

## CONTROLE DE VAZÃO DE METAIS LÍQUIDOS POR BOMBAS ELETROMAGNÉTICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

### Eduardo Madeira Borges

Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP.  
e-mail: [eduardo@ieav.cta.br](mailto:eduardo@ieav.cta.br)

### Francisco Antonio Braz Filho

Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP.  
e-mail: [fbraz@ieav.cta.br](mailto:fbraz@ieav.cta.br)

### Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP.  
e-mail: [guimarae@ieav.cta.br](mailto:guimarae@ieav.cta.br)

**Resumo.** Sistemas de refrigeração com altas densidades de potência necessitam de fluidos com alta condutividade térmica, como os metais líquidos. Bombas eletromagnéticas podem ser utilizadas no controle de escoamento de metais líquidos em circuitos fechados. O princípio de funcionamento das bombas eletromagnéticas é baseado na força de Lorentz. Esta força pode ser obtida pela interação de campo magnético e corrente elétrica, controladas por fontes externas independentes. Este trabalho apresenta o princípio de operação, o esquema de desenvolvimento de bombas eletromagnéticas de corrente contínua (EM) no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e o programa computacional BEMC-1. Os resultados teóricos, obtidos com o BEMC-1, são comparados a dados experimentais de operação da bomba EM, validando o programa BEMC-1. Este código é utilizado para a avaliação do desempenho da bomba EM aplicada no controle de escoamento de Mercúrio e de outros metais líquidos usados em reatores nucleares rápidos, como Sódio, Chumbo e Bismuto.

*Palavras chave:* metal líquido, bomba eletromagnética, controle de vazão.

### 1. Introdução

A pesquisa de bombas eletromagnéticas no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) tem por objetivo o desenvolvimento de sistemas de refrigeração que utilizam metais líquidos como refrigerante, pois estes podem retirar altas densidades de potência térmica, como é necessário em reatores nucleares rápidos.

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 citados foram realizados com Mercúrio em circuitos fechados especialmente projetados para este fim.

As bombas eletromagnéticas utilizam o princípio de Faraday, onde a interação da corrente elétrica e campo magnético gera a força magneto-motriz que controla o escoamento do fluido. Sem partes móveis, totalmente selada e com alta confiabilidade, este tipo de equipamento pode controlar o escoamento de um metal líquido de alta condutividade elétrica num circuito fechado e facilitar a circulação natural do líquido, em caso de falhas ou acidentes, em um reator nuclear. 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 SAFR (Lancet e Marchaterre, 1985), no PRISM (Kwant, et al., 1988) e no REARA (Prati, et al., 1994), que são reatores experimentais refrigerados a Sódio líquido.

Reatores rápidos refrigerados a Chumbo, a Bismuto e a outros metais líquidos estão sendo projetados usando conceitos avançados de segurança (Myasnikov, et al., 1993, Santos e Nascimento, 2002).

Com relação aos conceitos de segurança inerente e passiva adotada nos reatores nucleares de terceira e quarta geração, como nos projetos SAFR, PRISM e outros. Uma das vantagens do uso de bombas eletromagnéticas, no controle de escoamento do refrigerante do circuito primário, é que apresentam perda de carga muito menor, comparado às bombas centrifugas, além de permitir vazão reversa em caso de acidentes, por não terem partes móveis ou pás que aumentariam a perda de carga.

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 e correção de desvios entre dados calculados e experimentais e pode ser utilizado no projeto de bombas eletromagnéticas de corrente contínua e avaliação do seu desempenho no controle do escoamento de metais líquidos em circuitos fechados, que é o principal enfoque deste artigo.

É importante notar que na bomba EM de ímãs permanentes de Samário-Cobalto, os ímãs estão colocados junto ao canal da bomba para minimizar as perdas de campo magnético, este procedimento é indicado no caso do controle de escoamento de Mercúrio, que é líquido a temperatura ambiente. Para os outros metais, há a necessidade de se aquecer e isolar o canal de escoamento o que poderia inviabilizar a utilização deste tipo de bomba, em especial se a temperatura de trabalho for próxima à temperatura de Curie do ímã. Pois, caso os ímãs sejam expostos a temperaturas superiores à de Curie estes perdem suas propriedades magnéticas. Já a bomba eletromagnética de magneto tipo C apresenta várias vantagens, com relação ao controle de campo magnético e possibilidade de isolamento do canal e esta será a utilizada para fins de comparação de resultados para os metais líquidos avaliados.

Neste trabalho apresenta-se o princípio de funcionamento de bombas eletromagnéticas, suas equações básicas, resultados experimentais da bomba eletromagnética de corrente contínua com magneto tipo C e bobinas operando em circuitos a Mercúrio, o programa computacional BEMC-1 e avalia a possibilidade da aplicação de bombas eletromagnéticas de corrente contínua no controle de escoamento de reatores rápidos refrigerados a metais líquidos como Sódio, Chumbo e Bismuto.

Os resultados obtidos nas simulações apresentadas neste trabalho reforçam a possibilidade que a nova geração de reatores rápidos avançados refrigerados a Sódio utilize bombas eletromagnéticas nos circuitos primários e secundários de refrigeração e conclui-se que reatores refrigerados a Chumbo e a Bismuto também podem operar com bombas eletromagnéticas.

## 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).

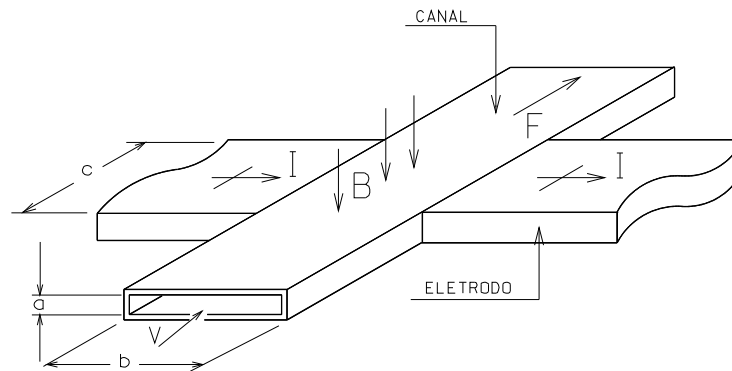


Figura 1. Princípio de funcionamento da bomba eletromagnética de corrente contínua.

### 2.1. Modelo teórico

Pode-se calcular o campo magnético da bomba EM tipo C, 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  $I_{\text{campo}}$  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 ( $\mu$ ) 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:

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

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

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

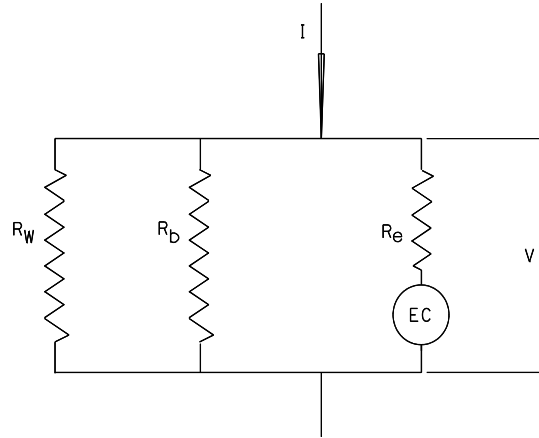


Figura 2. Circuito elétrico equivalente da bomba EM.

A tensão elétrica da bomba é calculada por:

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

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 pode ser obtida pela Eq. (7).

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

A corrente elétrica útil ( $I_e$ ) pode ser calculada, pela Eq. (8), 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 (Watt, 1958). 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 da Eq. (8) é nulo e para o estudo de operação dinâmica (com escoamento de fluido) da bomba EM este termo é diferente de zero.

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

### 3. Método de cálculo

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. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos com o esquema de cálculo do programa BEMC-1.

Escolhido o metal líquido a ser bombeado e as suas propriedades, assim como, a geometria e materiais do canal da bomba, calcula-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 pelas Eq. (4) e (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 pode ser obtida pelas Eq. (4) e (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, fluido a ser bombeado, dados geométricos da bomba EM e do circuito, utilizando o ícone de controle apropriado.

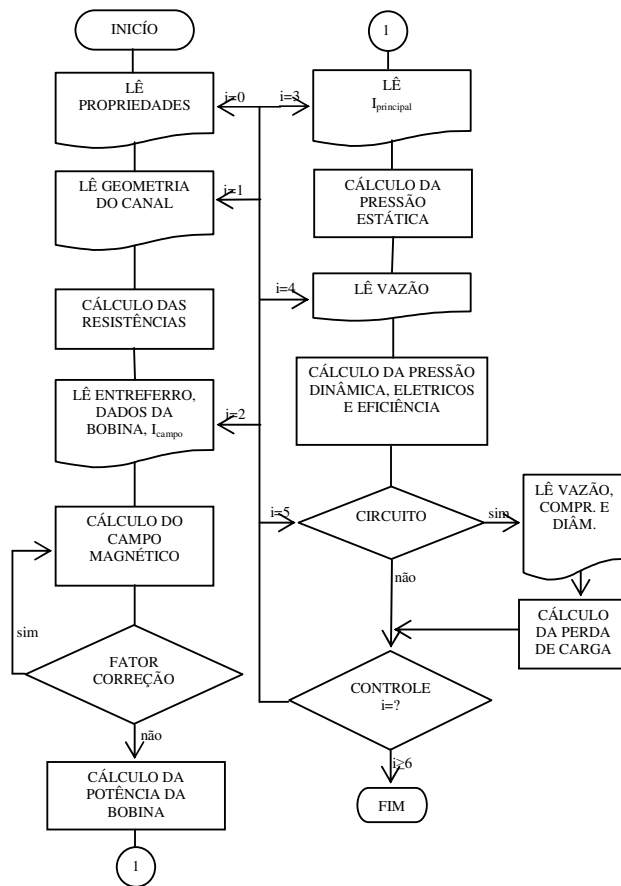


Figura 3. Diagrama de blocos do programa BEMC-1.

#### 4. Avaliações

A bomba eletromagnética de corrente contínua (EM) é formada por um magneto tipo C, com entreferro de 20 mm e 2000 espiras. Com base na geometria do magneto tipo C e do canal da bomba, ou seja, altura do canal (a) de 10 mm, largura do canal (b) de 30 mm e o comprimento útil (c) de 70 mm pode-se, fazer a avaliação experimental de campo magnético, pressão estática e vazão de Mercúrio. Estes dados são comparados aos resultados teóricos, obtidos com o programa BEMC-1, validando-o. Pode-se, ainda, avaliar o desempenho teórico da bomba EM, operando com Mercúrio e com metais líquidos de interesse em reatores nucleares rápidos.

A Figura 4 apresenta o esquema da bomba EM.

A Tabela 1 apresenta as propriedades dos metais líquidos simulados neste trabalho.

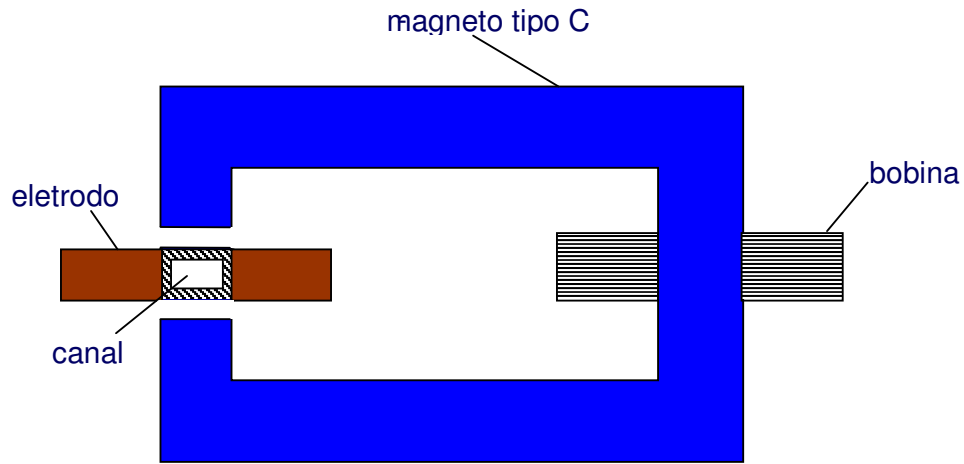


Figura 4. Esquema da bomba EM com magneto tipo C.

Tabela 1. Propriedades dos metais líquidos simulados pelo BEMC-1.

Propriedade \ metal	Mercúrio	Sódio	Chumbo	Bismuto
Temperatura (°C)	20	500	500	500
Resistividade elétrica (ohm.m)	9.3 e-7	2.0 e-7	2.1 e-7	1.34 e-6
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	13400	830	10470	9900
Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )	1.5 e-3	2.4 e-4	1.78 e-3	1.0 e-4

#### 4.1. Campo magnético

A Figura 5 apresenta 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 pela fonte HP-6030 A, com fundo de escala de 10 A.

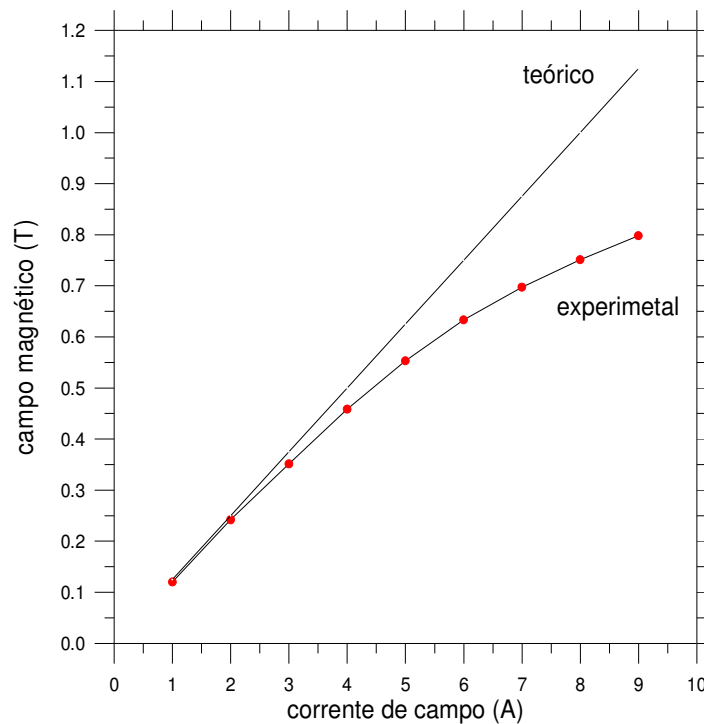


Figura 5. Campo magnético médio no centro do entreferro do magneto tipo C.

Para valores de correntes de campo crescentes a diferença entre os dados teóricos e experimentais se acentua, devido à saturação do magneto tipo C. 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.

Para não se impor novos erros aos resultados obtidos nos cálculos subseqüentes, com o programa BEMC-1, utiliza-se o campo magnético experimental.

A Tabela 2 apresenta os valores teóricos e corrigidos (experimentais) de campo magnético da bomba EM.

Tabela 2. Campo magnético teórico e experimental.

$B[\text{Wb/m}^2] - I_{\text{campo}} [\text{A}]$	2	4	6	8	10
B teórico	0,25	0,5	0,75	1	1,25
B experimental	0,24	0,46	0,63	0,75	0,90

#### 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. 6. Notam-se as tubulações verticais em vidro, onde se pode verificar o deslocamento do mercúrio e o desnível total  $\Delta L$  (pressão estática) produzido pela bomba, 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 fornecido por uma fonte de corrente contínua, com fundo de escala de 800 A, e medindo-se o desnível de mercúrio total ( $\Delta L$ ).

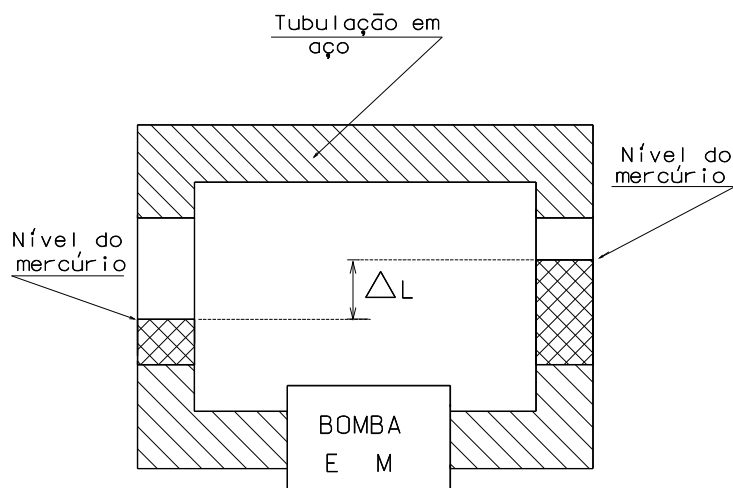


Figura 6. Esquema do circuito experimental para avaliação de pressão estática.

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).

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 ( $I_e$ ) 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. Para Mercúrio tem-se:  $R_w = 15,0 \cdot 10^{-5}$  Ohms e  $R_e = 4,0 \cdot 10^{-5}$  Ohms. Admitindo-se que  $R_b = 5,0 R_e$  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. A Figura 7 apresenta a comparação entre os dados de pressão estática experimental e teórica (obtidos com o BEMC-1).

Comparando-se os dados de pressão estática experimentais e teóricos da bombas EM, nota-se que, utilizando os valores de campo magnético experimentais, os fatores de “bypass” e de correção apropriados no programa BEMC-1, reproduz-se os dados experimentais, com diferenças quase nulas, validando a metodologia de análise utilizada.

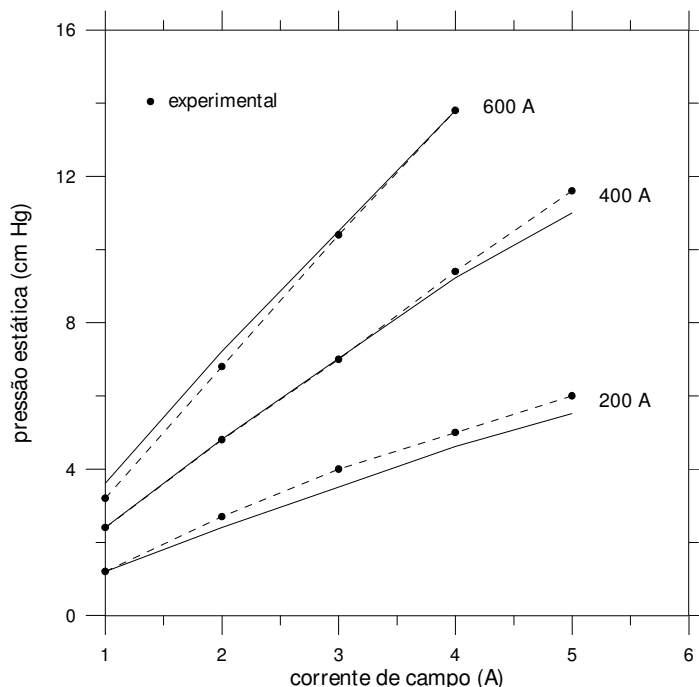


Figura 7. Curvas teóricas e experimentais de pressão estática da bomba EM.

### 4.3. Vazão

Para os ensaios experimentais de operação de bombas eletromagnéticas de corrente contínua é utilizado o circuito dinâmico de Mercúrio, em aço (com diâmetro interno de 0,0122 metros e comprimento equivalente de 3,8 metros), apresentado na Fig. 8. Onde pode-se notar a bomba EM, o medidor de vazão eletromagnético MV e seu sistema de aquisição de dados SD, assim como os medidores de pressão (manômetros) P1 e P2.

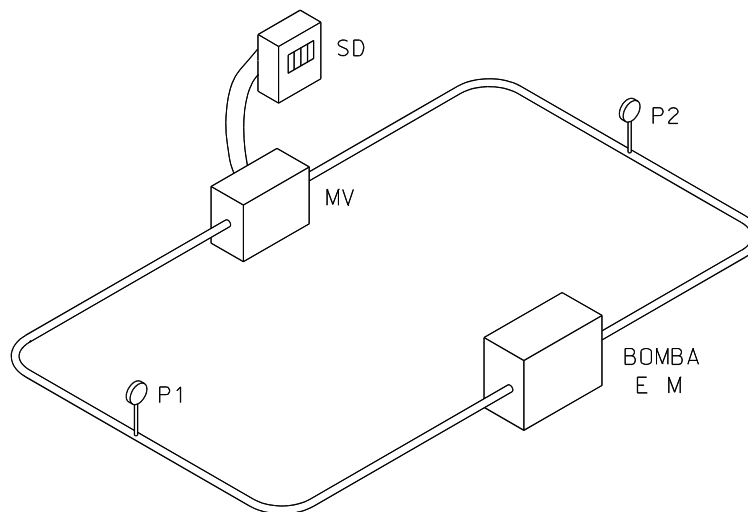


Figura 8. Esquema do circuito dinâmico de Mercúrio para avaliação de bombas EM.

A Figura 9 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, apresentando boa concordância. 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.

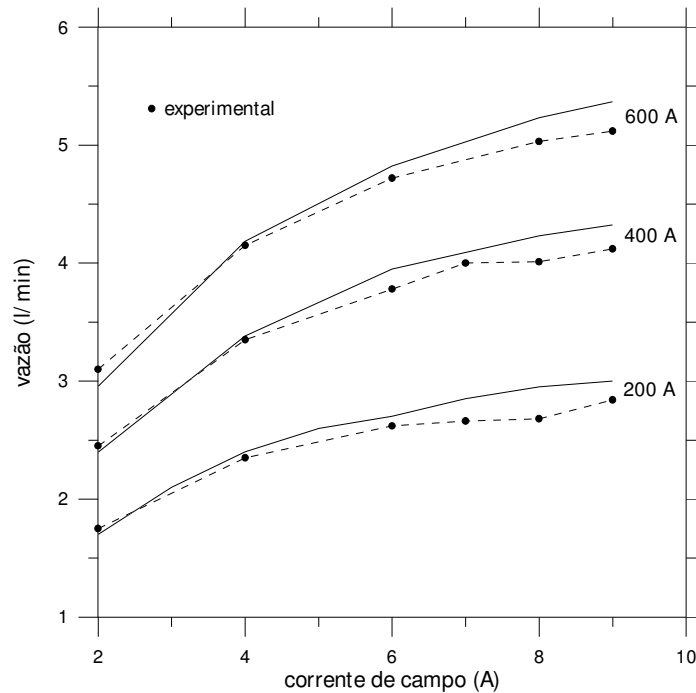


Figura 9. Curvas teóricas e experimentais de vazão da bomba EM com magneto tipo C.

#### 4.4. Desempenho da bomba EM

Observa-se uma boa concordância dos resultados teóricos e experimentais, apresentados nas Figuras 7 e 9, o que valida o programa BEMC-1 e possibilita a avaliação de uso de outros metais líquidos na bomba EM.

Na avaliação teórica de desempenho dinâmico da bomba eletromagnética de corrente contínua deve-se considerar os dados geométricos, as propriedades do fluido a ser bombeado, apresentados na Tabela 1, as correntes elétricas envolvida e as curvas de pressão dinâmica da bomba EM e de perda de carga no circuito (com diâmetro interno de 0,0122 metros e comprimento equivalente de 3,8 metros), em função da vazão, calculadas pelo programa BEMC-1.

A pressão dinâmica teórica da bomba EM pode ser obtida pela Eq. (4). A corrente elétrica útil é calculada pela Eq. (8), considerando todos os seus termos, portanto depende da vazão.

A bomba eletromagnética de corrente contínua (EM) é formada por um magneto tipo C, com entreferro de 20 mm e 2000 espiras. A geometria do canal da bomba é: altura do canal (a) de 10 mm, largura do canal (b) de 30 mm e o comprimento útil (c) de 70 mm. A corrente de campo, fornecida pela fonte HP-6030A (com fundo de escala de 10 A), pode gerar um campo magnético máximo de  $0,90 \text{ Wb/m}^2$ , como apresentado na Tabela 2. Outra fonte de corrente contínua, com fundo de escala de 800 A, fornece a corrente principal, que interage com o campo magnético e produz no fluido (interno ao canal da bomba) a força magneto motriz que controla o escoamento.

Com o BEMC-1 pode-se obter os pontos de operação do sistema, ou seja, a vazão e pressão dinâmica fornecida pela bomba, operando em circuitos fechados, calculando as perdas de carga do circuito em função da vazão do fluido, do seu diâmetro e do comprimento equivalente.

Na Figura 10 apresentam-se as curvas teóricas de desempenho da bomba eletromagnética de corrente contínua com magneto tipo C, para quatro conjuntos de valores de campo magnético e corrente principal e a curva teórica de perda de carga no circuito dinâmico de Mercúrio, em função da vazão, obtidas com o programa 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 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, os valores de campo magnético são diferentes para cada uma delas. Quanto maior a corrente fornecida maior a máxima pressão dinâmica da bomba. O valor de pressão dinâmica teórica é menor para vazões maiores.

Na Figura 10, os pontos teóricos de operação da bomba EM com Mercúrio, em função do campo magnético, da corrente principal aplicada e do circuito usado, são os pontos de interseção.



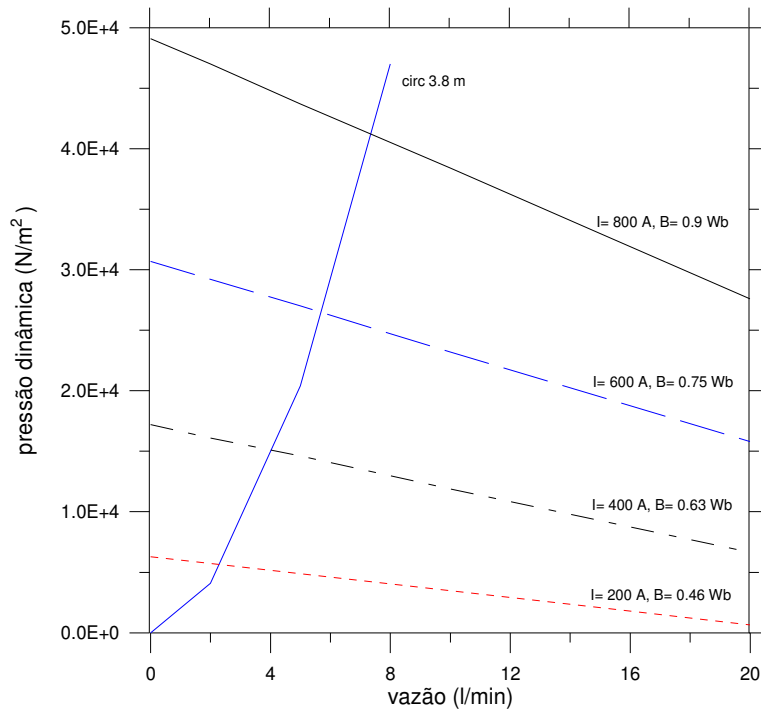


Figura 10. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Mercúrio.

A Figura 11 apresenta as curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Sódio e a curva teórica de perda de carga do circuito dinâmico, obtidas com o BEMC-1.

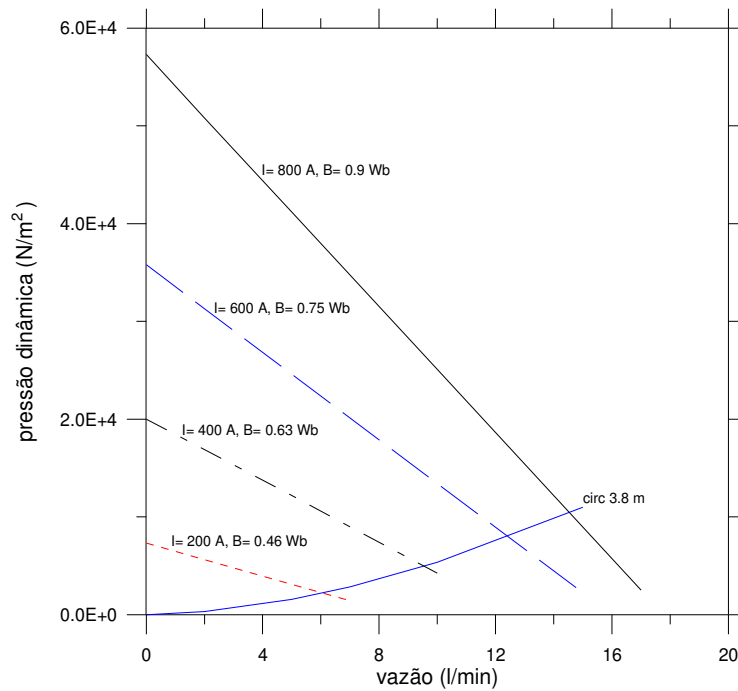


Figura 11. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Sódio.

A Figura 12 apresenta as curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Chumbo e a curva teórica de perda de carga do circuito dinâmico, obtidas com o BEMC-1.

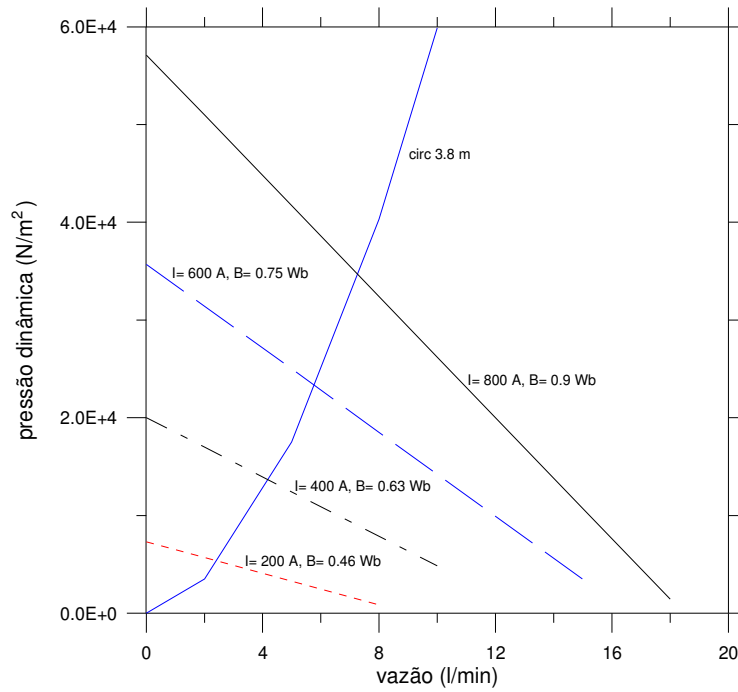


Figura 12. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Chumbo.

A Figura 13 apresenta as curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Bismuto e a curva teórica de perda de carga do circuito dinâmico, obtidas com o BEMC-1.

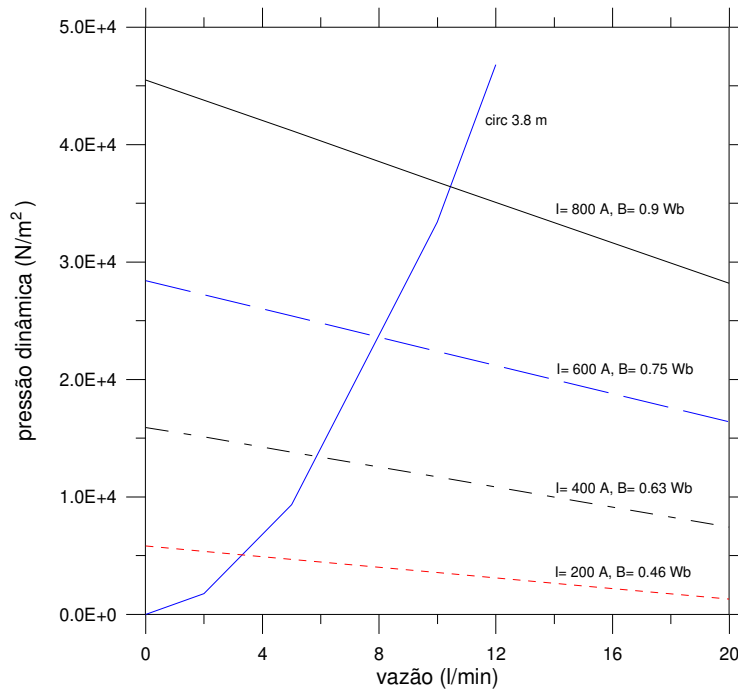


Figura 13. Curvas teóricas de desempenho da bomba EM operando com Bismuto.

A Tabela 3 apresenta os pontos de operação dinâmica da bomba eletromagnética de corrente contínua, operando com a sua máxima capacidade, em função das fontes disponíveis, ou seja, com a corrente principal (I) máxima de 800 A e campo magnético (B) máximo de 0,90 Wb/m<sup>2</sup>, para os metais líquidos simulados com o BEMC-1.

Tabela 3. Pontos de operação da bomba EM para os metais líquidos simulados.

Parâmetro\Fluido	Mercúrio	Sódio	Chumbo	Bismuto
Vazão (l/min)	7,3	14,5	7,2	10,4
Pressão (N/m <sup>2</sup> )	41200	10400	34600	36500

## 5. Comentários e conclusão

As bombas eletromagnéticas utilizam o princípio de Faraday, não contem partes móveis, são totalmente selada, tem alta confiabilidade, e podem controlar o escoamento de um metais líquidos de alta condutividade elétrica num circuito fechado e facilitar a circulação natural do refrigerante, em caso de falhas ou acidentes, em um reator nuclear.

O programa BEMC-1 foi elaborado com o objetivo de se poder avaliar, cada etapa do desenvolvimento de uma bomba eletromagnética de corrente contínua, possibilitando alteração em todos os parâmetros importantes de projeto.

Definido o fluido a ser bombeado e suas propriedades, assim como a geometria e materiais do canal da bomba, calcula-se as resistências elétricas envolvidas. Em seguida são calculados o campo magnético, a pressão estática, a vazão e a pressão dinâmica fornecida pela bomba EM, em função das correntes elétricas impostas. Calcula-se ainda as perdas de carga do circuito em função da vazão do fluido, do seu diâmetro e do comprimento equivalente.

Com o BEMC-1 pode-se avaliar o desempenho de bombas EM operando com os metais líquidos de interesse, obtendo os pontos teóricos de operação do sistema bomba-circuito, definidos pela interseção das curvas dinâmicas da bomba e de perda de carga do circuito, com apresentado na Tab. 3.

No caso de Mercúrio tanto a pressão dinâmica como a perda de carga para a mesma vazão são as maiores entre as avaliadas neste artigo. No caso do Bismuto sua curva de operação é próxima à do Mercúrio, mas com menor perda de carga. As curvas dinâmicas da bomba EM operando com Chumbo e com Sódio apresentam inclinações praticamente iguais, pois as suas resistividades elétricas são muito próximas. A perda de carga para o Sódio apresenta valores inferiores, em função de sua massa específica e de sua viscosidade dinâmica serem menores, mostrando maior facilidade de bombeamento do Sódio comparado aos outros metais líquidos simulados. Portanto para a mesma bomba, sob as mesmas condições, o ponto de operação é diferente em função do fluido.

Os resultados teóricos, obtidos com o BEMC-1, mostraram a viabilidade da utilização de bombas eletromagnéticas para o controle de escoamento de metais líquidos, considerados de interesse para remoção de calor, em reatores nucleares rápidos.

## 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., 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.
- Kwant, W., et al., 1988, "PRISM Reactor Design and Development". Safety of Next Generation Power Reactors Meeting, Washington, USA.
- Lancet, R. T. and Marchaterre, J. F., 1985, "Inherent Safety of the SAFR Plant". In: Proceedings of the International Topical Meeting on FAST REACTOR SAFETY, Tennessee, USA.
- Lentz, G. L., et al., 1985, "EBR-II - Twenty Years of Operation Experience". Symposium on Fast Breeder Reactors: Experience and Trends, Lyon, France.
- Myasnikov, V. O., et al., 1993, "Conceptual Design of Module Fast Reactor of Ultimate Safety Cooled by Lead-Bismuth Alloy", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **67**, 1, pp. 151, USA.
- 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.
- Santos, A. and Nascimento, J. A., 2002, "An Integral Lead Reactor Concept for Developing Countries", *Nuclear Technology*, **140**, 3, pp. 233 - 254, USA.
- Watt, D. A., 1958, "The Design of Electromagnetic Pumps for Liquid Metals". Atomic Energy Research Establishment, Harvel, Berkshine, AERE R/R 2572, USA.

## **LIQUID METAL FLOW CONTROL BY DC ELECTROMAGNETIC PUMPS.**

Eduardo Madeira Borges

Institute for Advanced Studies (IEAv ), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil

e-mail: eduardo@ieav.cta.br

Francisco Antonio Braz Filho

Institute for Advanced Studies (IEAv), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil

e-mail: fbraz@ieav.cta.br

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Institute for Advanced Studies (IEAv), Sao Jose dos Campos, SP, Brazil

e-mail: guimarae@ieav.cta.br

### **Abstract**

The cooling system of high-density thermal power requires fluids of high thermal conductivity, such as liquid metals. Electromagnetic pumps can be used to liquid metal fluid flow control in cooling circuits. The operation of electromagnetic pumps used to flow control is based on Lorentz force. This force can be achieved by magnetic field and electric current interaction, controlled by external independent power supplies. This work presents the electromagnetic pump operational principles, the IEAv development scheme and the BEMC-1 simulation code. The theoretical results of BEMC-1 simulation are compared to electromagnetic pump operation experimental data, validating the BEMC-1 code. This code is used to evaluate the DC electromagnetic pump performance applied to Mercury flow control and others liquid metal such as Sodium, Lead and Bismuth, used in nuclear fast reactors.

Keywords: liquid metal, electromagnetic pump, fluid flow control.