

PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UMA VÁLVULA ELETROMAGNÉTICA BIESTÁVEL

Silva, Jorge Alberto

Gohara, Kyosuke

CTM-SP - Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - CEP 05598-900 - São Paulo - SP - Brasil

RESUMO

O conceito de Dispositivo Eletromagnético Biestável já é conhecido e pesquisado há alguns anos, neste tipo de dispositivo busca-se utilizar o fluxo criado por ímãs permanentes para criar duas posições estáveis para uma parte móvel (cursor) sem que seja necessário a inclusão de um elemento mecânico de restauração (mola). Este tipo de dispositivo apresenta a característica de permanecer no último estado para o qual foi acionado indefinidamente até que nova excitação seja aplicada, portanto fugindo ao conceito usual de "normalmente aberto" ou "normalmente fechado".

Com os recentes avanços na área de materiais magnéticos visando obter novos ímãs permanentes com características de: Densidade de Fluxo Remanente e Campo Coercitivo elevados (Ímãs Permanentes de Alta Energia), novas concepções de projeto de Dispositivos Eletromagnéticos Biestáveis tornaram-se viáveis.

Neste trabalho será apresentada uma Válvula Eletromagnética Biestável, desenvolvida nos últimos anos no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTM-SP). Este desenvolvimento visava chegar a uma válvula com capacidade de desempenhar a função de válvula de bloqueio, liberando ou bloqueando a passagem de um fluido, com baixo consumo de energia, dimensões reduzidas e alta confiabilidade.

O desenvolvimento do projeto eletromagnético foi feito utilizando o programa ANSYS nas suas versões 5.0A e 5.1. Os cálculos de força e o mapeamento de fluxo o qual possibilita verificar o estado de saturação do circuito magnético, permitiram a redução de: dimensões, peso, quantidade de ímãs e custos de fabricação, sem comprometer o desempenho da válvula.

1. INTRODUÇÃO

Conforme já foi citado a idéia de utilizar a biestabilidade obtida através do fluxo gerado por ímãs permanentes em dispositivos atuadores de força não é nova, e encontramos referências a estas aplicações em algumas literaturas [1], [2], [3]. Contudo as configurações apresentadas usualmente utilizam o ímã na parte móvel, o que faz com que o dispositivo perca em robustez, uma vez que os materiais destes ímãs permanentes de alta energia como: Sm_1Co_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ e Nd.Fe.B. , são compactados e sinterizados, não sendo portanto resistentes a choques mecânicos.

A configuração aqui proposta preserva o ímã na parte estática do dispositivo, e pode ser aplicada na sua forma bidimensional, como mostrado na Figura 1, ou ainda na sua forma análoga axisimétrica, como foi aplicada no desenvolvimento da Válvula Eletromagnética Biestável que será apresentada.

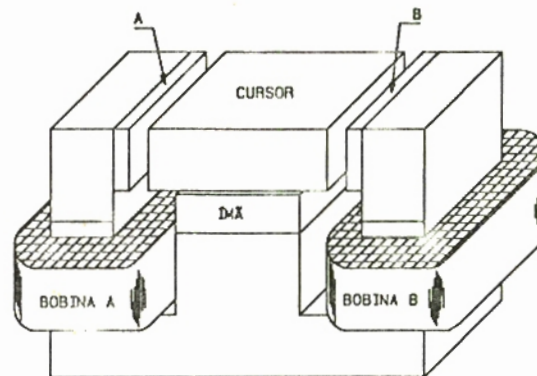


Figura 1



4886

Antes de apresentar a válvula propriamente dita, é interessante utilizar a configuração bidimensional apresentada na Figura 1, para melhor explicar o princípio de funcionamento dos Dispositivos Eletromagnéticos Biestáveis (D.E.B.).

A posição na qual o cursor do D.E.B. é mostrado na Figura 1, centrado em relação aos batentes "A" e "B", é instável, pois se este for deslocado ligeiramente para a esquerda ou direita, completará o movimento indo parar no batente A ou B, de acordo com o sentido para o qual foi deslocado.

Para entender o funcionamento do D.E.B. imagine-se o cursor posicionado encostado no batente A, esta é uma posição estável quiescente, visto que o fluxo oriundo do ímã permanente, ϕ_m , divide-se basicamente em duas parcelas ϕ_{m_a} e ϕ_{m_b} que concatenam com os lados A e B respectivamente. Como o entreferro A é menor que o entreferro B, apenas limitado pelo batente A, pode-se concluir que a força de atração sobre o cursor para o lado A é maior que a força de atração para o lado B, e portanto o cursor permanece na posição A, conforme mostrado na Figura 2a, sem necessidade de introdução de energia externa.

Ao circular corrente nas bobinas A e B no sentido mostrado na Figura 2a, observa-se que o fluxo criado pela bobina A, ϕ_{bob_a} , opõe-se a parcela do fluxo de magneto que concatena com o lado A, ϕ_{m_a} , e no lado B ocorre o inverso com o fluxo criado pela bobina B, ϕ_{bob_b} , somando-se ao fluxo ϕ_{m_b} , com isto o fluxo resultante no entreferro B cresce, ultrapassando o valor do fluxo resultante em A, que decresce, ato contínuo o cursor desloca-se para o lado B pois a força de atração sobre o cursor para este lado é maior que para o lado A, fazendo com que o cursor desloque-se até parar no batente B, ficando nesta posição mesmo após a interrupção de corrente nas bobinas. Esta é a segunda posição estável quiescente do dispositivo, mostrada na Figura 2b, e a sua estabilidade pode ser explicada da mesma forma utilizada para a posição anterior.

Ao circular corrente nas bobinas A e B no sentido oposto ao aplicado anteriormente, como mostra a Figura 2b, observa-se fenômeno transitório, semelhante ao descrito anteriormente, com a oposição de fluxos ocorrendo no lado B e a soma de fluxos no lado A, com o conseqüente deslocamento do cursor para o lado A.

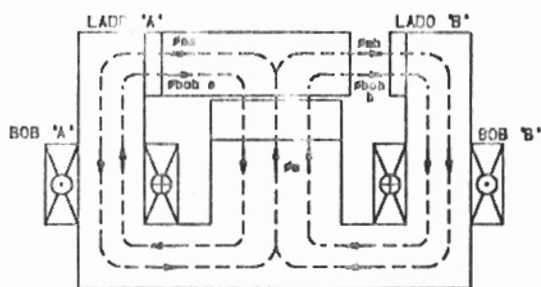


Figura 2a

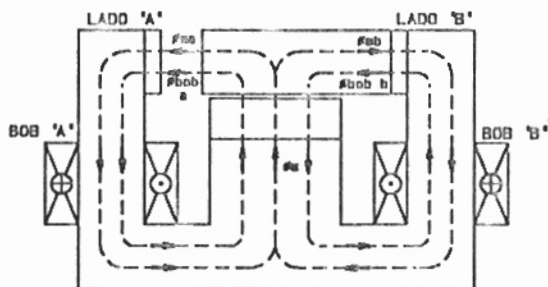


Figura 2b

2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA VÁLVULA ELETROMAGNÉTICA BIESTÁVEL

Para possibilitar uma melhor apresentação da configuração utilizada na Válvula Eletromagnética Biestável é mostrado na Figura 3 uma vista desta em corte axial, sendo que esta vista a caracteriza plenamente visto que a válvula possui a forma axisimétrica.

A parte externa que envolve as bobinas, magnetos e o próprio corpo da válvula é o circuito magnético estático, que é comumente chamado de armadura e é fabricado em aço 1020. O êmbolo, que é a parte móvel, encontra-se dentro do corpo da válvula e está representado bipartido, com cada parte representando as suas duas posições estáveis, ou seja: fechada (B1) ou aberta (B2). O êmbolo também é feito em aço 1020, com uma camada protetora de níquel.

Ainda na Figura 3 pode-se observar as bobinas (C1 e C2) e o corpo da válvula (D) este fabricado em aço 304L que é um aço austenítico e portanto sua permeabilidade magnética é igual a do ar.

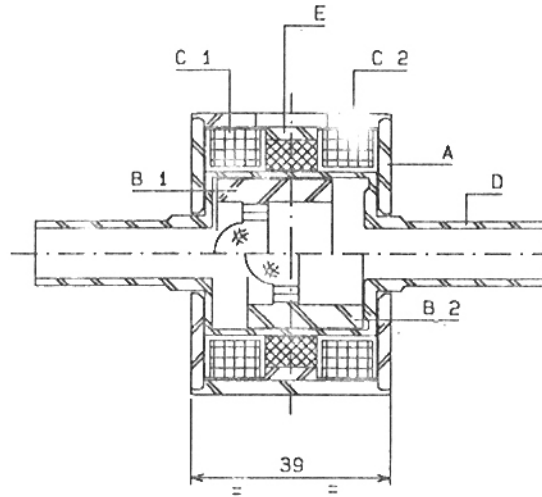


Figura 3

O magneto é a única parte que não é uma figura axisimétrica propriamente dita. Nas versões iniciais pensou-se em utilizar um ímã radial (axisimétrico), mas as dificuldades de fabricação deste e o preço elevado para a sua aquisição levaram a busca de uma solução mais simples e barata.

O magneto (E) na realidade é uma composição de magnetos na forma de paralelepípedos, montados sobre um anel de 1020 que será justaposto na armadura (A), conforme mostra a Figura 4.

A montagem dos magnetos neste anel de 1020, Figura 4, é simples pois busca-se um espaçamento aproximadamente igual entre estes, e o fato de se repelirem um a um faz com que busquem esta posição, podendo ser resinados e formarem então o "magneto axisimétrico" da válvula.

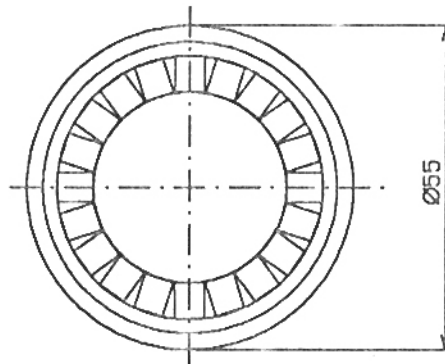


Figura 4

O número de magnetos que compõem este "magneto axisimétrico", depende do diâmetro do anel de 1020 e a soma das seções transversais destes é proporcional ao fluxo criado determinando a força de retenção nas posições estáveis. Esta força também é diretamente proporcional a Densidade de Fluxo Remanente do material dos magnetos.

3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DO MODELO DA VÁLVULA

Para possibilitar um perfeito modelamento da válvula, bem como de qualquer dispositivo eletromagnético, alguns tópicos merecem atenção, a saber:

- Identificação das regiões que compõe o modelo.
- Obtenção das características magnéticas dos materiais utilizados nas diversas partes.
- Escolha do tipo de elemento a ser utilizado no modelo.
- Identificação das condições de contorno e simetrias/anti-simetrias se houverem.
- Estratégia de criação do modelo, visando obter uma malha que atenda os requisitos intrínsecos a uma boa Análise Eletromagnética, ou seja: malha refinada e composta de elementos quadrilaterais em regiões de elevado gradiente de campo magnético, nas regiões "entreferro" é necessário que haja multi-camadas de elementos, etc.

O modelo que será analisado, feitas as devidas simplificações é o apresentado na Figura 5.

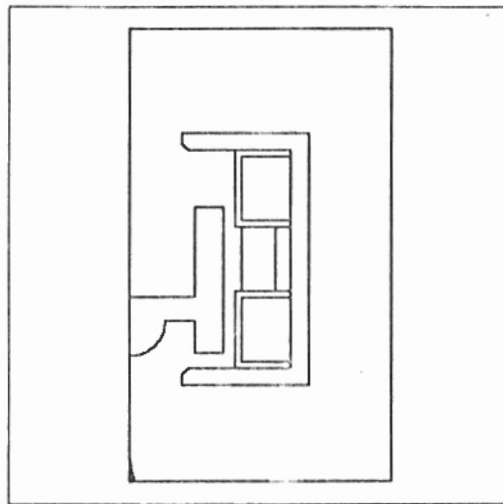


Figura 5

Os materiais utilizados são dois: Sm_1Co_5 dos ímãs e o aço 1020 da armadura do êmbolo.

As pastilhas de Sm_1Co_5 (Samário Cobalto) foram ensaiadas e obtidas as seguintes características:

$$\begin{aligned} B_n &= 0,84 \text{ T} \\ H_c &= 607,7 \text{ kA/m} \\ \mu_r &= 1,1 \end{aligned}$$

O ar e o aço 304L, que também compõe o modelo, não são materiais magnéticos e portanto possuem $\mu_r = 1$.

O aço 1020 também foi ensaiado e levantado a sua curva B x H, visto ser um material não linear. Sua curva pode ser observada na Figura 6.

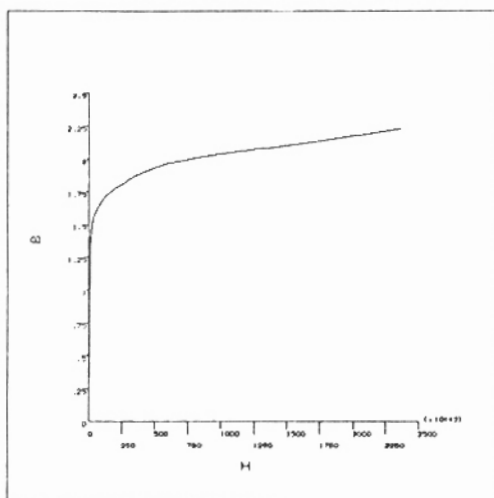


Figura 6

Quanto ao tipo de elemento a ser utilizado, a opção foi o PLANE 53 que é composto por elementos de segunda ordem, seguindo-se a opção de modelo axisimétrico Keyopt(3)=1. Neste ponto faz-se necessário esclarecer que devido ao "magneto axisimétrico", que é uma composição de pastilhas de magnetos, não ser exatamente uma figura axisimétrica como já apresentado, foram feitas considerações a cerca do fluxo disperso entre as pastilhas de magnetos de forma a obter-se um magneto axisimétrico equivalente para o modelo. Estas considerações e como estas afetaram as características do magneto utilizado no modelo serão apresentados no próximo item.

Relativo as condições de contorno, observa-se que as linhas externas a região de análise delimitam o possível alcance das linhas de fluxo originadas dentro do modelo, e portanto, não deve haver nenhuma linha que ultrapasse esta fronteira, fato que traduz-se pela imposição do Vetor Potencial Magnético igual a zero. O eixo de axisimetria (Y) não é uma linha de fronteira mas sabe-se antecipadamente que nenhuma linha de fluxo poderá cruzar esta linha, devido as características de modelo axisimétrico, fato que caracteriza esta linha como possuindo Vetor Potencial Magnético constante, como esta linha encontra-se em seus extremos com as linhas de fronteira conclui-se que também esta possui o Vetor Potencial Magnético igual a zero.

Para facilitar a geração de uma malha regular e com maior refinamento nas regiões desejadas, o modelo mostrado na Figura 5 foi subdividido em áreas quase sempre quadrilaterais, como mostrada na Figura 7, também foi utilizado o artifício de concatenar as linhas que formam estas áreas, sempre que necessário, de forma a gerar uma malha composta por elementos preponderantemente quadrilaterais.

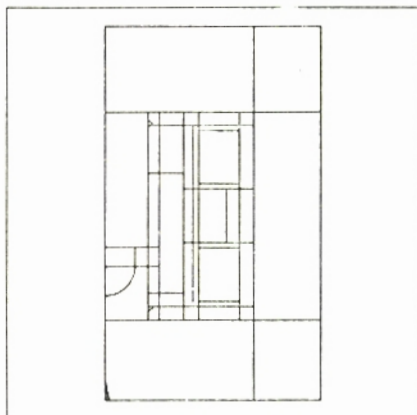


Figura 7

A cada área do modelo é atribuído o material que compõe e as linhas que formam cada área é atribuído um número de divisões, de acordo com a necessidade que as características do modelo exigem.

A malha obtida para a análise da válvula, na situação fechada, é mostrada na Figura 8 em duas partes, sendo que uma mostra a malha nas regiões da armadura e êmbolo e a outra as demais regiões, esta separação visa somente uma melhor visualização da malha gerada.



Figura 8

4. O MAGNETO AXISIMÉTRICO

Conforme já foi citado o magneto utilizado não é exatamente axisimétrico mas sim composto por 20 pastilhas, conforme mostra a Figura 4. Para permitir a análise axisimétrica deste modelo, dois efeitos devem ser considerados para obter a característica do magneto axisimétrico equivalente:

1. A área efetiva de magnetos que gera o fluxo magnético é igual a soma das áreas das 20 pastilhas.
2. Uma parcela do fluxo magnético gerado pelos magnetos é dispersa na região entre as pastilhas.

O primeiro efeito é facilmente superado pela aplicação de um fator de redução da área, dado por:

$$K_s = \frac{(\text{n}^\circ \text{ de pastilhas}) \times (\text{área da pastilha})}{(\text{área total axisimétrica "média"})}$$

Para o caso da válvula o valor encontrado para o fator de redução da área do magneto foi $K_s = 0,827$.

O segundo efeito é caracterizado pela existência de uma relutância em paralelo as pastilhas de magnetos e que drena uma parcela do fluxo magnético gerado pelas pastilhas.

Este fluxo disperso entre as pastilhas, não pode ser avaliado na análise axisimétrica, e portanto deve ser quantificado ou aplicando fórmulas analíticas ou com uma análise bidimensional por elementos finitos da seção transversal do magneto axisimétrico composto pelas pastilhas.

Na realidade só é necessário modelar um segmento do anel correspondente a uma pastilha, que torna o modelo bastante simples. Este modelo foi criado, processado e o resultado do mapeamento das linhas de fluxo é apresentado na Figura 9.

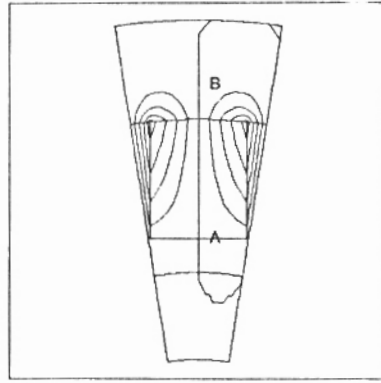


Figura 9

Para obter o valor da relutância de dispersão R_d , necessita-se conhecer o fluxo total concatenando pelo magneto e qual a força magnetomotriz que o magneto está aplicando ao circuito. O fluxo magnético total é facilmente obtido com o uso dos comandos LPATH e FLUXV acessíveis no menu "MAGNETICS CALCS". O valor encontrado foi de $9,315 \cdot 10^{-6}$ Wb.

Quanto a força magnetomotriz do magneto, é necessário que seja feita uma integração sobre um caminho, definido no sentido "Y" sobre o magneto (Figura 9), partindo do centro da base do magneto até o centro da face encostada no anel de aço 1020, pontos "A" e "B" da Figura 9. Com este procedimento busca-se obter a capa de corrente equivalente da pastilha, ou seja

$$N.I = \int_A^B H_y \cdot dy$$

Isto pode ser feito utilizando os comandos do menu "PATH OPERATIONS" e obter o resultado através de gráfico, conforme mostrado na Figura 10, ou em forma de lista que totaliza os valores. Observe-se que foram feitas duas integrações sobre o caminho, com a componente "Hy" e com "Hsum", apenas para comprovar a preponderância da componente "Hy". O resultado das duas integrações coincidiram.

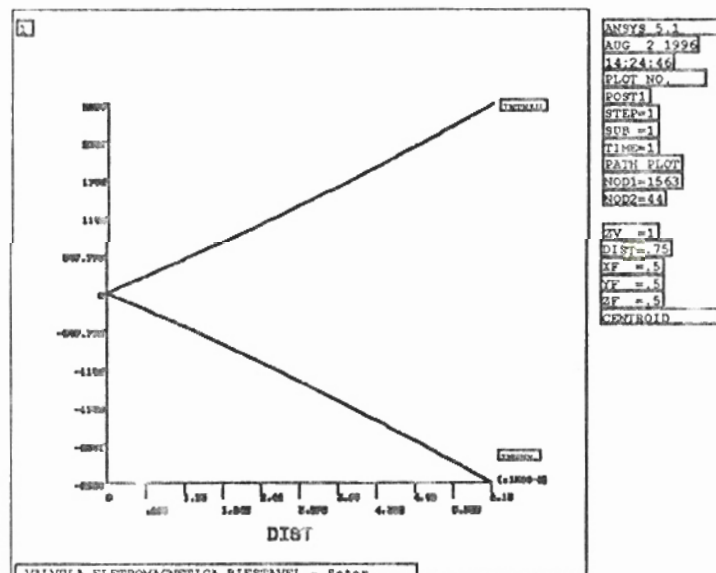


Figura 10

O valor encontrado foi de 2990 A.

De onde chegou-se ao valor da relutância de dispersão vista por cada pastilha

$$Rd' = \frac{2990}{9,315 \cdot 10^{-6}} = 321 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

Como o ímã axisimétrico é composto por 20 pastilhas a relutância de dispersão total será:

$$Rd = \frac{Rd'}{20} = 16,05 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

Para calcular o fator de dispersão que deverá afetar a característica do magneto é necessário quantificar a relutância equivalente do circuito quando utiliza-se o modelo axisimétrico, que é a análise para a qual foi criado o modelo, sendo que nesta primeira análise para quantificar a relutância do modelo axisimétrico o valor da densidade de fluxo remanente do magneto utilizado é o próprio valor encontrado no ensaio da pastilha de Samário Cobalto sem correção, assim como foi feito na análise da relutância de dispersão.

Após a análise e seguindo o procedimento já descrito anteriormente, chegou-se aos seguintes valores:

$$\text{Força magnetomotriz} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1485,8 \text{ A}$$

$$\text{Fluxo Magnético} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 6,40 \cdot 10^{-4} \text{ wb}$$

De onde obtém-se o valor da relutância, que será chamada de Relutância Principal.

$$Rp = \frac{1485,8}{6,40 \cdot 10^{-4}} = 2,32 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

Chega-se então no valor da relutância equivalente a associação da relutância principal em paralelo com a relutância de dispersão.

$$Req = \frac{Rp \cdot Rd}{(Rp + Rd)} = 2,03 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

E finalmente calcula-se o valor do fator de dispersão, que é dado pela relação entre a Relutância Equivalente e a Relutância Principal.

$$Kd = \frac{Req}{Rp} = 0,875$$

De posse destes fatores (Kd e Ks) pode-se calcular a característica (Br) do magneto axisimétrico equivalente, que será utilizado no modelo, ou seja:

$$Br_{\text{modelo}} = Kd \cdot Ks \cdot Br_{\text{ensaiado}} = 0,608 \text{ T}$$

Na realidade o programa exige para caracterizar um magneto: a permeabilidade relativa e o campo coercitivo.

$$\begin{aligned} MUXX &= \mu r = 1,1 \\ MGXX &= \frac{Br_{\text{modelo}}}{(\mu r \cdot \mu_0)} = 440 \text{ KA/m.} \end{aligned}$$

Devido a posição do magneto no modelo a componente MGYX é nula, pois a direção de magnetização do magneto é a do eixo "X".

5. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DO MODELO

Utilizando as técnicas apresentadas nos dois últimos itens, foi concluído o modelo. Sendo que na realidade foram necessárias duas versões, uma com o êmbolo na posição fechada, o qual foi apresentado nas figuras vistas até este ponto, e outra versão com o êmbolo na posição aberta.

Os dois casos foram processados no "SOLVER" utilizando o critério de convergência por segmento de corrente, que avalia passo a passo o balanço com o vetor de carga.

Os resultados do mapeamento de fluxo obtido para as duas posições estão apresentadas nas Figuras 11a e 11b.

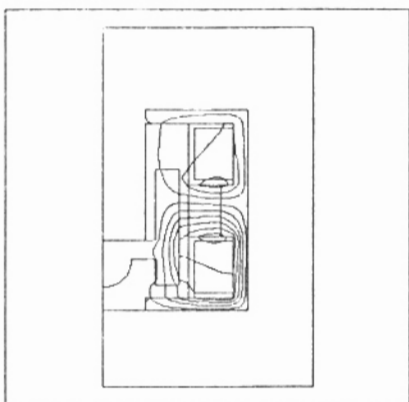


Figura 11a

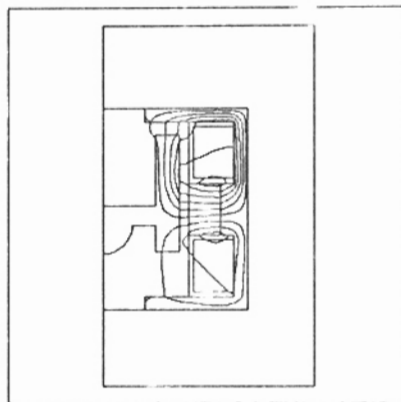


Figura 11b

As forças encontradas foram de:

$$F_{aberta} = + 16,3 \text{ N.}$$

$$F_{fechada} = - 17,5 \text{ N.}$$

A diferença deve-se a não simetria entre as extremidades do êmbolo e uma pequena diferença entre os dois entreferros (2,5 mm - fechada e 2,6 mm - aberta).

Outras situações que devem ser analisadas, pois auxiliam a obtenção de características da válvula e da fonte que deverá acionar a válvula para que esta mude de estado, são:

- Válvula fechada, acionada para abrir.
- Válvula aberta, acionada para fechar.

Para modelar estas situações são utilizados os mesmos modelos já apresentados na Figura 10, apenas aplicando valores de densidade de corrente as bobinas (B1 e B2 da Figura 3), sendo que o sinal da densidade de corrente aplicada será invertido de um caso para o outro, como já foi explicado nas Figuras 2a e 2b.

O valor do módulo da densidade de corrente foi excursionado até que para cada caso fosse obtido forças com inversão de sinal em relação ao seu estado quiescente, que caracteriza o início do processo transitório de mudança de estado.

Os resultados assim obtidos estão mostrados na tabela a seguir:

F.M.M. (por bobina) (A.esp.)	FORÇA "Fy" (N.)	
	VÁLVULA ABERTA ACIONADA PARA FECHAR	VÁLVULA FECHADA ACIONADA PARA ABRIR
0	+ 16.3	- 17.5
100	+ 10,0	- 11,2
200	+ 4.0	- 5.1
300	- 1.7	+ 0.6
400	- 7.0	+ 6.0
600	- 16.8	+ 15.8
800	- 25.3	+ 24.4

Tabela 1

Na Figura 12 é mostrado, como exemplo, o resultado do mapeamento de fluxo para a situação de válvula fechada acionada para abrir (com F.M.M. = 600 A.esp).

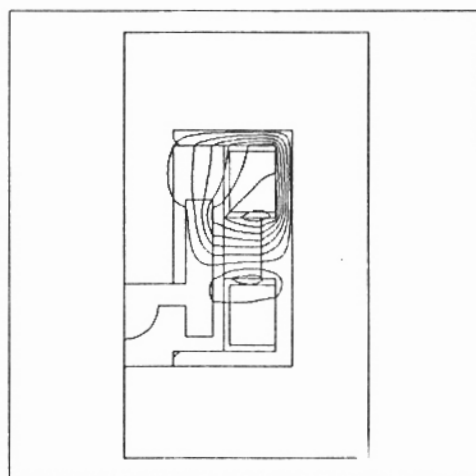


Figura 12

Na Tabela 1 pede-se observar que com a aplicação de 300 A.esp já é ocasionada a inversão de força (Fy) sobre o êmbolo. A área de cada bobina é de 75 mm², e portanto a aplicação de F.M.M. = 300 A.esp, equivale a:

$$Js' = \frac{300}{75} = 4,0 \text{ A/mm}^2$$

Que é o valor da densidade de corrente aplicada a cada área da bobina para obtenção deste ponto da Tabela 1.

Estes valores indicados na Tabela 1, servem também para verificar se a tensão de acionamento de 24 Vcc, para a qual a válvula foi inicialmente projetada, atende aos requisitos para ocasionar o transitório de mudança de estado.

Algumas características da bobina, são obtidas do modelo:

Diâmetro médio da bobina _____ $\phi_b = \phi_{esp} = 42 \text{ mm}$
 Diâmetro médio de cada espira _____ $l_{esp} = \pi \cdot \phi_{esp} \approx 132 \text{ mm}$

As bobinas foram enroladas com fio # 28 AWG e 475 espiras por bobina, que resulta em:

$$R_{\text{bob}} = 475 \cdot 132,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,214 = 13,4 \Omega$$

Sendo que as bobinas são associadas em série, para garantir corrente igual nas duas, e portanto:

$$R_{\text{válvula}} = 2R_{\text{bob}} = 26,8 \Omega$$

$$I_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{cc}}}{R_{\text{válvula}}} = 0,90 \text{ A}$$

$$F.M.M._{\text{máx}} = 0,9 \cdot 475 = 427,5 \text{ A.esp}$$

Este valor é suficiente para garantir a mudança de estado, como pode ser concluído observando a Tabela 1.

6. RESULTADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO

Um protótipo da válvula foi construído, seguindo o projeto aqui descrito, e as características obtidas foram as seguintes:

Peso total = 525 gr
Força (aberta) = 16 N.
Força (fechada) = 18 N.

O protótipo foi submetido a 2000 ciclos, sem falha de acionamento, e manteve a taxa de vazamento na faixa de 10^{-6} mbar.l/s.

O tempo de fechamento da válvula, após o acionamento, foi de ± 60 ms.

Quanto a corrente é importante esclarecer que a corrente após o instante de ligação sofre um transitório, saindo de zero, subindo até passar por um pico, decaindo até o instante em que encerra-se o movimento de abertura/fechamento, subindo posteriormente até atingir a corrente de regime (I_{cc}) determinada pela relação entre a tensão (c.c.) de acionamento e a resistência elétrica das bobinas.

Na realidade o acionamento pode ser interrompido antes de ser estabelecida esta corrente de regime (I_{cc}) visto que o êmbolo já completou seu movimento.

Esta variação da corrente, deve-se a simultaneidade de fenômenos que ocorrem, respeitando a equação:

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + i \cdot \frac{dL(t)}{dt}$$

Para entender melhor os efeitos que ocorrem no transitório recomenda-se a leitura de literatura específica [1] sobre o assunto.

7. CONCLUSÕES

Os resultados práticos encontrados no protótipo, mantiveram excelente concordância com os valores encontrados no modelamento axisimétrico, utilizando o programa ANSYS. É interessante frisar que o conhecimento das características dos materiais empregados é o fundamental, bem como a consistência das equivalências que podem ser necessárias, como no caso do “magneto axisimétrico” composto por pastilhas de magnetos.

A Válvula Eletromagnética Biestável apresentada é a última versão de uma família de válvulas que foram sendo desenvolvidos ao longo do tempo no CTM-SP, portanto as suas reduzidas dimensões são fruto de um desenvolvimento de produto, visando obter características de desempenho: taxa de vazamento, tempo de fechamento,

etc, e paralelamente não esquecendo das necessidades de: baixo peso/volume ("layout"), baixo custo, baixo consumo de energia, etc.

Quanto ao acionamento (abrir/fechar), que necessita uma inversão de polarização da tensão de alimentação + 24 Vcc/- 24 Vcc, esta sendo superada com novo redimensionamento das bobinas para possibilitar a operação em corrente alternada (220 Vac), sendo que para fechar, um diodo conduziria somente os semi ciclos positivos, e para fechar um outro diodo (invertido) conduziria os semiciclos negativos da senóide. Possibilitando uma redução de custos de instalação do acionador e dos cabos de instrumentação visto que com a elevação da tensão a corrente necessária para acionar a válvula será menor pois a bobina será fabricada com fio mais fino e maior número de espiras.

Colocando-se as características já citadas, ainda é fundamental afirmar que uma das principais qualidades deste tipo de válvula, é a confiabilidade, pois esta permanece no último estado para o qual foi acionada sem necessidade de introdução de energia externa, podendo ainda ser acionada para mudança de estado localmente por baterias, se tal procedimento fizer-se necessário ao processo em uma emergência, ou falha do sistema remoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, J.A. - Análise do Transitório Eletromagnético de Atuadores pelo Método dos Elementos Finitos. São Paulo, 1992 - 131 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] LEQUESNE, B. Fast-acting long-stroke bistable solenoids with moving permanent magnets. IEEE Transactions on Industry Applications, v.26, n.3, p.401-7, May. 1990.
- [3] JUFER, M. Electro-mécanique. Lausanne, Editions Georgi, 1979.