

BEMC-1 PROGRAMA DE PROJETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE BOMBAS ELETROMAGNÉTICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Eduardo Madeira Borges

Francisco Antonio Braz Filho

Francisco Sircilli Neto

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Instituto de Estudos Avançados (IEAv - CTA), 12231-970, São José dos Campos, SP, Brasil.

E-mail: eduardo@ieav.cta.br

Resumo

Bombas eletromagnéticas podem ser usadas no controle de vazão de circuitos de refrigeração, este controle é feito pelo campo magnético e corrente elétrica fornecidos. Neste trabalho apresenta-se o programa computacional BEMC-1, desenvolvido para projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua e sua validação. Esta é obtida comparando-se os resultados de simulações teóricas com os dados experimentais de: indução magnética, pressão estática e curvas de vazão no circuito dinâmico a mercúrio.

Palavras-chave: Bombas Eletromagnéticas, Simulação Computacional, Metal Líquido, Eletromagnetismo.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de refrigeração, que utilizam metal líquido como fluido de trabalho, podem retirar altas densidades de potência térmica. As bombas eletromagnéticas não têm partes móveis, são completamente seladas, apresentam alta confiabilidade e permitem a utilização de fluido radioativo à alta temperatura. 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 (Borges, et al., 1994).

No Instituto de Estudos Avançados (IEAv) se projetou e ensaiou a primeira bomba eletromagnética (EM) de corrente contínua nacional, que funcionou satisfatoriamente em ensaios estáticos e dinâmicos, em circuitos fechados a mercúrio especialmente desenvolvidos para este fim (Borges, et al., 1995).

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, independentemente. Assim como, avaliar o desempenho da bomba EM.

O BEMC-1 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 estes erros e projetar bombas eletromagnéticas de corrente contínua.

Neste trabalho apresenta-se o princípio de funcionamento de bombas eletromagnéticas de corrente contínua, suas equações básicas, a comparação entre os valores teóricos e experimentais de campo magnético, pressão estática e curvas de vazão, para diferentes valores de corrente principal e de campo fornecidos, validando o programa BEMC-1.

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).

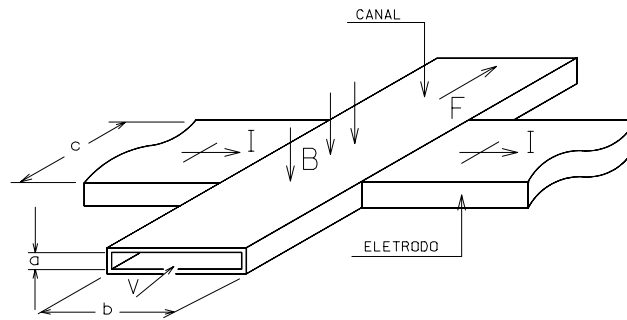


Figura 1. Princípio de funcionamento da bomba eletromagnética de corrente contínua.

2.1 Formulação do problema

O campo magnético pode ser calculado de acordo com a Lei Circuital de Ampere:

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

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_e) por:

$$F = B * I_e * b \quad . \quad (2)$$

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

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

Substituindo na Eq. (2) tem-se:

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

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

Na Figura 2 observa-se o circuito elétrico equivalente da bomba eletromagnética.

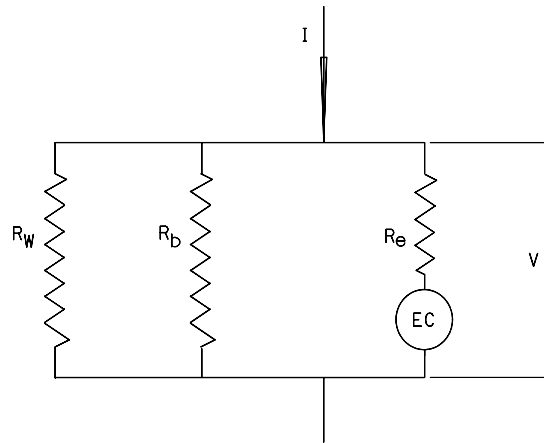


Figura 2. Circuito elétrico equivalente da bomba EM de corrente contínua.

A tensão elétrica da bomba é calculada por:

$$V = I_e * R_e + E_c = I * R_t \quad (6)$$

Onde: R_t é a resistência elétrica equivalente do circuito e E_c é a força contra-eletromotriz resultante do deslocamento do fluido no campo magnético. Esta voltagem induzida equivale a:

$$E_c = B * w / a \quad (7)$$

A corrente elétrica útil (I_e) pode ser calculada em função da corrente principal (I), da força contra eletromotriz (E_c) e das resistências elétricas R_e , R_w e R_b que são respectivamente as resistências elétricas do fluido no canal da bomba, da parede do canal (perpendicular ao campo magnético, na direção da corrente elétrica) e a resistência de “bypass”, que é a resistência de fuga de corrente pelo fluido fora da influência do campo magnético. R_b por sua vez é calculada multiplicando-se a resistência elétrica útil (R_e) por um fator de correção empírico, que está relacionado com a geometria da bomba.

$$I_e = \frac{I}{1 + R_e \left(\frac{R_w + R_b}{R_w * R_b} \right)} - \frac{E_c}{R_e + \frac{R_w * R_b}{R_w + R_b}} \quad (8)$$

Portanto a corrente elétrica útil é uma função da vazão volumétrica (w).

Observa-se que no estudo de pressão estática (com vazão nula) o último termo é nulo e no cálculo de pressão dinâmica (com escoamento de fluido) este termo é diferente de zero.

3. PROGRAMA COMPUTACIONAL BEMC-1

De modo geral as etapas fundamentais do projeto de uma bomba eletromagnética de corrente contínua são: a avaliação do campo magnético, da pressão estática e dos dados de vazão, pressão dinâmica e eficiência.

O programa BEMC-1, escrito em linguagem C++, foi elaborado com o objetivo de se poder avaliar, cada etapa do desenvolvimento de uma bomba EM, possibilitando alteração em todos os parâmetros importantes de projeto.

Deve-se definir o fluido a ser bombeado e suas propriedades, assim como, a geometria e materiais do canal, calculando-se então as resistências elétricas envolvidas, Eq. (6).

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 fornecida pela bomba, Eq. (5), depende do campo magnético, da geometria do canal e da corrente elétrica útil, que por sua vez é função da corrente principal, das resistências elétricas calculadas e da vazão, Eq.(8).

A pressão estática, valor limite operacional da bomba, é calculada considerando-se nulo o último termo da Eq. (8).

Com o BEMC-1 pode-se avaliar a vazão e pressão dinâmicas fornecidas pela bomba operando em circuitos fechados, calculando as 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 um nova condição de atuação da bomba, assim como, dados geométricos da bomba EM e do circuito.

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados experimentais e teóricos de campo magnético, pressão manométrica e vazão, fornecidos pela bomba EM, devem ser comparados para definição dos fatores de ajuste e validação do programa BEMC-1. Em (Borges, et al., 1995) estão os dados de geometria e ensaios da bomba.

4.1 Campo magnético

A bomba EM de corrente contínua estudada tem magneto tipo “C” e bobinas de campo com 2000 espiras. Na Figura 3 apresenta-se a curva de campo magnético médio teórico, calculado pela Eq. (1), e a experimental no centro do entreferro, em função da corrente de campo imposta às bobinas.

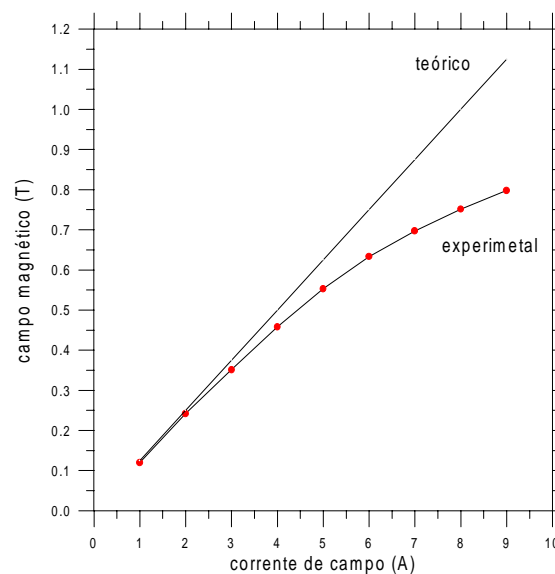


Figura 3. Campo magnético médio no centro do entreferro do magneto tipo “C”.

Observa-se que para valores de correntes de campo crescentes a diferença entre os dados teóricos e experimentais se acentua, devido a saturação do magneto. Há portanto necessidade do uso de fatores de ajuste no cálculo de campo magnético médio no programa BEMC-1, em função da corrente de campo, pois a simulação deve reproduzir os dados experimentais. Isto foi feito e nos cálculos subseqüentes o BEMC-1 usa o campo corrigido.

4.2 Pressão estática da bomba EM

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.

Nas Figura 4 e 5, respectivamente, são apresentadas as curvas teóricas e experimentais de pressão estática da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C”, em função das correntes elétricas principal e de campo.

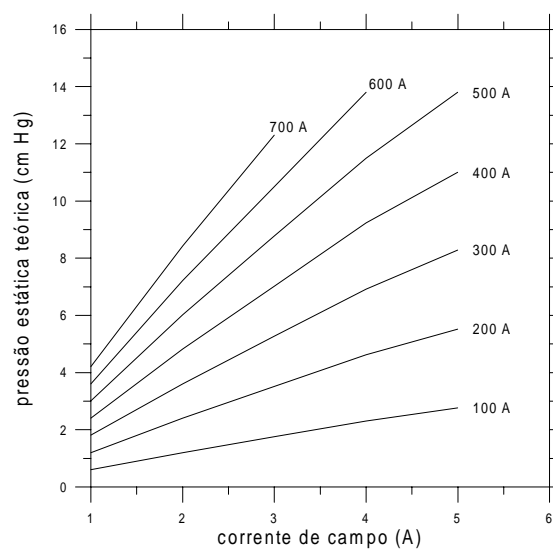


Figura 4. Curvas teóricas de pressão estática da bomba EM, obtidas com o BEMC-1.

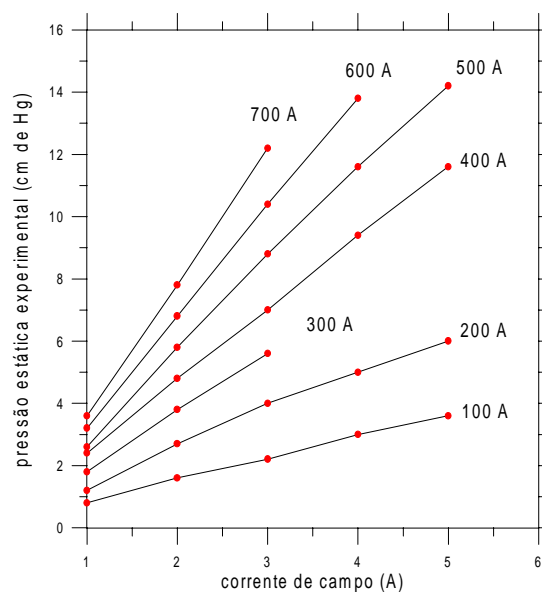


Figura 5. Curvas experimentais de pressão estática da bomba EM.

Comparando-se os dados de pressão estática, nota-se que o programa BEMC-1 (utilizando os fatores de correção de campo magnético e de “bypass” apropriados) reproduz os dados experimentais, com erros quase nulos, validando a metodologia de análise utilizada no BEMC-1. Sem o fator de correção de campo os desvios chegam a 20% (Borges, et al., 1998).

4.3 Ensaios dinâmicos e avaliação teórica de desempenho da bomba EM

Apresenta-se na Figura 6 as curvas experimentais de vazão da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C” no circuito dinâmico de mercúrio.

Nota-se que como esperado a vazão fornecida pela bomba EM depende diretamente dos valores das correntes de campo e principal. Consegue-se experimentalmente, com o controle destas correntes elétricas, vazões de até aproximadamente seis [l/min], observa-se que este valor está associado às limitações das fontes de corrente utilizadas.

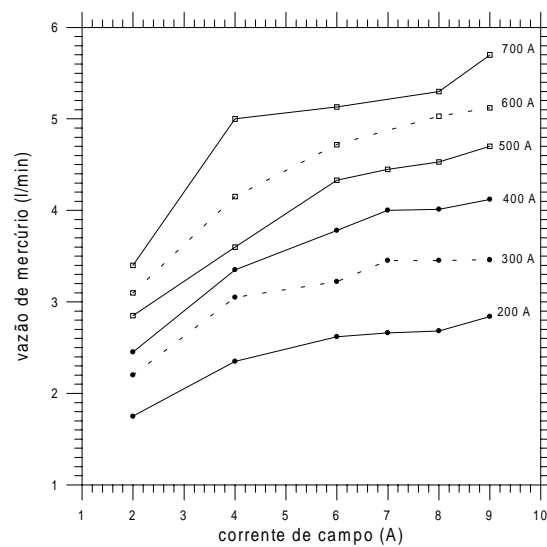


Figura 6. Curvas experimentais de vazão da bomba EM.

Na Figura 7 apresenta-se 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, obtida com o programa BEMC-1.

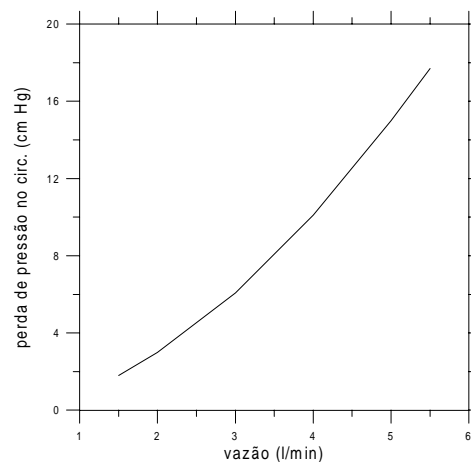


Figura 7. Curva teórica de perda de carga no circuito, obtida com o BEMC-1.

Na avaliação teórica de desempenho dinâmico de uma bomba eletromagnética de corrente contínua deve-se considerar os dados geométrico, as correntes elétricas envolvidas, as curvas de pressão estática da bomba EM e a curva de perda de carga no circuito, calculadas pelo programa BEMC-1. Apresenta-se na Figura 8 as curvas teóricas de vazão da bomba EM de corrente contínua com magneto tipo “C”, para o circuito dinâmico de mercúrio.

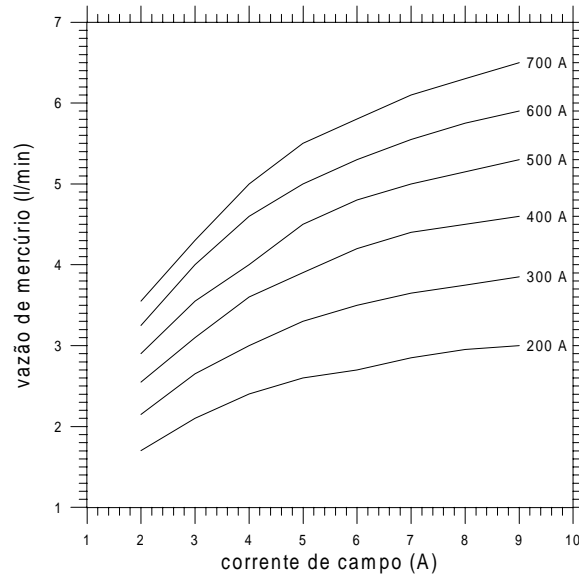


Figura 8. Curvas teóricas de vazão da bomba EM, obtidas com o BEMC-1.

Na Figura 9 apresenta-se, as curvas teóricas de pressão dinâmica da Bomba, obtidas com o programa BEMC-1.

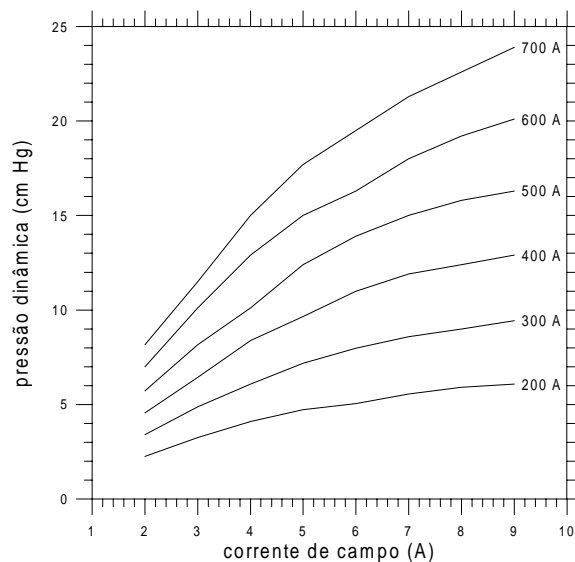


Figura 9. Curvas teóricas de pressão dinâmica da bomba EM, obtidas com o BEMC-1.

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 as mesmas correntes principal e de campo fornecidas, e deve ser compatível com a curva de perda de carga do circuito.

5. CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

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.

Comparando os dados teóricos e experimentais de campo magnético, observa-se que para valores de correntes de campo crescentes, a diferença entre eles se acentua, devido a saturação do magneto. Há portanto a necessidade do uso de fatores de ajuste, no cálculo de campo magnético médio no programa BEMC-1, em função da corrente de campo, pois a simulação deve reproduzir os dados experimentais.

Comparando-se os dados de pressão estática, nota-se que o programa BEMC-1 (utilizando os fatores de correção de campo magnético e de “bypass” adequados) reproduz os dados experimentais, com erros quase nulos. Sem estes fatores de correção, obtidos comparando-se os dados teóricos e experimentais, pode haver erros. Em (Borges, et al., 1998) não usou-se os fatores de ajuste de campo e os desvios chegaram a 20%.

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 analíticos relativamente simples, o BEMC-1 pode ser considerado validado e mostrou-se otimizado para ser utilizado na avaliação e projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua.

6. REFERÊNCIAS

- 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., 1994, “Concepção de um Reator Rápido Experimental para o Brasil”. V Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, 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., 1998, “Avaliação de Desempenho da Bomba Eletromagnética de Corrente Contínua no Controle de Vazão de Mercúrio”. VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Rio de Janeiro, RJ, 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.