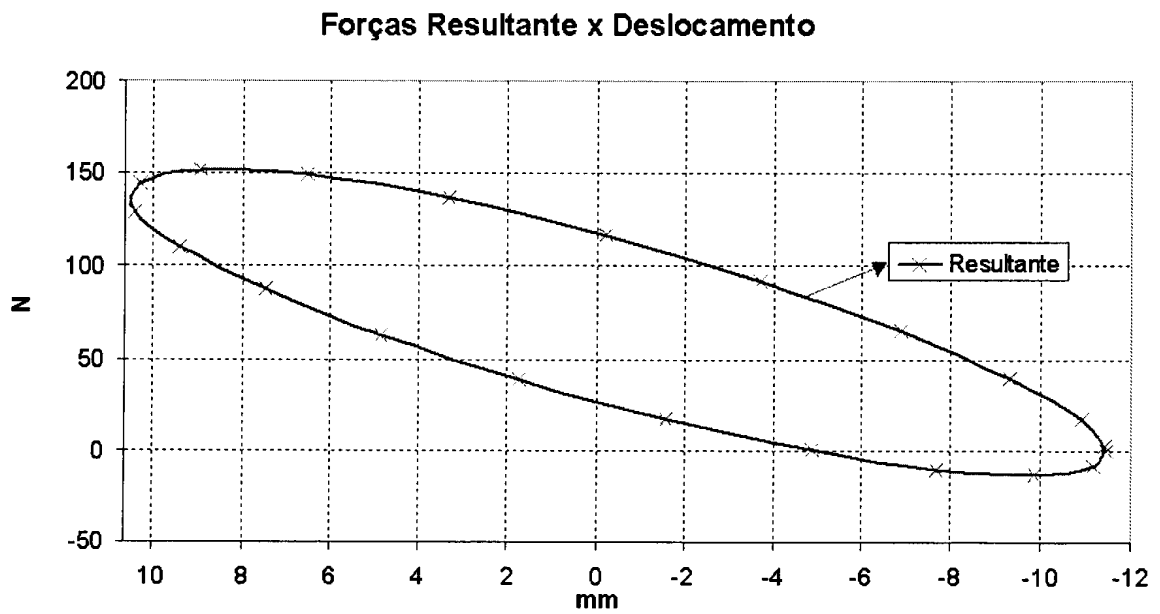


FIG. 14

## RESUMO

Patente de Invenção: **"SISTEMA DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE, MÉTODO DE CONTROLE PARA PISTÃO DE COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE E COMPRESSOR LINEAR RESSONANTE"**.

5 A presente invenção refere-se a um sistema e a um método de controle para pistão de compressor linear ressonante (100) especialmente projetados para operar na sua máxima eficiência, sendo tal sistema capaz de acionar o dito compressor sem o uso de sensores para medir grandezas  
10 ou variáveis mecânicas.

A presente invenção faz referência ainda a um método de controle para pistão de um compressor linear ressonante, cujas etapas permitem estimar a velocidade e o deslocamento do referido pistão, a fim de controlar de forma eficiente o motor do compressor.

15 Adicionalmente, a presente invenção refere-se a um compressor linear ressonante (100) dotado de um sistema de controle tal como proposto no objeto ora reivindicado.

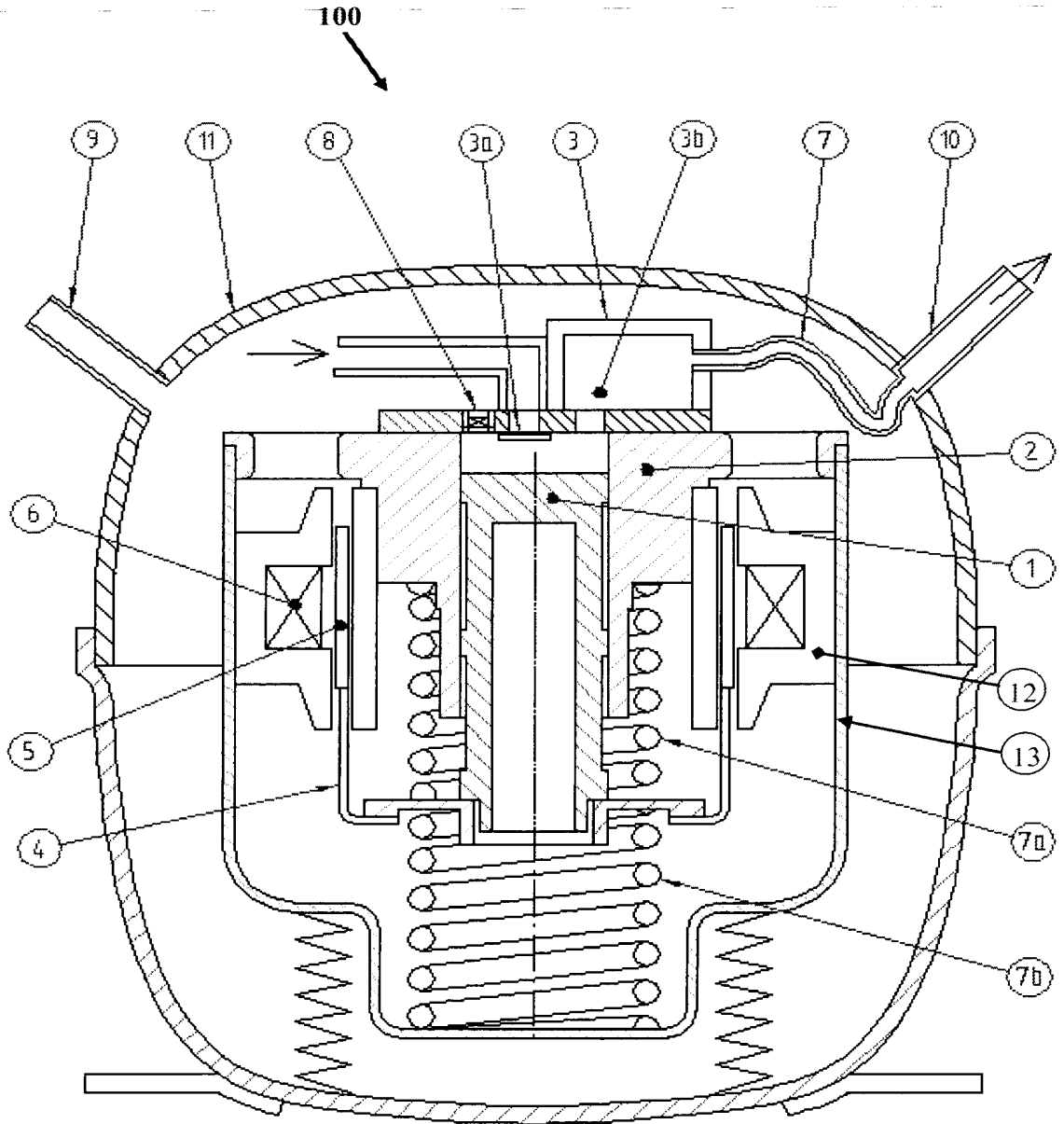


FIG. 1