

ESTUDO PARAMÉTRICO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BOMBAS ELETROMAGNÉTICAS DE CORRENTE CONTÍNUA COM O PROGRAMA BEMC-1

Eduardo Madeira Borges

Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA), Rodovia dos Tamoios Km 5,5. São José dos Campos, SP.
e-mail: eduardo@ieav.cta.br

Francisco Antonio Braz Filho

Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA), Rodovia dos Tamoios Km 5,5. São José dos Campos, SP.
e-mail: fbraz@ieav.cta.br

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA), Rodovia dos Tamoios Km 5,5. São José dos Campos, SP.
e-mail: guimarae@ieav.cta.br

Resumo. Bombas eletromagnéticas são utilizadas no controle de escoamento de metais líquidos em circuitos de refrigeração. O princípio de funcionamento das bombas eletromagnéticas é baseado na força de Lorentz. Esta pode ser obtida pela interação de campo magnético e corrente elétrica, impostas e controladas por fontes externas independentes. Neste trabalho são apresentados o princípio de operação, os modelos teóricos, o esquema de avaliação, os tipos de bombas estudadas, o programa computacional desenvolvido para projeto e avaliação de desempenho de bombas eletromagnéticas de corrente contínua e os estudos paramétricos. O objetivo principal deste trabalho é o estudo paramétrico de campo magnético, pressão estática, vazão e avaliação de desempenho das bombas. Os resultados teóricos obtidos com o programa são comparados a dados experimentais para se obter os fatores de ajuste dos modelos teóricos usados no programa BEMC-1, de modo a validá-lo, e utilizá-lo para a avaliação e projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua.

Palavras chave: bomba eletromagnética, controle de vazão, metal líquido, simulação computacional, avaliação experimental.

1. Introdução

No Instituto de Estudos Avançados (IEAv) foram desenvolvidas, com sucesso, as duas primeiras bombas eletromagnéticas (EM) de corrente contínua nacionais. Uma com magneto tipo "C" e bobinas e a outra com ímãs permanentes de Samário-Cobalto, para a geração de campo magnético (Borges, et al., 1995 e Borges, et al., 1996). Ambas funcionaram satisfatoriamente em ensaios de campo magnético, de avaliação de pressão estática e de operação dinâmica. Os dois últimos ensaios foram realizados em circuitos fechados a mercúrio especialmente projetados para este fim.

As bombas eletromagnéticas não têm partes móveis, são completamente seladas, apresentam alta confiabilidade e permitem o controle de escoamento de metais líquidos. Estas características as tornam interessantes para serem utilizadas em reatores nucleares rápidos refrigerados a metal líquido, como no EBR-II (Lentz, et al., 1985), no PRISM (Kwant, et al., 1988) e no REARA (Prati, et al., 1994), que são reatores experimentais refrigerados a sódio líquido, assim como, em reatores nucleares espaciais refrigerados a lítio líquido como no projeto norte americano SP-100 (Atwell, et al., 1989 e Armijo, et al., 1989).

O programa computacional BEMC-1 foi elaborado com o objetivo de se poder estudar cada etapa do desenvolvimento de uma bomba eletromagnética de corrente contínua e avaliar o seu desempenho. Este programa é bastante versátil, facilita a avaliação de desvios entre dados calculados e experimentais e permite a utilização de fatores de correção, de modo a minimizar estas diferenças e poder ser utilizado no projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua, para tanto é necessário um estudo paramétrico que é o principal enfoque deste artigo.

Neste trabalho apresenta-se o princípio de funcionamento de bombas eletromagnéticas de corrente contínua, suas equações básicas, um estudo paramétrico comparando os valores teóricos e experimentais de campo magnético, pressão estática e operação dinâmica, para diferentes valores de corrente principal e de campo magnético, e as curvas de desempenho das bombas eletromagnéticas de corrente contínua estudadas.

2. Princípio de funcionamento de bombas eletromagnéticas

Em uma bomba eletromagnética de corrente contínua a força de Lorentz define a intensidade e a direção da força exercida no fluido condutor sob influência da corrente elétrica e do campo magnético impostos. Observa-se, na Figura 1 o princípio de funcionamento de uma bomba eletromagnética de corrente contínua.

Admitindo-se a altura do canal da bomba (a), a largura do canal (b) e o comprimento útil (c), monta-se o equacionamento para a avaliação do seu desempenho (Borges, 1991).

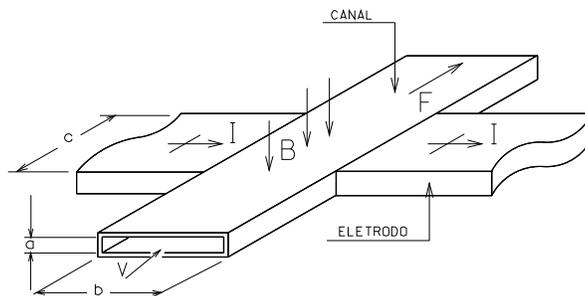


Figura 1. Princípio de funcionamento da bomba eletromagnética de corrente contínua.

2.1. Modelo teórico

O campo magnético pode ser calculado de acordo com a Lei Circuital de Ampere, pela Eq. (1):

$$B = \mu N I_{\text{campo}} / d, \quad (1)$$

que relaciona as intensidades de campo magnético (B) em torno de uma trajetória fechada de fluxo magnético e o comprimento da trajetória com a corrente que a circunda, onde N é o número total de espiras e I_{campo} é a corrente de campo fornecida, observando-se ainda, que as perdas no entreferro (d) são muito superiores às do magneto e que para os metais líquidos, a permeabilidade magnética (μ) é igual à do vácuo.

Considerando-se a perfeita perpendicularidade entre o campo magnético, a corrente elétrica principal (I) e a direção do escoamento do fluido, a força (F) resultante da interação entre campo e corrente pode ser calculada, em função da corrente elétrica útil (I_c), pela Eq. (2):

$$F = B I_c b. \quad (2)$$

Pode-se definir a pressão manométrica desenvolvida pela bomba como:

$$P = F / (a b). \quad (3)$$

Substituindo a Eq. (2) na Eq. (3) tem-se:

$$P = B I_c / a, \text{ em } [N/m^2]; \text{ e} \quad (4)$$

$$P = B I_c / (1360 a), \text{ em } [cm Hg]. \quad (5)$$

A Figura 2 apresenta o circuito elétrico equivalente da bomba eletromagnética de corrente contínua.

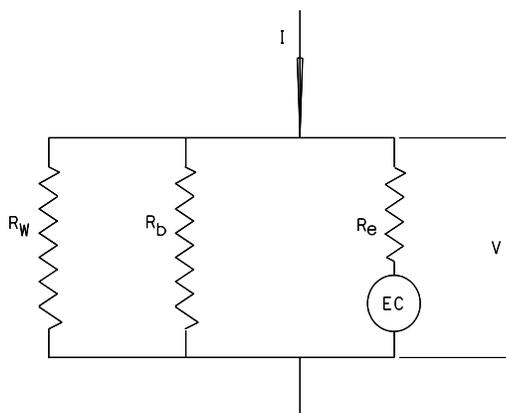


Figura 2. Circuito elétrico equivalente da bomba EM.

A tensão elétrica da bomba é calculada por:

Escolhido o metal líquido a ser bombeado e as suas propriedades, assim como, a geometria e materiais do canal da bomba, calculando-se as resistências elétricas envolvidas nas Eq. (6) e (8).

Um parâmetro muito importante é o campo magnético que pode ser calculado pela equação de campo, Eq. (1), em função do entreferro e da corrente de campo e se necessário corrigido pelo fator de correção apropriado.

A pressão estática, valor limite operacional da bomba para vazão nula, é calculada pela Eq. (5) e depende do campo magnético e da corrente elétrica útil, que é obtida pela Eq. (8), considerando-se as resistências elétricas, a corrente elétrica principal, sendo nulo o último termo da Eq. (8).

A pressão dinâmica fornecida pela bomba, também é obtida pela Eq. (5). Neste caso, a corrente elétrica útil deve ser calculada pela Eq. (8) considerando todos os seus termos, pois é função da vazão, usada na Eq. (7).

Com o BEMC-1 pode-se avaliar a vazão e pressão dinâmica fornecidas pela bomba operando em circuitos fechados, calculando a perda de carga do circuito em função da vazão, do seu diâmetro e do comprimento equivalente.

Com o objetivo de facilitar a otimização do projeto de uma bomba eletromagnética de corrente contínua o programa computacional BEMC-1 permite modificar dados e parâmetros para análise de uma nova condição de operação da bomba, assim como, dados geométricos da bomba EM e do circuito, utilizando o ícone de controle.

4. Estudos paramétricos

São avaliadas duas bombas eletromagnéticas de corrente contínua, uma tem magneto tipo “C” e bobinas de campo com 2000 espiras e a outra usa ímãs de samário-cobalto para gerar o campo magnético.

Os dados experimentais e teóricos de campo magnético, pressão manométrica e vazão, fornecidos pelas bombas EM, são comparados para definição dos melhores fatores de correção e ajuste do programa BEMC-1.

Neste estudo paramétrico, observa-se a necessidade de correções: do campo magnético em função da corrente de campo, assim como, dos valores de pressão e vazão fornecidos pela bomba EM, em função da corrente elétrica principal utilizada.

4.1. Campo magnético

Com relação à primeira bomba EM, na Fig. 4 apresenta-se a curva de campo magnético médio teórico, calculado pelo BEMC-1, com a Eq. (1), e os dados experimentais no centro do entreferro do magneto tipo “C”, em função da corrente de campo fornecida às bobinas.

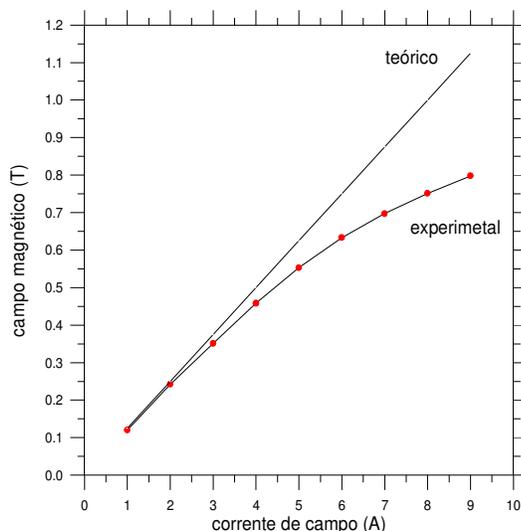


Figura 4. Campo magnético médio no centro do entreferro do magneto tipo “C”.

Para valores de correntes de campo crescentes (no caso da bomba EM com magneto tipo “C”) a diferença entre os dados teóricos e experimentais se acentua, devido à saturação do magneto. Portanto há a necessidade do uso de fatores de ajuste no cálculo de campo magnético médio no programa BEMC-1, em função do valor da corrente de campo, pois os dados da simulação devem reproduzir os dados experimentais.

Na bomba EM de ímãs o seu desempenho depende do campo magnético gerado pelos ímãs. Na Figura 5 são comparadas as curvas de densidade de campo magnético obtidas por simulação computacional com o programa LMAG2D (Abe, 1996) e nos ensaios experimentais de magnetos ERIMAX, com quatro blocos construtivos. O campo magnético médio teórico calculado na região de interesse (no comprimento ativo da bomba EM) é $0,52 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$.

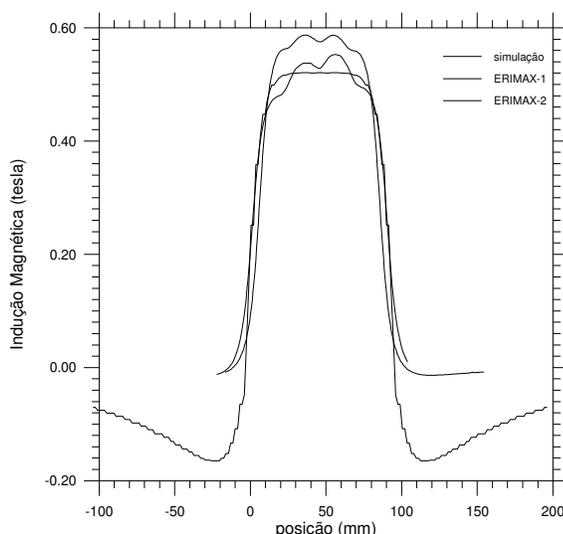


Figura 5. Comparação de distribuição de campo magnético teórico e experimental.

A curva experimental de indução magnética na direção perpendicular ao canal da bomba EM, ao longo da sua largura é apresentada na Fig. 6. Nota-se o efeito de borda, que é a alteração do campo magnético próximo ao contorno do magneto, e neste caso apresenta inversão de sinal na região externa.

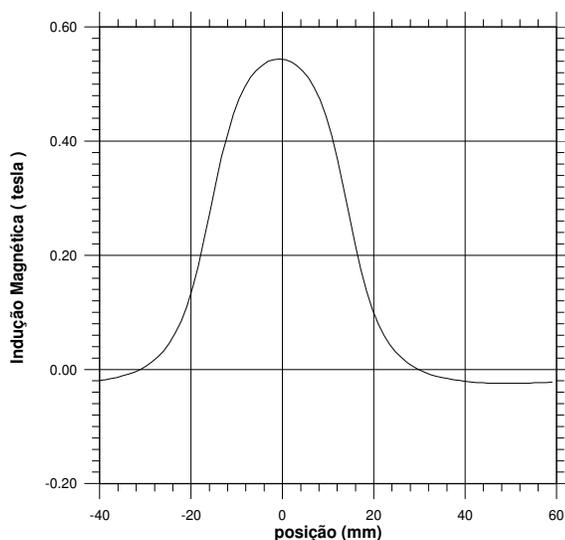


Figura 6. Campo magnético experimental na direção da largura do canal.

O ponto zero representa o centro do ímã e o valor máximo de campo magnético medido foi $B = 0,54 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$. O valor médio desta curva, calculado somente na região central interna ao canal (30 mm) corresponde a aproximadamente 85% do seu valor máximo, sendo este o fator a ser usado como correção de campo magnético médio sobre o anteriormente obtido. Logo, $B = 0,44 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$, é considerado como o valor de campo magnético médio experimental no comprimento ativo do canal, e é usado nos cálculos teóricos da bomba EM com ímãs de samário-cobalto.

Observa-se neste estudo paramétrico a necessidade do uso de fatores de ajuste no cálculo de campo magnético médio no programa BEMC-1, para as duas bombas EM avaliadas. Na Tabela 1 são apresentados os valores teóricos e corrigidos (experimentais) de campo magnético. Para não se impor novos erros aos resultados obtidos nos cálculos subsequentes, com o programa BEMC-1, utiliza-se o campo magnético experimental.

Tabela 1. Campo magnético teórico e experimental.

$B[\text{Wb/m}^2] - I_{\text{campo}} [\text{A}]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ímãs
B teórico	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1	1,125	0,52
B experimental	0,12	0,24	0,35	0,46	0,55	0,63	0,70	0,75	0,80	0,44

4.2. Pressão estática

Para se poder avaliar experimentalmente a pressão manométrica de bombas eletromagnéticas de corrente contínua com vazão nula foi projetado e construído um circuito experimental fechado em aço e vidro, para mercúrio, cujo esquema é apresentado na Fig. 7. Notam-se as tubulações verticais em vidro, onde se pode verificar o deslocamento do mercúrio e o desnível total ΔL (pressão estática) produzido pela bomba EM, as demais partes do circuito são feitas em aço. Os dados experimentais de pressão estática da bomba EM são obtidos variando-se o campo magnético imposto e o valor da corrente principal, e medindo-se o desnível de mercúrio total (ΔL).

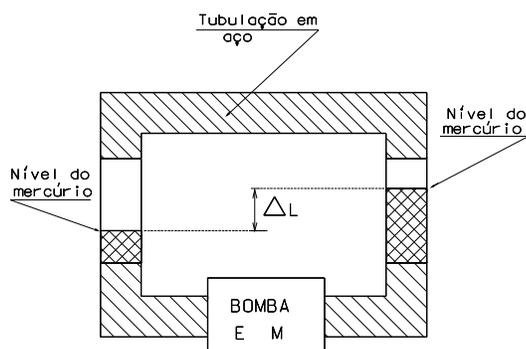


Figura 7. Esquema do circuito experimental para avaliação de pressão estática.

Os valores teóricos de pressão estática são obtidos em função da corrente elétrica média útil, da geometria do canal da bomba e do campo magnético médio teórico corrigido (experimental).

Como comentado no item Modelo Teórico, um parâmetro importante do cálculo da bomba EM é o fator empírico utilizado no cálculo da resistência elétrica de “bypass”. Este fator empírico é usado no cálculo da corrente elétrica útil e depende dos parâmetros geométricos da bomba (Watt, 1958). Quanto maior for este fator, menor é a perda de corrente elétrica de fuga. Nota-se ainda que este parâmetro deve ser ajustado para cada projeto de bomba EM.

A pressão estática teórica da bomba EM é obtida pela Eq. (5). O valor da corrente útil (I_c) é calculado, em função da corrente principal (I) pela Eq. (8), considerando o último termo desta equação nulo. Para tanto, utiliza-se as resistividades elétricas dos materiais usados, na temperatura de trabalho e a geometria do canal da bomba para se obter as resistências elétricas. Tem-se: $R_w = 15,0 \cdot 10^{-5}$ Ohms e $R_c = 4,0 \cdot 10^{-5}$ Ohms. Admitindo-se que $R_b = 15,0 R_c$, como em (Borges, et al., 1995 e Borges, et al., 1996-a), obtêm-se as curvas teóricas de pressão estática da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C” obtida pelo BEMC-1, em função da corrente elétrica principal e de campo, que são apresentadas junto com as experimentais, na Fig. 8.

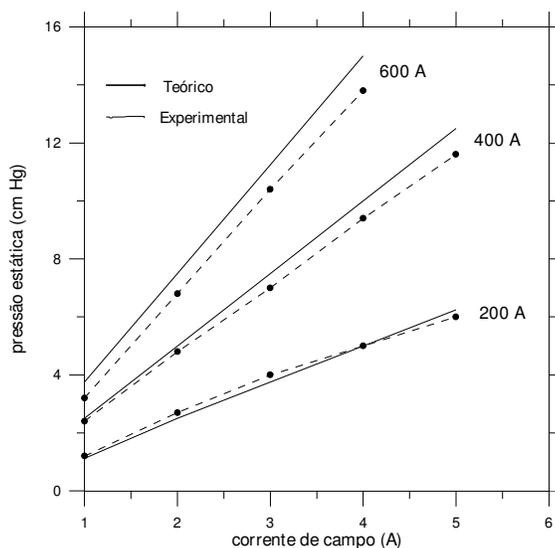


Figura 8. Curvas teóricas e experimentais de pressão estática da bomba EM com magneto tipo “C”.

Neste estudo paramétrico, a diferença média entre os resultados teóricos e experimentais para a curva de pressão estática é aproximadamente 10% para $I= 600$ (A), 5% para $I= 400$ (A) e nula para $I= 200$ (A). Pode-se, utilizar um fator de correção, em função do valor da corrente elétrica principal, para o ajuste de pressão estática desta bomba EM, como apresentado na Eq. (9).

$$P_{cor} = P_{teo} (1 - f_{cor} (I-200)) \quad (9)$$

Onde: P_{cor} é o valor do parâmetro corrigido (pressão estática), P_{teo} é o parâmetro teórico, f_{cor} é o fator de correção, cujo valor é 0,00025, e I é o valor da corrente elétrica principal (A).

A Figura 9 apresenta as curvas teóricas corrigidas e as experimentais de pressão estática da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C”, apresentando boa concordância.

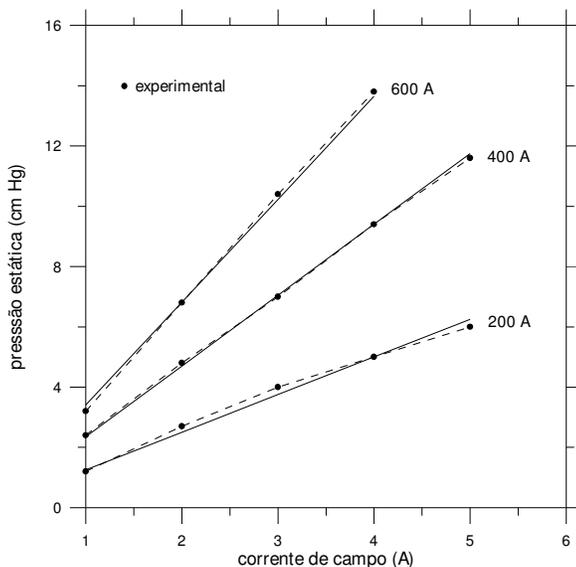


Figura 9. Curvas de pressão estática experimental e teórica corrigidas.

A Figura 10 apresenta a comparação entre os dados de pressão estática experimental e teórica (obtidos com o BEMC-1) utilizando-se como fator de “bypass” 5 vezes a resistência elétrica útil, neste caso não há a necessidade do uso de fatores de ajuste.

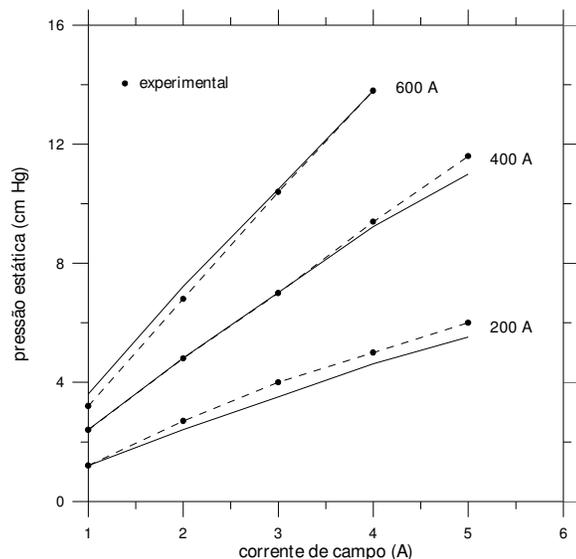


Figura 10. Curvas teóricas e experimentais de pressão estática da bomba EM com magneto tipo “C”.

A pressão estática teórica da bomba EM de corrente contínua com imãs é calculada pela Eq. (5). O campo magnético na região de interesse (canal da bomba), com os blocos de imãs de samário-cobalto vale $0,44 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$. Este valor de campo magnético também é assumido para três e cinco blocos construtivos. A corrente elétrica útil é obtida pela Eq. (8), considerando o último termo desta equação nulo. Adotando-se os mesmos valores de resistências elétricas já calculadas e admitindo-se como fator de “bypass” $R_b = 5,0 R_e$, obtém-se $I_e = 0,68 I$. Como a altura útil do canal é $a = 0,01 \text{ m}$, a pressão estática teórica da bomba pode ser calculada, em função da corrente elétrica principal por:

$$P = 0,022 I, \text{ em [cm Hg]} . \quad (10)$$

A Eq. (10) define os limites teóricos de pressão de operação da bomba EM de corrente contínua de imãs.

Na Figura 11 observa-se a curva teórica e os dados experimentais de pressão estática da bomba EM para três, quatro e cinco blocos construtivos, em função da corrente elétrica principal. Nota-se que os resultados experimentais para quatro blocos construtivos coincidem com a curva teórica, não necessitando de qualquer ajuste.

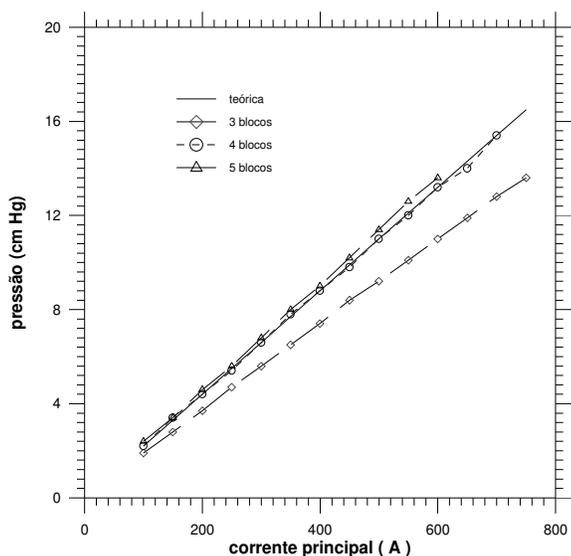


Figura 11. Curvas de pressão estática teórica e experimental da bomba EM com imãs.

Comparando-se os dados de pressão estática, das duas bombas EM nota-se que o programa BEMC-1, utilizando os valores de campo magnético experimentais, os fatores de “bypass” e de correção apropriados, reproduz os dados experimentais, com diferenças quase nulas, validando a metodologia de análise utilizada.

4.3. Vazão

Para os ensaios experimentais de operação de bombas eletromagnéticas de corrente contínua é utilizado o circuito dinâmico de mercúrio, apresentado na Fig. 12.

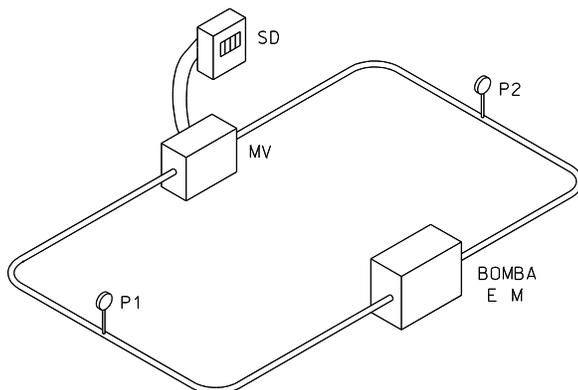


Figura 12. Esquema do circuito dinâmico de mercúrio para avaliação de bombas EM.

A Figura 13 apresenta as curvas teóricas (obtidas com o BEMC-1) e experimentais de vazão da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C” no circuito dinâmico de mercúrio. Observa-se que para as avaliações teóricas neste caso utiliza-se a corrente útil calculada pela Eq. (8), com todos os seus termos.

Nota-se que, a vazão fornecida pela bomba EM depende diretamente dos valores das correntes de campo e principal. Experimentalmente obtêm-se vazões inferiores a seis [l/min]. Este valor está associado às limitações das fontes de corrente utilizadas.

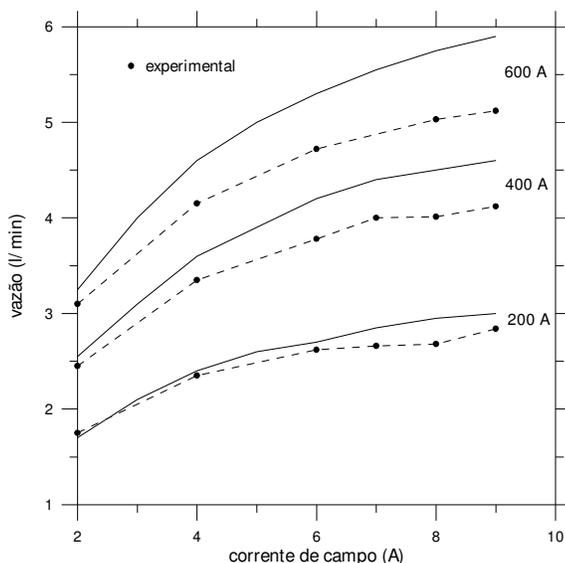


Figura 13. Curvas teóricas e experimentais de vazão da bomba EM com magneto tipo “C”.

Esta análise mostra a necessidade da utilização de fatores de correção para o ajuste das curvas de vazão teórica desta bomba EM. Pode-se ajusta-las em função da corrente elétrica de campo ou da corrente elétrica principal. Nesta análise optou-se por corrigi-las pela Eq. (9), utilizando o mesmo fator de correção dependente da corrente principal, usado no ajuste de pressão estática.

A Figura 14 apresenta as curvas de vazão da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C” experimentais e teóricas corrigidas, apresentando boa concordância.

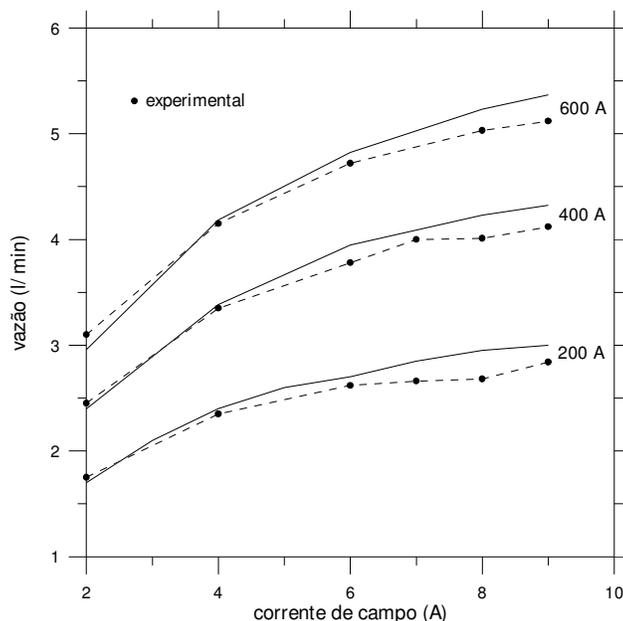


Figura 14. Curvas teóricas ajustadas e experimentais de vazão da bomba EM com magneto tipo “C”.

4.4. Avaliação de desempenho

Na avaliação teórica de desempenho dinâmico de uma bomba eletromagnética de corrente contínua deve-se considerar os dados geométricos, as correntes elétricas envolvidas e as curvas de pressão dinâmica da bomba EM e de perda de carga no circuito, em função da vazão, calculadas pelo programa BEMC-1.

A pressão dinâmica teórica da bomba EM pode ser obtida pela Eq. (5). A corrente elétrica útil é calculada pela Eq. (8), considerando todos os seus termos, portanto depende da vazão.

Na Figura 15 apresentam-se as curvas teóricas de desempenho da bomba eletromagnética de corrente contínua com magneto tipo "C", para três conjuntos de valores de campo magnético e corrente principal, sem o uso de fatores de ajuste e a curva teórica de perda de carga no circuito dinâmico de mercúrio (com diâmetro interno de 0,0122 metros e comprimento equivalente de 3,8 metros) em função da vazão, obtidas com o programa BEMC-1.

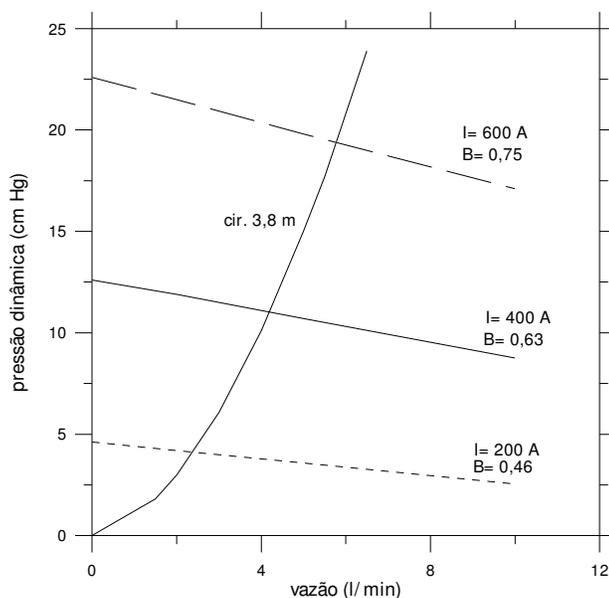


Figura 15. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM com magneto tipo "C" e de perda de carga do circuito.

Na Figura 16 apresentam-se várias curvas teóricas dinâmicas da bomba EM de ímãs e de perda de carga de circuitos, obtidas com o BEMC-1

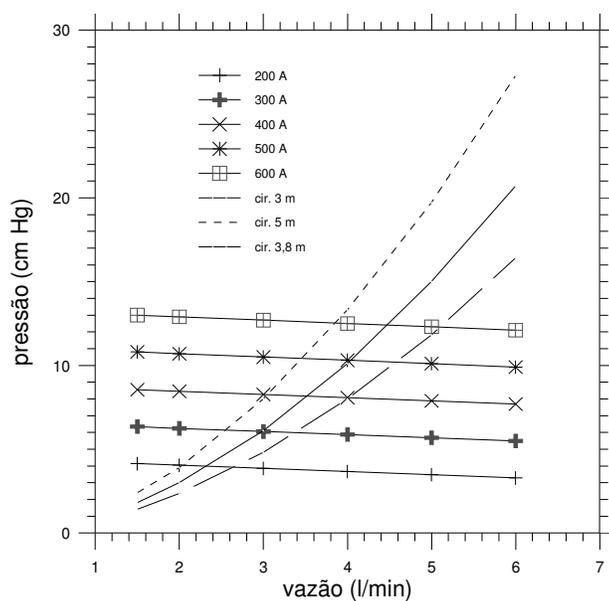


Figura 16. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM de ímãs e de perda de carga de circuitos.

As curvas teóricas de pressão dinâmica e de vazão estão correlacionadas, pois a pressão dinâmica é calculada em função da vazão, é sempre inferior ao valor da pressão estática, para a mesma corrente principal e de campo fornecidas, e deve ser compatível com a curva de perda de carga do circuito.

Para bombas mecânicas centrífugas as curvas dinâmicas teóricas e experimentais são curvas, pois as perdas, em especial, devido ao atrito obtido nos mancais, aumentam com a rotação, ou seja, com a vazão.

As curvas de desempenho de bombas eletromagnéticas são retas. No caso da bomba EM com magneto tipo “C” estas curvas apresentadas não são paralelas, pois, neste estudo paramétrico, os valores de campo magnético são diferentes para cada uma delas.

No caso da bomba EM de imãs as curvas de desempenho são retas paralelas, pois neste caso o campo magnético fornecido é sempre o mesmo. Quanto maior a corrente fornecida maior a máxima pressão dinâmica da bomba. O valor de pressão dinâmica teórica, como esperado, é menor para vazões maiores.

Nas Fig. 15 e 16, os pontos teóricos de operação das bombas EM, em função do campo magnético, da corrente principal aplicada e do circuito usado, são os pontos de interseção.

5. Comentários e conclusão

A necessidade do desenvolvimento do programa computacional BEMC-1 deve-se principalmente aos projetos de bombas eletromagnéticas de corrente contínua e experiências realizadas no IEAV. Os dados obtidos nos ensaios demonstraram a importância de se desenvolver modelos matemáticos específicos para cada fenômeno estudado.

Observa-se neste estudo paramétrico a necessidade do uso de fatores de ajuste no cálculo de campo magnético médio no programa BEMC-1, para as duas bombas EM avaliadas. No caso da bomba EM com magneto tipo “C” nota-se que para valores de correntes de campo crescentes a diferença entre os dados teóricos e experimentais se acentua, devido à saturação do magneto.

Para se avaliar experimentalmente os dados de pressão estática, assim como, a operação de bombas eletromagnéticas de corrente contínua foram projetados e utilizados circuitos experimentais a mercúrio.

(Watt, 1958) afirma que o fator de “bypass” é um fator de correção empírico, que está relacionado com a geometria da bomba. Comparando-se os dados de pressão estática e vazão, nota-se que este fator empírico também é dependente das condições de operação da bomba. Pode-se ainda utilizar fatores de ajuste, de modo que os resultados teóricos reproduzam os dados experimentais.

As curvas de desempenho das bombas eletromagnéticas são retas. No caso da bomba EM com magneto tipo “C” estas curvas não são paralelas, pois neste estudo os valores de campo magnético são diferentes para cada uma delas. No caso da bomba EM de imãs o campo magnético é sempre igual e as curvas de desempenho são retas paralelas.

Pode-se determinar o ponto teórico de operação de uma bomba EM num circuito. Para tanto, deve-se traçar as curvas de pressão dinâmica da bomba, em função do campo magnético e da corrente principal aplicada e a de perda de carga do circuito usado (todas em função da vazão). Os pontos de operação do sistema são os pontos de interseção entre as retas de desempenho da bomba EM e a curva de perda de carga do circuito.

Os desvios teórico-experimentais verificados determinaram os fatores de correção necessários ao programa de simulação, que utilizando os fatores de ajuste adequados reproduziu bem os dados experimentais de campo magnético, pressão estática e curvas de vazão. Portanto, apesar de usar modelos relativamente simples, o BEMC-1 pode ser utilizado na avaliação de desempenho e projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua.

6. Referências

- Abe, N. M.; et al., 1996, LMAG-2D: A Software Package To Teach FEA Concepts, Proceedings of the VII IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Okayama, Japan.
- Armijo, J. S., et al., 1989, “Thermoelectric Electro-magnetic Pump Design for the SP-100 Reference Flight System”. VI Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, USA.
- Atwell, J. C., et al., 1989, “SP-100 Technology Accomplishments”. VI Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, USA.
- Borges, E. M., 1991, “Desenvolvimento e Simulação Computacional de Bombas Eletromagnéticas Termoelétricas para o Controle do Escoamento em Reatores Nucleares Espaciais Refrigerados a Metal Líquido”. Tese de Doutorado ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Borges, E. M., et al., 1995, “Ensaio de Pressão Estática de Bomba Eletromagnética de Corrente Contínua”. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Borges, E. M., et al., 1996, “Rare-Earth Magnets Applied to Liquid Metal Flow”. XIV International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Sao Paulo, SP, Brazil.
- Borges, E. M., et al., 1996-a, “Bomba Eletromagnética de corrente contínua com Imãs de Terras Raras para o Controle de Escoamento de Metais Líquidos”. VI Congresso Latino Americano de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil.
- Kwant, W., et al., 1988, “PRISM Reactor Design and Development”. Safety of Next Generation Power Reactors Meeting, Washington, USA.

- Lentz, G. L., et al., 1985, "EBR-II - Twenty Years of Operation Experience". Symposium on Fast Breeder Reactors: Experience and Trends, Lyon, France.
- Prati, A., et al., 1994, "Concepção de um Reator Rápido Experimental para o Brasil". V Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Watt, D. A., 1958, "The Design of Electromagnetic Pumps for Liquid Metals". Atomic Energy Research Establishment, Harvel, Berkshire, AERE R/R 2572.

PARAMETRIC STUDY AND PERFORMANCE EVALUATION OF DC ELECTROMAGNETIC PUMPS WITH BEMC-1 COMPUTATIONAL PROGRAM.

Eduardo Madeira Borges

Institute for Advanced Studies (IEAv – CTA), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil
e-mail: eduardo@ieav.cta.br

Francisco Antonio Braz Filho

Institute for Advanced Studies (IEAv – CTA), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil
e-mail: fbraz@ieav.cta.br

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Institute for Advanced Studies (IEAv – CTA), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil
e-mail: guimarae@ieav.cta.br

Abstract

Electromagnetic pumps are used to liquid metal fluid flow control in cooling loops. The principle of operation of electromagnetic pump used to fluid flow control is based on Lorentz's force. This is obtained by interaction of the magnetic field and the electrical current, imposed and adjusted by independent external electric power sources. In this work are presented the operational principles, theoretical models, evaluation scheme, type of pumps studied, the computational program developed for design and performance evaluation of DC electromagnetic pumps and parametric studies. The principal of this work is the parametric studies for magnetic induction, static pressure, fluid flow and performance evaluation of pumps. The theoretical program results are compared with the experimental data to get adjust factors to use in the BEMC-1 program can be validated and used in the evaluations and projects of the DC electromagnetic pump.

Keywords: electromagnetic pump, fluid flow control, liquid metal, computational simulation, experimental evaluation.