



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

(11) PI 0400108-7 B1

(22) Data do Depósito: 22/01/2004

(45) Data de Concessão: 28/03/2017



(54) Título: COMPRESSOR LINEAR E MÉTODO DE CONTROLE DE UM COMPRESSOR LINEAR

(51) Int.Cl.: F25B 31/02; F04B 35/04; H02K 33/00

(73) Titular(es): WHIRLPOOL S.A.

(72) Inventor(es): PAULO SERGIO DAINEZ; DIETMAR ERICH BERNHARD LILIE; MARCIO ROBERTO THIESSEN

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para
**"COMPRESSOR LINEAR E MÉTODO DE CONTROLE DE UM
COMPRESSOR LINEAR".**

[001] A presente invenção refere-se a um motor linear, um compressor linear, um método de controle de um compressor linear, um sistema de refrigeração, bem como a um sistema de controle de um compressor linear que visa uma operação de um compressor linear em ressonância, de modo que este tenha a maior eficiência possível ao longo de sua operação.

Fundamentos da invenção

[002] Um motor linear ressonante essencialmente compreende um motor linear, por exemplo um motor de linear acoplado a um mecanismo ressonante, que pode compreender uma mola ou a uma carga qualquer que provoque um efeito de uma mola para gerar um movimento ressonante entre o motor linear e a carga. As aplicações desse tipo de motor linear podem incluir o acionamento de bombas de fluidos em geral, que podem acionar cargas variáveis.

[003] Exemplos típicos desses tipos de construção, são os motores lineares que são empregados em compressores lineares frequentemente aplicados em sistemas de refrigeração devido a sua eficiência em termos de economia de energia elétrica. Um compressor linear 100 empregado em sistema de refrigeração é, conforme ilustrado na Figura 1, usualmente montado no interior de uma carcaça (não-mostrada), estando o gás contido nesta carcaça a uma baixa pressão e sendo aspirado e comprimido pelo compressor linear para ser liberado em um ambiente de alta pressão 7.

[004] O mecanismo de compressão do gás se dá pelo movimento axial de um pistão 1 no interior de um cilindro 2, sendo que no cabeçote 3 estão posicionadas as válvulas de sucção 3a, e de descarga 3b, as quais regulam a entrada e saída de gás no cilindro 2.

O pistão 1 é acionado por um motor linear 10, o qual é formado por um estator 411 tendo uma bobina 11 e um suporte 4. O estator 411, por sua vez, aciona um ímã 5 que impele um atuador, nesse caso o pistão 1, estando o atuador associado a uma mola 8 do tipo helicoidal, formando o conjunto ressonante do compressor linear 100.

[005] O conjunto ressonante, acionado pelo motor linear 10 que tem a função de desenvolver um movimento alternativo linear, fazendo com que o movimento do pistão 1 no interior do cilindro 2 exerça uma ação de compressão do gás admitido pela válvula de sucção 3a, até o ponto em que este possa ser descarregado para o lado de alta pressão, através da válvula de descarga 3b para a tubulação 7.

[006] A amplitude de operação do compressor linear 100 é regulada com o equilíbrio da potência gerada pelo motor linear 10 e a potência consumida pelo mecanismo na compressão do gás mais demais perdas.

[007] Uma outra característica do mecanismo linear é a possibilidade de variar sua capacidade de bombeamento, reduzindo a potência do motor elétrico, a amplitude de operação reduz, e por sua vez, a capacidade de bombeamento.

[008] Um parâmetro variado para controlar a amplitude do compressor linear pode ser tensão de alimentação do motor elétrico. Da tensão de alimentação do motor elétrico até obter-se a amplitude desejada existem várias impedâncias acopladas, como: a resistência elétrica do motor elétrico, a indutância do motor elétrico, capacitância se um capacitor for usado, a força-contramototriz, as impedâncias do sistema ressonante (massa/mola) e o trabalho de compressão com suas perdas inerentes. A impedância deste sistema depende da frequência de acionamento do sistema, ou seja, a frequência da tensão aplicada no motor elétrico. A uma certa frequência o rendimento deste sistema é ótimo, isto ocorre quando o sistema

mecânico entra em ressonância, nesta frequência o desempenho do compressor linear é máximo.

Efeito "mola gás"

[009] A frequência de ressonância do mecanismo não é perfeitamente fixa. O gás ao ser comprimido, tem um efeito mecânico semelhante a uma mola (também conhecido como "mola gás"), esta "mola gás" é afetada principalmente por dois fatores: a distância entre o pistão e a placa de válvulas e as pressões que o compressor linear opera.

[0010] A distância entre o pistão e a placa é alterada quando o curso do pistão é reduzido, gerando um aumento da mola gás e na ressonância do mecanismo (este efeito é o mais relevante para a estabilidade de operação do mecanismo). Em um sistema de refrigeração estes dois fatores alteram substancialmente, sendo que as pressões variam do instante que o sistema é ligado até atingir o regime de operação, o regime de operação é afetado pela temperatura ambiente e a temperatura interna do refrigerador, a distância pistão/placa é alterada quando o sistema necessita mais ou menos de energia para sua operação. Desta forma, a frequência de ressonância do sistema mecânico varia devido a vários fatores.

Sistema de refrigeração/refrigeradores utilizáveis com os ensinamentos da presente invenção

[0011] Existem basicamente dois tipos de refrigerador: os refrigeradores de classe simples e os refrigeradores com eletrônica embarcada. Além da aplicação em refrigeradores em geral, os ensinamentos da presente invenção podem ser aplicados a sistemas de refrigeração em geral, por exemplo, sistemas de ar condicionado. Neste caso, a única diferença conceitual, reside no fato de que o sistema de ar condicionado é aplicado a uma sala (ou ambiente refrigerado) ao passo que em um refrigerador, o sistema é voltado a

um gabinete fechado.

[0012] De todo modo, os refrigeradores ou sistemas de refrigeração com eletrônica embarcada são dotados de circuitos eletrônicos que têm a capacidade de analisar a temperatura interna do refrigerador e fazer ajustes na capacidade do compressor linear de modo a operá-lo da maneira mais eficiente possível.

[0013] Os refrigeradores ou sistema de refrigeração de classe simples não são providos de eletrônica embarcada, tendo tão somente um circuito que liga e desliga o compressor linear (um termostato "on/off") de tempos em tempos sem, contudo, ter condição de atuar na capacidade do mesmo.

[0014] Apesar de operarem de maneira eficiente, os refrigeradores com eletrônica embarcada evidentemente têm custo mais elevado quando comparados aos refrigeradores de classe simples.

[0015] De acordo com os ensinamentos da presente invenção, é possível dotar um compressor linear com uma eletrônica capaz de ajustar a respectiva capacidade, de acordo com a demanda do sistema de refrigeração mesmo nos casos em que o mesmo será empregado no refrigerador de classe simples. Para tanto, o compressor linear deve ter capacidade de analisar a capacidade de refrigeração necessária para a condição necessária dentro do ambiente de um refrigerador, a partir de medidas feitas na tensão e corrente de alimentação do motor elétrico que impulsiona o compressor linear.

Descrição do estado da técnica

[0016] Uma das formas de se obter uma eficiência melhorada em sistemas, envolvendo compressores lineares é de se aproximar ao máximo o pistão do respectivo final de curso. Exemplos dessas técnicas podem ser encontrados nos documentos US 5.156.005 e US 5.342.176. Nos dois documentos, descreve-se o controle de amplitude

do pistão. Nenhuma dessas técnicas, contudo, prevê o controle da amplitude visando que com compressor linear opera em ressonância, de modo que, com base nos ensinamentos desses documentos, o compressor linear pode operar com baixa eficiência dependendo das condições de carga do mesmo.

[0017] Uma técnica anterior onde se descreve um sistema que monitora o movimento do pistão de um compressor linear é revelada no documento WO 01/54253. De acordo com os ensinamentos deste documento, é previsto um sistema bem como um método aplicável a um compressor linear, de acordo com o qual é previsto a medição de uma primeira onda quadrada obtida através da integração da corrente aplicada ao motor elétrico e uma segunda onda quadrada obtida a partir da tensão aplicada ao motor elétrico. Com base nessas medições, o controle do movimento do pistão é realizado através de um TRIAC com avaliando-se a diferença entre as fases da primeira onda quadrada e a segunda onda quadrada. Com isso, o pistão do compressor linear opera em posição mais próxima da placa de válvulas.

[0018] Este documento WO 01/54253 não aborda o problema do desequilíbrio relacionado efeito "mola gás" e, um dos objetivos da invenção descrita nesse documento de técnica anterior é obter uma maior estabilidade de operação com isso, pode o sistema operar em condições não ideais em termos de eficiência.

[0019] Ademais, um outro inconveniente decorrente da construção proposta no documento WO 01/54253, está no fato de se a monitorar a fase através de ondas quadradas. Tal abordagem resulta que, para obter-se a diferença entre as fases, será necessário o emprego de circuitos eletrônicos ou programas de computador que façam a integração da corrente, que gerem as primeira e segunda ondas quadradas ali descritas, e que calcule a diferença de fase entre a

primeira onda e a segunda onda quadrada. Tal construção, e o processo dali decorrente, apresenta, no entanto, elevado custo de fabricação além de menor confiabilidade por necessitar circuitos para realizar estas conversões o que, por conta do elevado número de componentes envolvidos, reduz a confiabilidade do sistema, visto que cada componente eletrônico adicionado, representa uma probabilidade maior de falha. A opção de se implementar um dispositivo descrito no documento através de um programa de computador, também resulta em elevado custo já que, neste caso, com a abordagem usada, será necessário um microcontrolador excessivamente sofisticado e, portando, de elevado custo.

[0020] Ademais, a aplicação de compressores lineares em sistemas de refrigeração, depende do uso de termostatos eletrônicos capazes de informar ao controle, através de um sinal de comando, qual a capacidade que o compressor linear deve operar, isto torna o sistema complexo e não permite a aplicação do compressor linear em qualquer sistema.

[0021] Outra possibilidade é acionar o compressor linear em uma capacidade fixa e utilizar o termostato convencional (Tipo "On/Off"), isto porém subutiliza os recursos disponíveis no controle.

Objetivos da invenção

[0022] Os objetivos da presente invenção são um motor linear, um compressor linear, um método de controle do mesmo bem como um refrigerador que não tenha a necessidade eletrônica embarcada, mas que ao mesmo tempo tenha a capacidade de ajustar a capacidade em função da demanda, em outras palavras de acordo com os ensinamentos da presente invenção, o refrigerador irá enxergar o compressor linear com eletrônica como se este fosse um compressor linear comum, mantendo-se as características dos refrigeradores de classe simples inalteradas, e transferindo-se toda a eletrônica de

controle para o compressor linear.

[0023] Ademais, é um objetivo da presente invenção um motor linear ressonante que possa operar de maneira controlada no que se refere à amplitude de seu deslocamento, sem que haja necessidade de se fazer uso de um controle eletrônico externo.

[0024] Desta forma, pretende-se:

- Ajustar a capacidade de operação do sistema de refrigeração usando um compressor linear, sem a necessidade de um termostato complexo, permitindo a aplicação do compressor linear em qualquer tipo de sistema.

- Permitir a aplicação do compressor linear em sistemas com termostato convencional (do tipo "on/off"), e ainda permitir o ajuste da capacidade de operação, utilizando assim todo potencial do compressor linear.

- Otimizar o funcionamento do compressor linear, de modo que, o sistema sempre opere na máxima eficiência possível.

- Operar um motor linear ressonante sem que haja necessidade de se usar um circuito externo controlando o seu comportamento, devendo este operar sempre em condições ótimas de funcionamento.

Sumário da invenção

[0025] Como descrito acima, a frequência de ressonância do mecanismo varia em função das pressões e da amplitude de operação do compressor linear. Como as pressões são variáveis e não são controláveis (pelo menos diretamente), em certos instantes o compressor linear pode operar fora da ressonância acarretando na perda de performance. De outro lado, a amplitude de deslocamento ou curso do pistão é uma variável controlável, de modo que de acordo com a presente invenção, é previsto variar/ajustar o curso de operação de forma a minimizar ou zerar a fase entre a corrente e a velocidade

do pistão, de forma a manter o mecanismo em perfeita sintonia e conseqüentemente com o melhor desempenho. Analisando um sistema de refrigeração, percebe-se que a pressão de aspiração do compressor linear sobe quando a porta do refrigerador é aberta ou uma nova carga térmica é adicionada ao sistema. Nesta situação, a estratégia de manter a fase minimizada via variação da amplitude de operação, leva o compressor linear a aumentar o curso, indo ao encontro da necessidade do sistema em retirar o calor adicionado.

[0026] É importante observar que, apesar de se fazer menção à leitura da fase entre a corrente e a velocidade do pistão, deve-se entender que esta fase pode ser obtida lendo-se outros parâmetros como, por exemplo, pode-se substituir a velocidade do pistão pelo deslocamento do pistão que está a 90° entre si, podendo-se usar esta informação para ler a fase usando a posição do pistão como referência, por alguma conveniência construtiva do circuito de controle. Também é possível substituir a velocidade pela força contra-eletromotriz (FCEM) que está em fase, tendo como objetivo medir a fase entre a corrente e a dinâmica do mecanismo (por exemplo, a FCEM). Preferencialmente, se procede com a média de fase da corrente e da fase da FCEM resultando na fase de motor elétrico.

[0027] A FCEM pode ser obtida a partir da fórmula

$$FCEM = k \times \frac{\partial D_p}{\partial t}$$

[0028] onde k é uma constante; ∂D_p é a derivada do deslocamento do pistão; e ∂t é a derivada do tempo.

[0029] Como o movimento do pistão é aproximadamente senoidal, é possível saber quando o deslocamento é máximo, a FCEM está passando por zero. Para detectar esse valor, basta um sensor de proximidade que irá indicar um pico de sinal quando o pistão encontra-

se, por exemplo, próximo ao seu final de curso. Assim, para medir-se a fase da FCEM, mede-se o ponto máximo de deslocamento do pistão.

[0030] No que se refere ao comportamento da ressonância, é sabido que a medida que a amplitude do deslocamento do pistão é elevada, diminui-se a frequência de ressonância do compressor linear, ao passo que, a medida que a carga demandada pelo sistema de refrigeração é maior, a frequência de ressonância também é elevada.

[0031] Tal fenômeno ocorre, pois, à medida que a pressão de sucção aumenta (demandada pelo sistema de refrigeração na válvula de sucção do compressor linear), isso significa que uma carga térmica foi posta dentro do refrigerador. Essa massa mais quente eleva a temperatura e o ambiente interno do sistema de refrigeração, causando a elevação da pressão de evaporação, já que o líquido refrigerante está em um estado de líquido saturado, podendo-se concluir que a pressão e a temperatura estão intrinsecamente interligadas. Assim, o fato de se colocar algo mais quente no refrigerador, irá refletir em um aumento de pressão, aumentando a pressão do gás sobre o pistão, fazendo com que a ressonância do mecanismo diminua causando uma defasagem no compressor linear.

[0032] Na prática isso significa que ao acrescentar calor no interior do refrigerador, a carga do sistema sobe fazendo com que a frequência de ressonância do sistema suba, devendo-se aumentar o curso do pistão, resultando na queda da frequência de ressonância já que a excursão do pistão é maior. Nesse caso, aquela diferença que a frequência de ressonância subiu em função da carga adicionada ao sistema, pode-se fazer com que o sistema volte a operar na frequência anterior (ou a de ressonância) aumentando-se o deslocamento do pistão, trazendo se o conjunto a operar em frequência de ressonância.

[0033] Por outro lado, uma diminuição da carga do sistema (alimento congelado, diminuição da temperatura ambiente), leva a um

aumento da fase do sistema, podendo tornar a fase positiva, podendo compensar com uma diminuição da capacidade do sistema até a fase atingir o valor de zero.

[0034] Desta maneira, a medida que a defasagem é positiva, deve-se decrementar a capacidade do refrigerador para que o sistema volte a operar em ressonância e, quando a defasagem for negativa, deve-se incrementar a capacidade do compressor linear para que o sistema volte a operar em ressonância.

[0035] Um dos objetivos da presente invenção é alcançado através de motor linear, tendo uma amplitude de deslocamento que é controlada através da tensão elétrica controlada a partir da unidade de processamento, para que conjunto ressonante dinamicamente mantenha-se em ressonância no decorrer das variações da carga.

[0036] Ainda, um outro dos objetivos da presente invenção é alcançado através de um compressor linear, aplicável a um sistema de refrigeração, o compressor linear compreendendo um pistão acionado por um motor elétrico, o pistão tendo uma amplitude de deslocamento controlada a partir de uma tensão elétrica controlada, a tensão elétrica controlada tendo uma frequência de tensão aplicada ao motor elétrico e ajustada por uma unidade de processamento, a amplitude de deslocamento do pistão é dinamicamente controlada em função de uma demanda variável do sistema de refrigeração, o compressor linear tendo uma frequência de ressonância, a unidade processamento ajustando a amplitude de deslocamento do pistão para que o compressor linear dinamicamente mantenha-se em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração.

[0037] Os objetivos da presente invenção são também alcançados através de um método de controle de um compressor linear, o compressor linear compreendendo um pistão acionado por um motor elétrico, o pistão tendo uma amplitude de deslocamento controlada a

partir de uma tensão elétrica controlada, a tensão elétrica controlada tendo uma frequência de tensão aplicada ao motor elétrico e ajustada por uma unidade de processamento, o método compreendendo etapas de monitorar a amplitude de deslocamento do pistão ao longo da operação do compressor linear, dinamicamente ajustar a amplitude de deslocamento em função de uma variação de demanda do compressor linear, para que o compressor linear mantenha-se em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração.

[0038] Ainda, os objetivos da presente invenção são alcançados através de um método de controle de um compressor linear, que compreende etapas de medir uma fase de alimentação da corrente de alimentação e uma fase dinâmica do pistão do compressor linear, e medir a diferença entre a fase de alimentação de corrente e a fase dinâmica e estabelecendo uma fase medida, e dinamicamente ajustar a amplitude de deslocamento em função de uma variação de demanda do compressor linear, para que o compressor linear mantenha-se em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração.

[0039] Os ensinamentos da presente invenção são ainda traduzidos através de um sistema de refrigeração compreendendo um compressor linear, o sistema de refrigeração compreendendo um termostato liga/desliga acionando o compressor linear, o compressor linear compreendendo um pistão acionado por um motor elétrico, o pistão tendo uma amplitude de deslocamento controlada a partir de uma tensão elétrica controlada, a tensão elétrica controlada tendo uma frequência de tensão aplicada ao motor elétrico e ajustada por uma unidade de processamento, a amplitude de deslocamento do pistão sendo dinamicamente controlada em função de uma demanda variável do sistema de refrigeração durante o período onde o termostato liga o compressor linear, o compressor linear tendo uma frequência de

ressonância, a unidade processamento ajustando a amplitude de deslocamento do pistão para que o compressor linear dinamicamente mantenha-se em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração.

Descrição resumida dos desenhos

[0040] A presente invenção será, a seguir, mais detalhadamente descrita com base em um exemplo de execução representado nos desenhos. As Figuras mostram:

Figura 1 - é uma vista esquemática de um compressor linear;

Figura 2 - é um diagrama de sistema de controle, do compressor linear, e do sistema de refrigeração objeto da presente invenção;

Figura 3 - é um diagrama de blocos do sistema de controle, do compressor linear e sistema de refrigeração, ilustrando o uso com um termostato convencional;

Figura 4 - é um diagrama de blocos do sistema de controle, objeto da presente invenção;

Figura 5 - é um diagrama de blocos do algoritmo de controle automático de capacidade aplicável ao compressor linear e sistema de refrigeração objetos da presente invenção;

Figura 6 - representa uma curva da carga do motor elétrico em função da fase;

Figura 7 - representa uma curva da capacidade do motor elétrico em função da fase para várias cargas;

Figura 8 - é um diagrama temporal ilustrando as formas de onda de tensão da rede, força contra-eletromotriz (FCEM), corrente do motor elétrico, posição do pistão e sinal do sensor na situação onde o compressor linear está operando na ressonância ($\phi_{PC} = \phi_P - \phi_C = 0$);

Figura 9 - é um diagrama temporal ilustrando as formas de

onda de tensão da rede, força contra-eletromotriz (FCEM), corrente do motor elétrico, posição do pistão e sinal do sensor na situação onde o compressor linear está operando acima da ressonância ($\phi_{PC} = \phi_P \cdot \phi_C > 0$);

Figura 10 – é um diagrama temporal ilustrando as formas de onda de tensão da rede, força contra-eletromotriz (FCEM), corrente do motor elétrico, posição do pistão e sinal do sensor na situação onde o compressor linear está operando abaixo da ressonância ($\phi_{PC} = \phi_P \cdot \phi_C < 0$);

Figura 11 – é um fluxograma do método de controle de compressor linear da presente invenção;

Figura 12 – representa uma curva da carga do motor elétrico em função da fase, quando se emprega os ensinamentos da presente invenção, de acordo com uma segunda concretização preferencial;

Figura 13 – representa uma curva da capacidade do motor elétrico em função da fase para várias cargas quando se emprega os ensinamentos da presente invenção, de acordo com uma segunda concretização preferencial; e

Figura 14 – representa um fluxograma do método de controle de compressor linear, de acordo com uma segunda concretização da presente invenção.

Descrição detalhada das Figuras

[0041] Conforme pode ser visto, a Figura 2 ilustra um sistema compreendendo um refrigerador com a eletrônica embarcada. Neste caso, um termostato eletrônico 25 integrado ao sistema de refrigeração 20 e fornece um sinal de referência para a unidade de processamento 22. A unidade de processamento 22, por sua vez, controla o compressor linear 100 recebendo um sinal do sensor SS correspondente ao deslocamento do pistão 1.

Controles eletrônicos

[0042] A Figura 3 ilustra um sistema de refrigeração 20 aplicado a um refrigerador de classe simples. Conforme pode ser visto, neste caso, o sistema de refrigeração 20 fornece apenas um sinal que liga e desliga a unidade de processamento 22. Desta maneira, o sistema de refrigeração 20 pode dispensar qualquer eletrônica que é prevista nos refrigeradores/sistemas de refrigeração que compreendem eletrônica embarcada. Ademais, com esta construção, a unidade de processamento 22 poderá ser integrada junto ao compressor linear 100 (vide indicação 31) que pode ser fornecido para diversos fabricantes de refrigeradores/sistema de refrigeração 20 resultando em um equipamento e elevada flexibilidade quando comparado aos equipamentos do estado da técnica. Um sensor de proximidade 30 associado à unidade de processamento 22 irá fornecer a posição do pistão 1 quando este último se aproxima do respectivo final de curso. Na prática, pequenas variações no curso do pistão 1 correspondem a grandes variações na capacidade do compressor linear de modo que, a título de exemplo, para um curso máximo de 8,5 mm (máxima capacidade) o curso mínimo seria em torno de 6,5 mm (capacidade próxima de 0), ou seja, em torno de 2 mm de faixa de variação de curso para a capacidade variar de 0 até o máximo.

[0043] A Figura 4 ilustra um detalhamento da unidade de processamento 22. Conforme pode ser visto, a unidade de processamento 22 compreende um micro controlador 40 que controla um TRIAC 41 através de um *gate* 42. O microcontrolador 40 recebe os sinais de uma detecção de zero da tensão ZT de rede V_{AC} assim como o sinal de zero da corrente ZC na saída do TRIAC 41. Um sinal de referência de deslocamento REF pode ser fornecido pelo refrigerador caso se use um refrigerador com eletrônica embarcada. O sinal primordial para o presente invento refere-se a sinal de deslocamento

DP que é obtido a partir do sinal SS do sensor de proximidade 30 e que deve ser tratado por exemplo, segundo os ensinamentos do documento de patente PI0301969-1 cujo descritivo é aqui incorporado por referência. Opcionalmente, pode-se obter o valor da corrente de alimentação i_A em um momento distinto do ZC, devendo-se para tanto, fazer os ajustes necessários para que se tenha as medidas corretas.

Algoritmo de controle

[0044] A Figura 5 ilustra o algoritmo de acordo com uma primeira concretização da presente invenção para a obtenção da tensão controlada V_M que deve ser aplicada ao motor linear 10 para que se possa manter o compressor linear 100 em ressonância. Conforme pode ser visto, para se calcular o valor da tensão controlada V_M , é previsto o cálculo de uma fase medida ϕ_{PC} que é obtida a partir da diferença entre a fase dinâmica ϕ_P e a fase de alimentação ϕ_C de corrente:

$$\phi_{PC} = \phi_P - \phi_C$$

[0045] O cálculo da fase da corrente, ou fase alimentação ϕ_C é feito a partir do zero da corrente ZC e a partir do zero da tensão ZT, enquanto que o cálculo da fase do deslocamento do pistão 1 ou fase dinâmica ϕ_P é feito a partir do sinal de deslocamento DP do pistão 1 e a partir do zero da tensão ZT.

[0046] Ainda com relação à obtenção da fase de alimentação ϕ_C a corrente de alimentação i_A pode eventualmente não ter uma passagem por zero, o que possibilitaria captar um momento predefinido para estabelecer o zero da corrente ZC. Isso pode ser observado, por exemplo, nas Figuras 8, 9 e 10, onde a corrente de alimentação i_A permanece por um certo período em zero, devendo-se nesse caso, considerar o momento predefinido como o ponto médio da citada

permanência da corrente de alimentação i_A em zero.

[0047] A partir dos valores da fase dinâmica ϕ_P e da fase de alimentação ϕ_C , pode-se obter o valor da fase medida ϕ_{PC} e obter o valor de referência do máximo deslocamento do pistão DP_{REF} (deslocamento que se pretende atingir uma posição física definida). Este valor pode ser obtido através do algoritmo da Figura 11.

[0048] Uma vez obtido o valor de referência do máximo deslocamento do pistão DP_{REF} basta que se subtraia dele o valor máximo de deslocamento do pistão DP_{MAX} através de equação:

$$E_{DP} = DP_{REF} - DP_{MAX}$$

[0049] para que se obtenha o valor do erro E_{DP} entre deslocamento de referência do máximo deslocamento do pistão DP_{REF} e o máximo de deslocamento do pistão DP_{MAX} .

[0050] A partir desse resultado, é possível obter o valor de uma tensão de controle V_P já que o valor desta é função do erro E_{DP} . Essa relação pode ser observada a partir do fluxograma da Figura 11. Ali pode-se trocar incrementar capacidade por incrementar DP_{REF} , e decrementar capacidade, por decrementar DP_{REF} . Alternativamente, também pode-se usar, por exemplo, um método tradicional como um algoritmo PID para alterar DP_{REF} , nesse caso o cálculo seria feito a partir da seguinte equação:

$$DP_{REF} = K_P \times \phi_{PC} + K_D \times \left(\frac{\partial \phi_{PC}}{\partial T} \right) + K_I \times \int \phi_{PC} \times \partial T$$

[0051] Onde K_P é uma constante proporcional, K_D é uma constante derivativa e K_I é uma constante Integral, conforme é sabido da nomenclatura clássica em controle

[0052] Ainda pode-se incrementar ou decrementar diretamente o

valor da tensão de controle V_P , já que este valor é função de ϕ_{PC} . Nesse caso, no fluxograma da Figura 11, pode-se trocar incrementar capacidade por incrementar V_P e decrementar capacidade por decrementar V_P , de modo que nessa opção também pode-se usar algum método tradicional como um algoritmo PID para alterar V_P a partir de ϕ_{PC} usando-se a seguinte equação:

$$V_P = K_P \times \phi_{PC} + K_D \times \left(\frac{\partial \phi_{PC}}{\partial t} \right) + K_I \times \int \phi_{PC} \times \partial t$$

[0053] As constantes sendo as mesmas descritas anteriormente.

[0054] A partir do valor da tensão de controle V_P é possível ajustar a tensão controlada V_M calculando-se o ângulo de disparo do TRIAC.

[0055] Conforme o gráfico das Figuras 6 e 7, aumentos da carga do sistema (aumento da temperatura ambiente, aumento da carga térmica no sistema), levam a uma diminuição da fase do sistema. Se este aumento na carga for grande (vide linha tracejada com indicação de "carga máxima" na Figura 7) a fase irá para valores negativos, isto pode ser compensado por um aumento na capacidade do sistema (aumento do curso do pistão 1), que irá incrementar a fase, de modo que incrementos sucessivos da capacidade levam a fase até o valor zero, isto é, o sistema estará operando na ressonância. De maneira equivalente, uma diminuição da carga (vide linha tracejada com indicação de "carga mínima" na Figura 7) a fase irá para valores positivos, podendo-se compensar tal variação através de um decremento da fase, de modo que decrementos sucessivos, levam o valor da fase até zero, isto é, o sistema estará operando em ressonância.

[0056] No que se refere a forma de se realizar o incremento e o decremento da fase, deve-se prever a leitura da fase de alimentação

ϕ_C e fase dinâmica ϕ_P a cada ciclo ou semi-ciclo, logo, sempre que a fase medida ϕ_{PC} for diferente de zero, o sistema de controle deverá atuar no deslocamento do pistão 1, podendo a leitura da fase dinâmica ϕ_{PC} ser feita segundo os ensinamentos do documento de patente PI0300010-9 que é aqui incorporado por referência.

[0057] A amplitude dos decrementos deve levar em consideração a reação do sistema em resposta ao incremento/decremento provocado pelo sistema de controle. Assim, se o valor do incremento/decremento for grande, será necessário um tempo de estabilização maior, no caso contrário o tempo de estabilização será menor. Tipicamente o tempo de estabilização depende das constantes de tempo do compressor e do sistema de refrigeração. A título de exemplo, pode-se optar por aguardar um tempo predeterminado, por exemplo de cerca de 10 a 60 segundos, ou monitorar a fase do sistema até que esta permaneça constante.

[0058] Opcionalmente, também é possível utilizar valores de incremento/decremento variáveis. Nesse caso, se a fase medida ϕ_{PC} for grande, pode-se usar incrementos/decrementos maiores, e diminuir este valor à medida que o valor da fase medida ϕ_{PC} aproxima-se do zero. Nesse caso, pode-se optar como referência um valor de 1% de incremento/decremento.

[0059] A Figura 8 ilustra um diagrama temporal ilustrando as formas de onda de tensão da rede V_{AC} da força contra-eletromotriz (FCEM), da corrente i_A do motor linear 10 da posição do pistão DP e do sinal do sensor de proximidade (sensor não-mostrado) na situação onde o compressor linear 100 está operando na ressonância, isto é, quando $\phi_{PC} = \phi_P - \phi_C = 0$.

[0060] Conforme pode ser visto, na situação de ressonância, o deslocamento do pistão 1 é máximo quando a corrente de alimentação i_A do motor linear 10 passa por zero, momento este em que sensor de

proximidade mostra um sinal mensurável (vide indicação 80). Nessa condição, o compressor linear 100 opera em condição ótima já que o nesse caso a corrente de alimentação i_A passa por zero no momento em que o pistão 1 está mudando de sentido em sua trajetória, ou seja, passando por um momento de máximo deslocamento quando não há a necessidade de aplicação de força no mesmo já quando o pistão 1 está na metade de seu deslocamento (vide indicação 82) a corrente de alimentação i_A e a FCEM são máximas impulsionando o pistão 1 de maneira mais eficiente possível.

[0061] Na Figura 9 pode se observar que o compressor linear 100 está operando acima da ressonância, ou seja, a FCEM está atrasada em relação à corrente de alimentação i_A do motor linear 10. Neste caso, a equação é $\phi_{PC} = \phi_P - \phi_C > 0$, devendo-se incrementar a capacidade do compressor linear 100 através da elevação da tensão controlada V_M . Pode ser notado que nesta situação quando o pistão 1 está em máximo deslocamento de sua trajetória, momento em que não deveria se aplicar corrente de alimentação i_A ao motor linear 10, a corrente de alimentação i_A já tem um valor significativo nesse momento. Seguindo com a mesma situação de defasagem, no momento em que o pistão 1 está na metade de sua trajetória (vide indicação 90), momento em que deveria se aplicar a máxima de corrente de alimentação i_A ao motor linear 10, a corrente de alimentação i_A já sofreu um decréscimo em seu nível, de modo que nas duas situações há um desperdício de energia e, portanto, uma eficiência reduzida na operação do compressor linear 100 como um todo.

[0062] A partir da Figura 10, é possível observar que o compressor linear e está operando abaixo da ressonância e estando, neste caso, a FCEM adiantada em relação à corrente de alimentação i_A do motor linear 10, ficando nesse caso a equação $\phi_{PC} = \phi_P - \phi_C < 0$, devendo-se

nesse caso incrementar a capacidade do compressor linear 100 para que o sistema volte a operar em ressonância.

[0063] Conforme pode ser visto, nessa situação há um atraso das fases, fazendo com que o compressor linear também opere com baixa eficácia já que no momento em que o deslocamento do pistão 1 é máximo, situação em que não deveria se aplicar corrente de alimentação i_A ao motor linear 10, observa-se que a corrente de alimentação i_A não é nula. Além disso, no momento em que o pistão 1 está na metade do deslocamento (vide indicação 101), momento em que deveria ser aplicado um máximo de corrente de alimentação i_A ao motor linear 10, a corrente de alimentação i_A não é máxima de modo que nesse caso também o compressor linear 100 tem sua eficiência reduzida.

Aplicação em compressores lineares

[0064] Estruturalmente, o compressor linear 100 e o sistema de controle de compressor linear 100 compreendem as seguintes características:

[0065] O compressor linear 100 compreende o pistão 1 e é acionado pelo motor linear 10 provocando uma amplitude de deslocamento que será controlada a partir da tensão elétrica controlada V_M , tendo essa tensão elétrica controlada V_M uma frequência de tensão f_p . A amplitude de deslocamento do pistão 1 é dinamicamente controlada em função da demanda variável do sistema de refrigeração 20 a partir da unidade de processamento 22 que ajusta a amplitude de deslocamento do pistão 1 para que o compressor linear 100 dinamicamente se mantenha em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração 20, ou seja, tenha a sua amplitude de deslocamento ajustada ao longo das variações decorrentes das variações de carga demandadas pelo sistema de refrigeração 20 impulsionando o compressor linear para operar em

ressonância. O sistema de controle do compressor linear 100 quando tomado isoladamente, deverá ser aplicável ao compressor linear de modo a fazer o ajuste dinâmico da amplitude de deslocamento para que o compressor linear opere em ressonância.

Aplicação em sistemas de refrigeração

[0066] O sistema de refrigeração 20 que pode incluir um refrigerador ou um sistema de ar condicionado e sistemas análogos conforme já comentado, deve compreender um termostato liga/desliga acionando o compressor linear 100, de modo que a amplitude de deslocamento do pistão 1 seja dinamicamente controlada em função da demanda variável do sistema de refrigeração 20 durante o período onde o termostato ligar o compressor linear, devendo a unidade de processamento 22 dinamicamente ajustar a amplitude de deslocamento do pistão 1 para que o compressor linear se mantenha em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração 20.

[0067] Para controlar o compressor linear 100, o sistema de controle e o sistema de refrigeração 20 objetos da presente invenção, é previsto um método de controle do compressor linear 100 que segue o fluxograma ilustrado na Figura 11.

[0068] O controle da amplitude de deslocamento do pistão 1 é feito a partir de uma tensão elétrica controlada V_M que é ajustada pela unidade de processamento 22. Para se ajustar o nível da tensão controlada V_M , pode-se optar por proceder, por exemplo, segundo os ensinamentos do documento PI9907432-0 que é aqui incorporado por referência.

Aplicação em motores lineares

[0069] Tendo em vista que com controle utilizável em compressores lineares em geral pode-se fazer uso dos ensinamentos da presente invenção em um motor linear 10 aplicado a outros tipos de utilização.

Nesse caso, um atuador (não-mostrado) tem a mesma função do pistão 1 utilizado no compressor 100, isto é, o atuador recebe a força gerada no estator 411 e movimentando a carga e formando um conjunto ressoante que terá uma frequência de ressonância.

[0070] De maneira análoga àquela prevista no controle de compressor linear 100, o atuador tem uma amplitude de deslocamento que será controlada através da tensão elétrica controlada V_M a partir da unidade de processamento 22 para que conjunto ressonante dinamicamente se mantenha em ressonância no decorrer das variações da carga.

[0071] O controle do motor linear 10 pode também ser feito a partir da unidade de processamento 22 que mede a fase de alimentação ϕ_c da corrente de alimentação i_A e a fase dinâmica ϕ_P , nesse caso do atuador e não do pistão, e ajusta a tensão elétrica controlada V_M para que o valor da fase medida ϕ_{PC} seja nulo.

[0072] Também pode-se controlar o motor linear 10 utilizando um inversor de frequência variável que deverá ser dinamicamente ajustando a frequência de tensão f_{VM} da tensão elétrica controlada V_M para um valor igual ao valor da frequência de ressonância do conjunto ressonante à medida que ocorrerem variações de carga.

Método de controle por ajuste de fase

[0073] Para executar o método de controle a unidade de processamento 22 monitora a amplitude de deslocamento do pistão 1 ao longo da operação do compressor linear 100 e dinamicamente ajusta a amplitude de deslocamento em função de uma variação de demanda do compressor linear 100, para que o compressor linear 100 se mantenha em ressonância no decorrer das variações de demanda do sistema de refrigeração 20.

[0074] Para impelir o compressor linear 100 para operar em ressonância mede-se a fase de alimentação ϕ_c de uma corrente de

alimentação i_A e a fase dinâmica ϕ_P do pistão 1 do compressor linear 100 e mede-se a diferença entre as fases medidas para se estabelecer a fase medida ϕ_{PC} .

[0075] Após a etapa de estabelecimento da fase medida ϕ_{PC} deve-se incrementar a amplitude de deslocamento do pistão 1 quando o valor da fase medida ϕ_{PC} for positivo ou uma etapa de decrementar a amplitude de deslocamento do pistão 1 quando o valor da fase medida ϕ_{PC} for negativo, devendo-se sempre incrementar ou decrementar o deslocamento do pistão 1 a um valor necessário para que a fase medida ϕ_{PC} seja nula.

[0076] Preferencialmente, após a etapa de incremento ou decremento da amplitude de deslocamento do pistão 1, deve-se aguardar o transcorrer de um tempo de estabilização antes que se volte a medir a diferença entre a fase de alimentação ϕ_C e a fase dinâmica ϕ_P .

Método de controle por ajuste de frequência fase

[0077] De acordo com uma segunda concretização preferencial da presente invenção, uma outra forma de se controlar o compressor a operar sempre em ressonância, é controlar a frequência aplicada ao motor.

[0078] Nesse caso o controle é feito a partir da frequência variável, utilizando-se um inversor de frequência variável (não-mostrado). Deste modo, quando houver uma mudança na carga aplicada ao compressor linear 100, também irá refletir em uma mudança na fase dinâmica ϕ_P do sistema, o que será detectado pelo sistema controle objeto da presente invenção, para que se altere a frequência para que o compressor opere na frequência de ressonância. Tal controle é feito dinamicamente ajustando-se, a partir do inversor de frequência variável, a frequência de tensão f_{VP} para um valor igual ao valor da frequência de ressonância do compressor linear 100 à medida que

ocorrerem variações de demanda do sistema de refrigeração 20.

[0079] As formas de se proceder com este tipo de ajuste, podem incluir, por exemplo, variar a frequência de modo a minimizar a corrente de alimentação ou ainda variar a frequência de modo a zerar a fase entre corrente e a FCEM.

[0080] Conforme pode ser visto nas Figuras 12 e 13, pode-se observar que quando a carga aumenta, a frequência do compressor linear 100 aumenta devendo-se incrementar a respectiva capacidade para que o sistema opere em ressonância e vice-versa, quando a carga diminuir, isto é, o sistema deverá aumentar o curso/capacidade do pistão 1/compressor 100 e quando a frequência diminuir, o sistema de controle deverá diminuir o curso/capacidade. Da mesma maneira como ocorre na primeira concretização preferencial da presente invenção, é possível conseguir operar o sistema de refrigeração com um termostato simples do tipo "On/Off", mantendo o mesmo conceito de ajuste de curso do pistão 1 (capacidade do compressor 100) pela variação da frequência.

[0081] Neste sentido, pode-se observar que o conceito básico entre a primeira concretização da presente invenção e a segunda concretização, é similar, isto é, observar o efeito da mudança da carga aplicada no compressor sobre a frequência de ressonância, e com está informação alterar o curso do pistão (capacidade do compressor).

[0082] Como método de controle nessa concretização, pode-se proceder conforme o fluxograma ilustrado na Figura 14 e seguindo-se as seguintes etapas:

[0083] Medir a frequência de alimentação do motor linear 10, que é a frequência de tensão f_{VP} , para em seguida fazer a comparação desta medida com um valor de uma frequência de referência FR, que usualmente é de 50 ou 60 Hz.

[0084] Nessa etapa de comparação, se a frequência de tensão f_{VP}

for maior que a frequência de referência FR, deve-se incrementar a capacidade do compressor linear 100. Se a frequência de tensão f_{VP} for menor que a frequência de referência FR, deve-se decrementar a capacidade do compressor linear 100.

[0085] Uma vez corrigida a capacidade através do incremento ou decremento, deve-se aguardar por um tempo de estabilização a exemplo do que é feito de acordo com a primeira concretização da presente invenção.

[0086] Para que estes métodos da primeira e segunda concretizações funcionem da melhor condição possível para o sistema, é necessário que o compressor linear 100 seja projetado para operar na ressonância, quando o sistema estiver estabilizado e em baixa capacidade (nesta condição o sistema deverá operar 80% do tempo), assim, quando uma maior capacidade for necessária o algoritmo irá incrementar a capacidade do compressor linear 100.

[0087] Outra habilidade que o algoritmo deve possuir é a função de congelamento máximo (rápido). Em um "freezer" quando esta função é ativada, o compressor linear 100 funcionará por 24 horas sem ciclar, em sistemas com capacidade variável o compressor linear deve funcionar na capacidade máxima independente da carga ou da temperatura interna. Para realizar esta função o algoritmo pode medir o tempo de ciclo, caso este tempo seja superior a uma referência (por exemplo 2 horas), o algoritmo irá para capacidade máxima independente da condição de fase, só voltando a operar normalmente quando o sistema ciclar ou quando passarem as 24 horas.

As vantagens da solução proposta são as seguintes:

- Permite a aplicação do compressor linear em sistemas simples, equipados com termostatos convencionais e utilizar as vantagens da variação de capacidade.

- Reduz custos do sistema de refrigeração 20

- Otimiza o funcionamento do compressor linear (o compressor linear sempre trabalha na eficiência máxima)
 - Desempenho do compressor linear é melhorado
 - Existe uma correção da capacidade de bombeamento do compressor linear adequada à necessidade do sistema de refrigeração
- 20.

[0088] Tendo sido descritos exemplos de concretização preferidos, 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. Compressor linear (100), aplicável a um sistema de refrigeração (20), o compressor linear (100) compreendendo um pistão (1) acionado por um motor linear (10),

o pistão (1) tendo uma amplitude de deslocamento controlada a partir de uma tensão elétrica controlada (V_M), a tensão elétrica controlada (V_M) gerando uma corrente de alimentação (i_A) circulante no motor linear (10) e tendo uma frequência de tensão (f_{VM}) aplicada ao motor linear (10) e ajustada por uma unidade de processamento (22),

a unidade de processamento (22) é configurada para dinamicamente controlar a amplitude de deslocamento do pistão (1) em função de uma demanda variável do sistema de refrigeração (20), o compressor linear (100) tendo uma frequência de ressonância,

o compressor linear (100) sendo caracterizado pelo fato de que a unidade de processamento (22) é configurada para medir uma fase de alimentação (ϕ_c) da corrente de alimentação (i_A) e uma fase dinâmica (ϕ_p) do pistão (1) do compressor linear (100),

a unidade de processamento (22) ainda sendo configurada para medir uma diferença entre a fase de alimentação (ϕ_c) e a fase dinâmica (ϕ_p) e estabelecer uma fase medida (ϕ_{PC}), a unidade de processamento (22) ajustando a tensão elétrica controlada (V_M) para que o valor da fase medida (ϕ_{PC}) seja nulo.

2. Compressor linear de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a tensão elétrica controlada (V_M) é decrementada quando o valor da fase medida (ϕ_{PC}) for positivo e incrementado quando a fase medida (ϕ_{PC}) for negativa.

3. Compressor linear de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a fase de alimentação (ϕ_c) é obtida a partir de um momento predefinido da corrente de alimentação (i_A).

4. Compressor linear de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o momento predefinido da corrente de alimentação (i_A) é a passagem da corrente de alimentação (i_A) por zero.

5. Compressor linear de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que de que o momento predefinido é obtido no ponto médio da permanência da corrente de alimentação (i_A) em zero.

6. Compressor linear de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que a fase dinâmica (ϕ_P) é obtida a partir de um sinal de deslocamento (DP) do pistão (1).

7. Compressor linear de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que o valor da fase dinâmica (ϕ_P) é obtido através de um sensor de deslocamento (30) eletricamente associado à unidade de processamento (22).

8. Compressor linear de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que o valor da fase dinâmica (ϕ_P) é obtido a partir da posição de deslocamento (DP) do pistão (1).

9. Método de controle de um compressor linear (100), o compressor linear (100) compreendendo um pistão (1) acionado por um motor linear (10),

o pistão (1) tendo uma amplitude de deslocamento controlada a partir de uma tensão elétrica controlada (V_M), a tensão elétrica controlada (V_M) tendo uma frequência de tensão (f_{VM}) aplicada ao motor linear (10) e ajustada por uma unidade de processamento (22),

a tensão elétrica controlada (V_M) gerando uma corrente de alimentação (i_A) circulante no motor linear (10),

o método sendo caracterizado pelo fato de que compreende etapas de:

medir uma fase de alimentação (ϕ_c) da corrente de alimentação (i_A) e uma fase dinâmica (ϕ_P) do pistão (1) do compressor linear (100),

medir a diferença entre a fase de alimentação (ϕ_c) e a fase dinâmica (ϕ_P) e estabelecer uma fase medida (ϕ_{PC}), e

dinamicamente ajustar a amplitude de deslocamento em função de uma variação de demanda do compressor linear (100), de maneira que o valor da fase medida (ϕ_{PC}) seja nulo.

10. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que após a etapa de estabelecimento da fase medida (ϕ_{PC}), é prevista uma etapa de incrementar a amplitude de deslocamento do pistão (1) quando o valor da fase medida (ϕ_{PC}) for positivo ou uma etapa de decrementar a amplitude de deslocamento do pistão (1) quando o valor da fase medida (ϕ_{PC}) for negativo.

11. Método de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que após a etapa de incremento ou decremento da amplitude de deslocamento do pistão (1), é prevista uma etapa de aguardar o transcorrer de um tempo de estabilização.

12. Método de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que após o transcorrer do tempo de estabilização, é prevista uma nova medição da diferença entre a fase de alimentação (ϕ_c) e a fase dinâmica (ϕ_P).

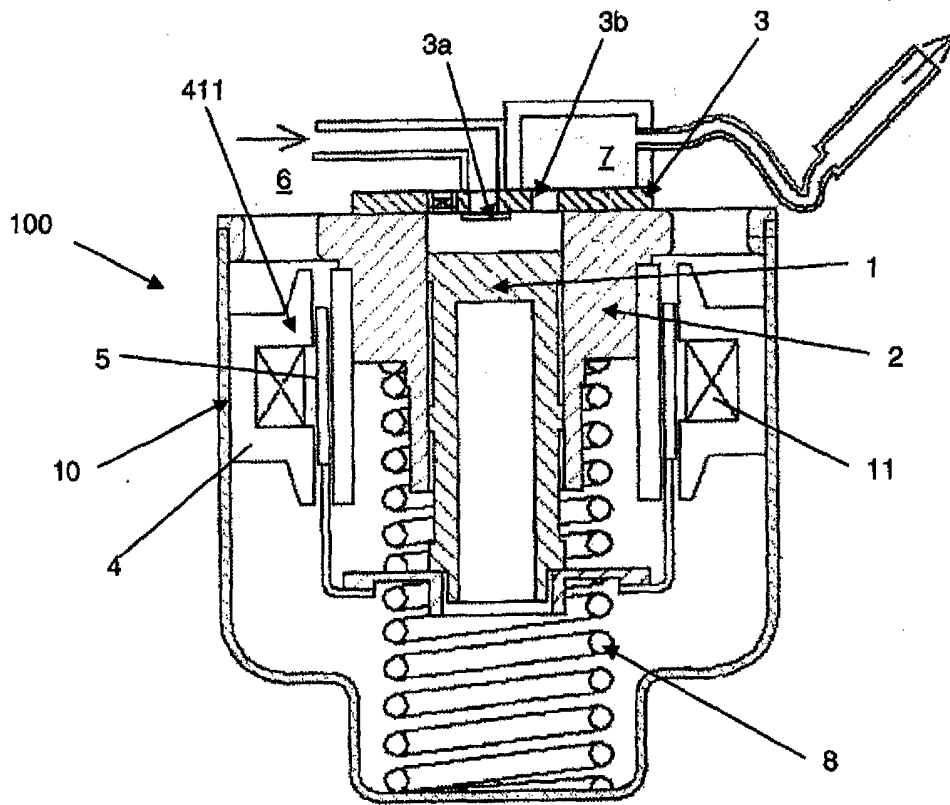


FIG. 1

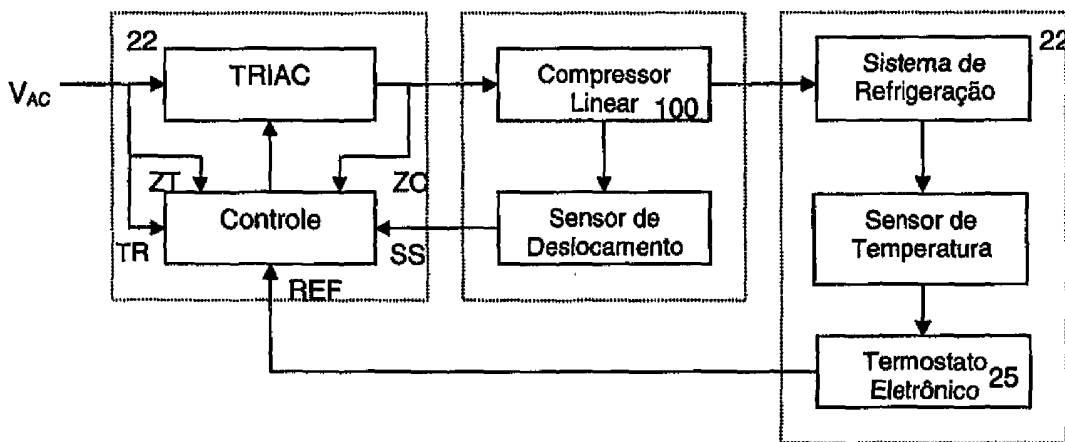


FIG. 2

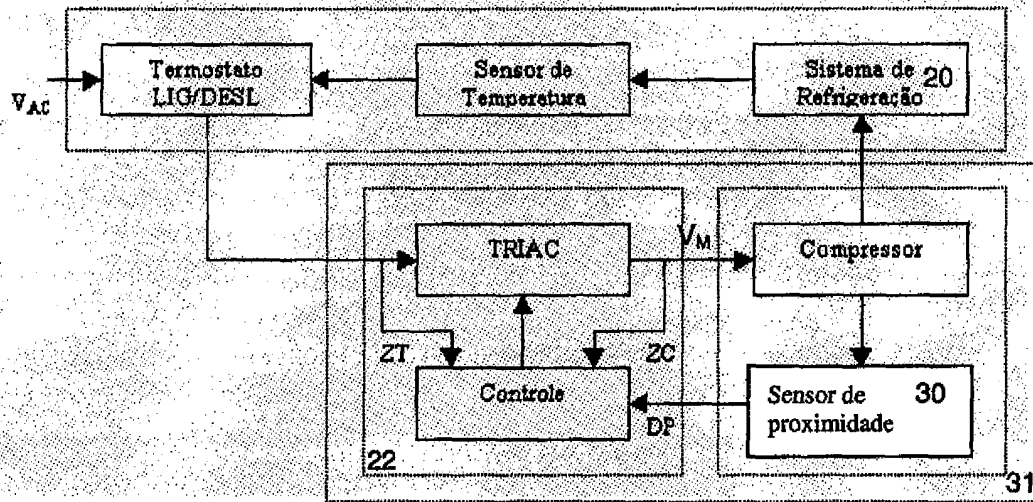


FIG. 3

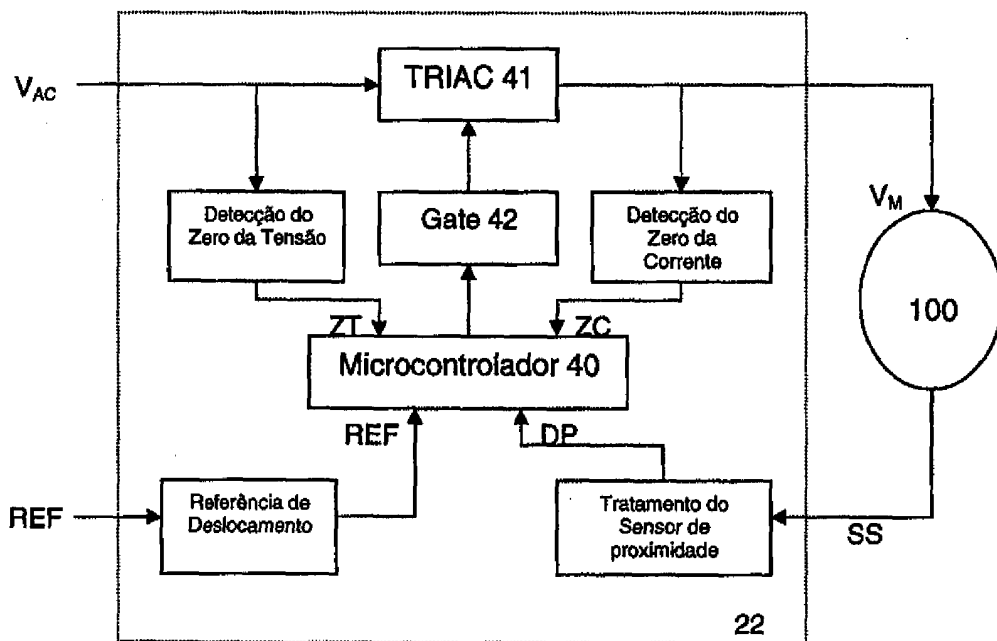


FIG. 4

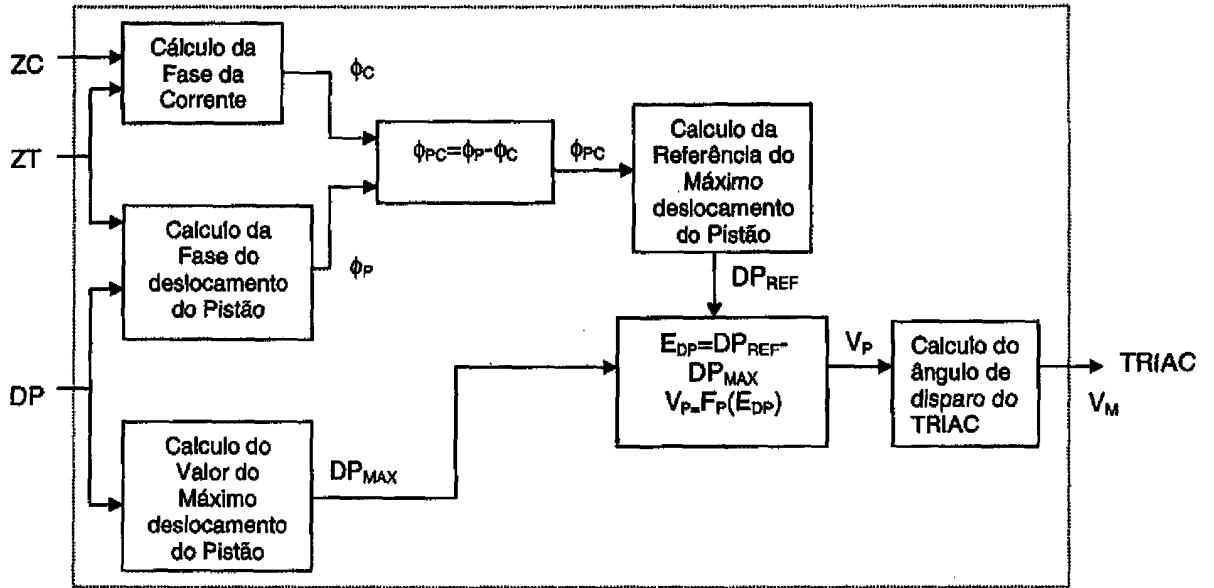


FIG. 5

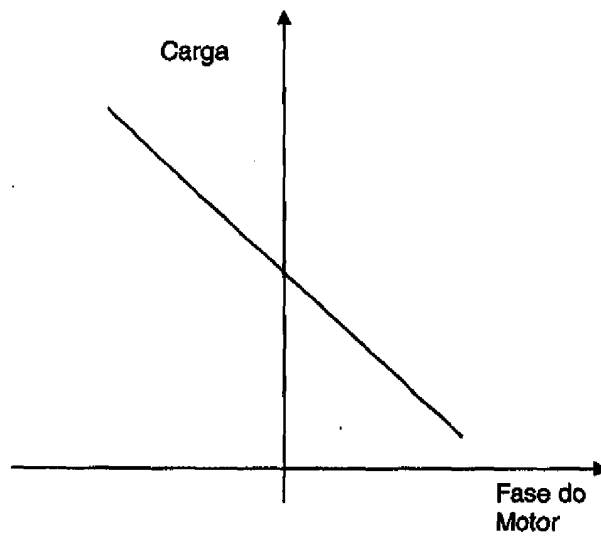


FIG. 6

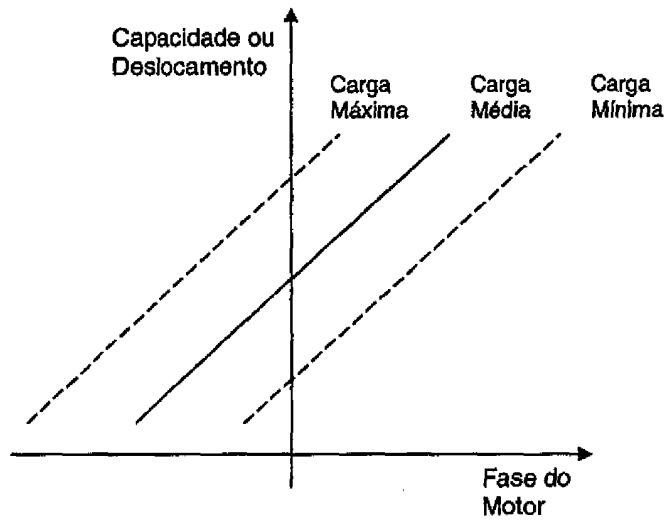


FIG. 7

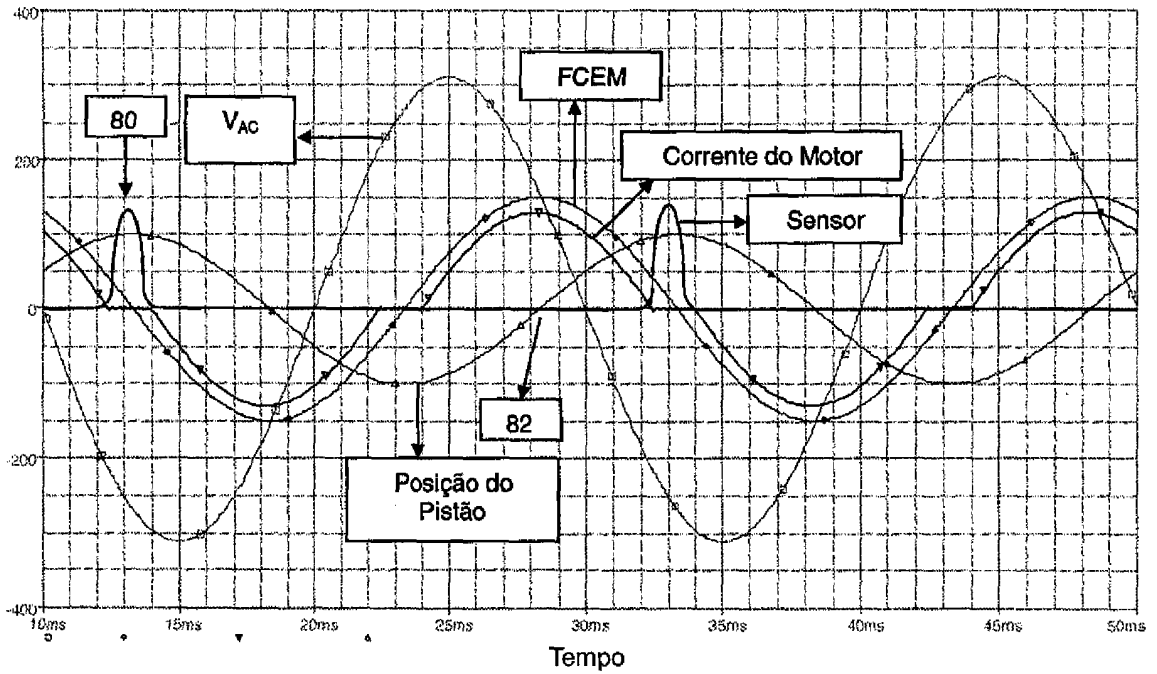
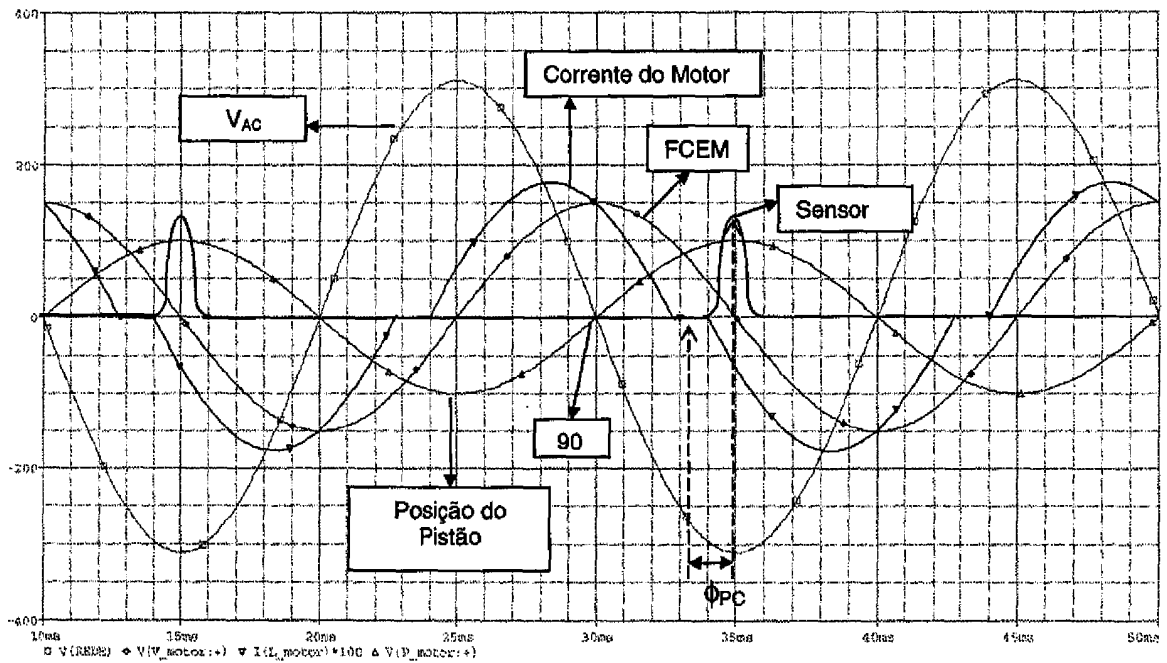


FIG. 8



Tempo
FIG. 9

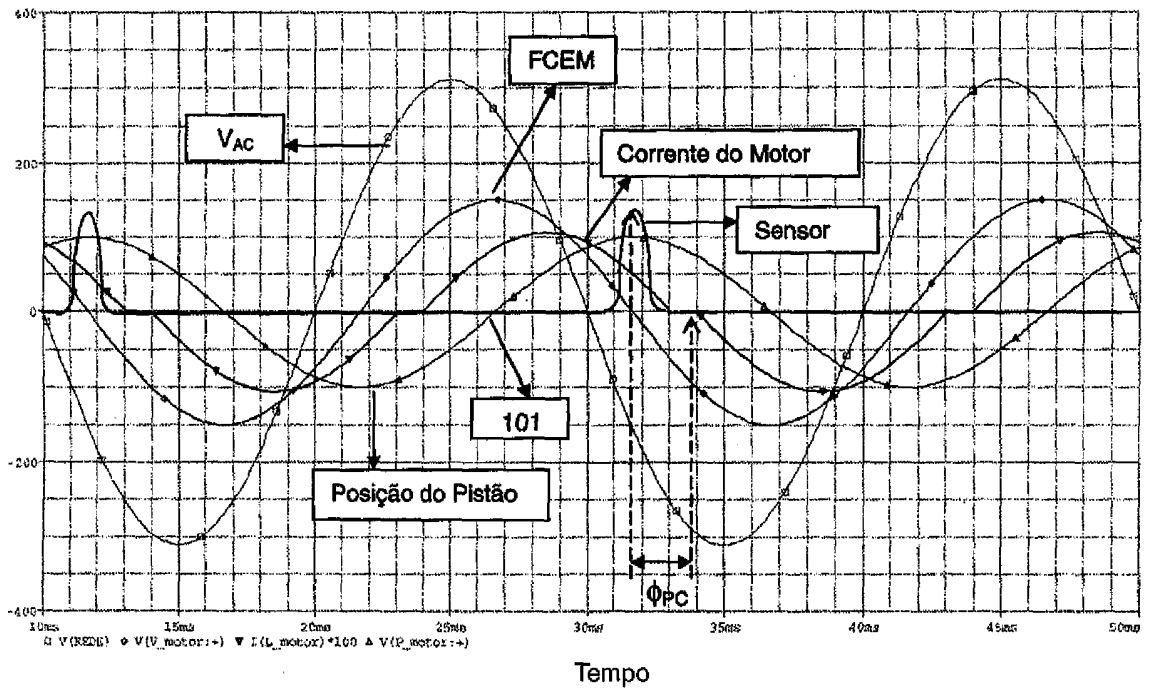


FIG. 10

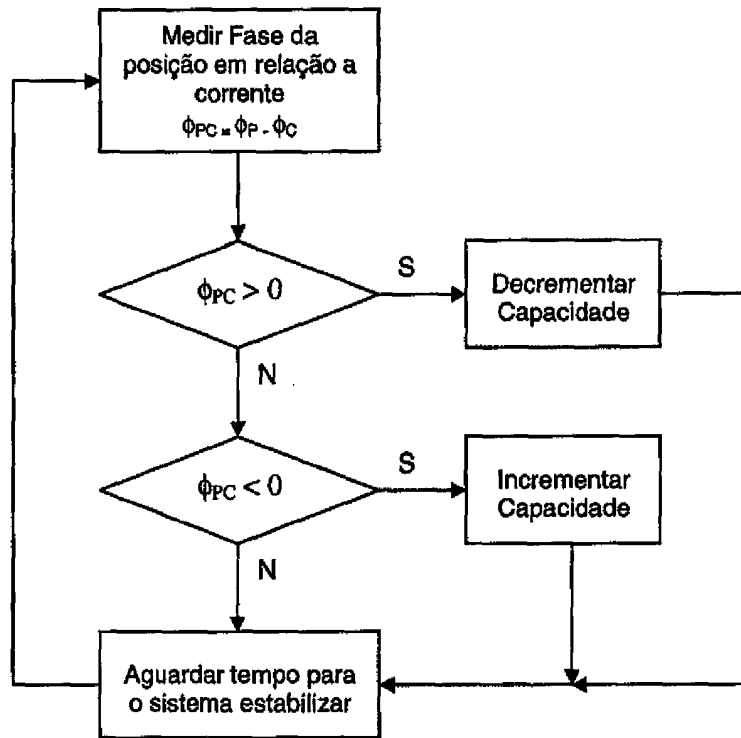


FIG. 11

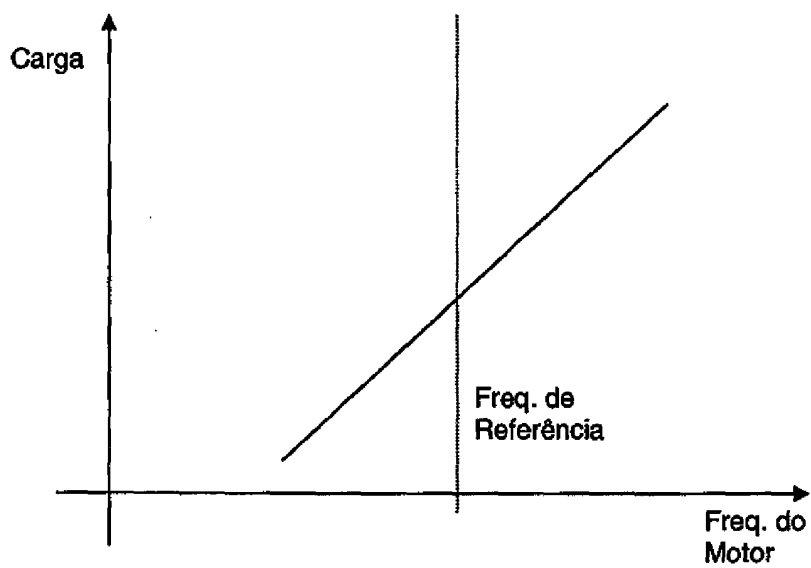


FIG. 12

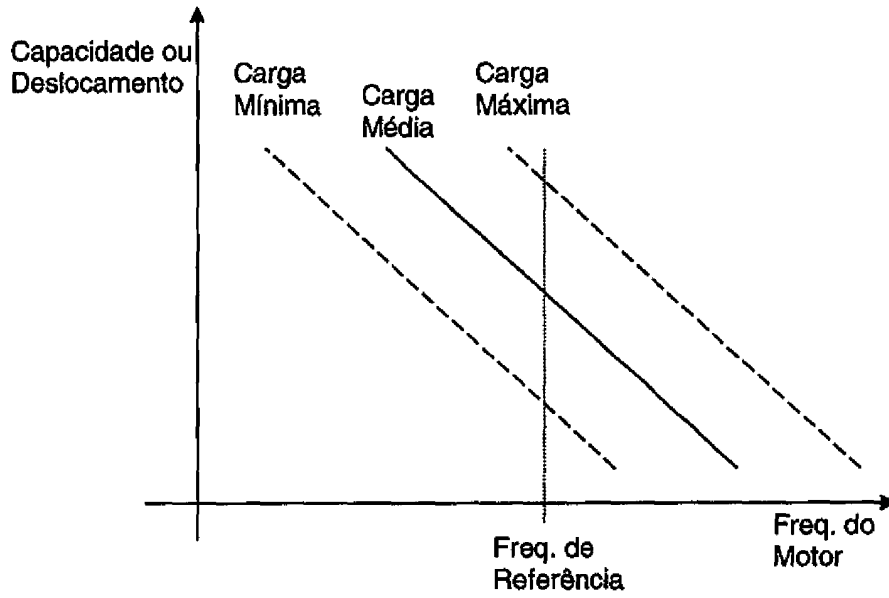


FIG. 13

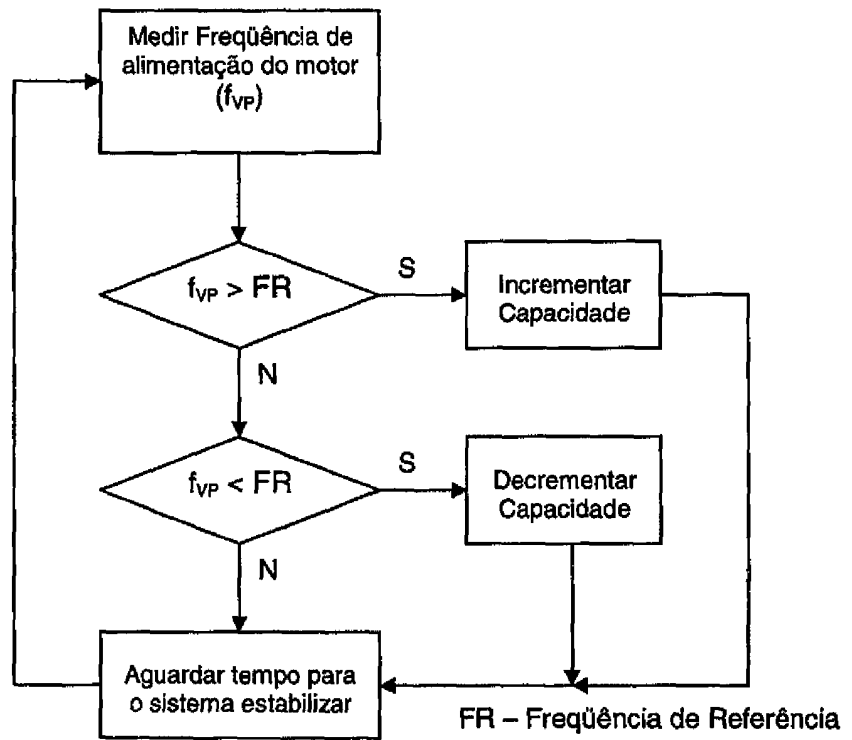


FIG. 14