

## EFICIÊNCIA DE BOMBA ELETROMAGNÉTICA DE CORRENTE CONTÍNUA DE IMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS

**Eduardo M. Borges** - e-mail: eduardo@ieav.cta.br

**Francisco A. Braz Filho** - e-mail: fbraz@ieav.cta.br

**Lamartine N. F. Guimarães** - e-mail: guimarae@ieav.cta.br

**Francisco Sircilli Neto** - e-mail: sircilli@ieav.cta.br

**Angelo Passaro** - e-mail: angelo@ieav.cta.br

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

**Resumo.** *O controle de vazão de um fluido condutor elétrico pode ser feito por bombas eletromagnéticas de corrente contínua, em função do campo magnético e da corrente elétrica principal fornecidos. Neste trabalho apresenta-se: o projeto da bomba eletromagnética de corrente contínua com imãs permanentes de samário-cobalto, os esquemas de simulação e ensaios usados para se definir a geometria final da bomba, suas características operacionais e dados de eficiência.*

**Palavras-chave:** *Bombas eletromagnéticas, Simulação computacional, Metal líquido.*

### 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 o controle de vazão de um fluido condutor elétrico. Estas características as tornam interessantes para serem utilizadas em reatores nucleares rápidos refrigerados a metal líquido (Borges, et al., 1994).

Neste trabalho apresenta-se o projeto da bomba eletromagnética (EM) de corrente contínua com imãs permanentes de samário-cobalto (para a geração de campo magnético); o esquema de simulação e ensaios usado para se definir a geometria final da bomba e suas características operacionais; os dados de campo magnético obtidos experimentalmente, em função da geometria do equipamento; os dados obtidos nos ensaios de pressão estática da bomba EM, em função do campo magnético e da corrente fornecida; os resultados dos ensaios dinâmicos (vazão não nula) da bomba EM, que funcionou satisfatoriamente no controle do escoamento de mercúrio líquido; e simulações com o BEMC-1 (programa computacional desenvolvido para análise e projeto de bombas EM de corrente contínua), incluindo os dados de eficiência da bomba eletromagnética de imãs permanentes de samário-cobalto.

## 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 Figuras 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).

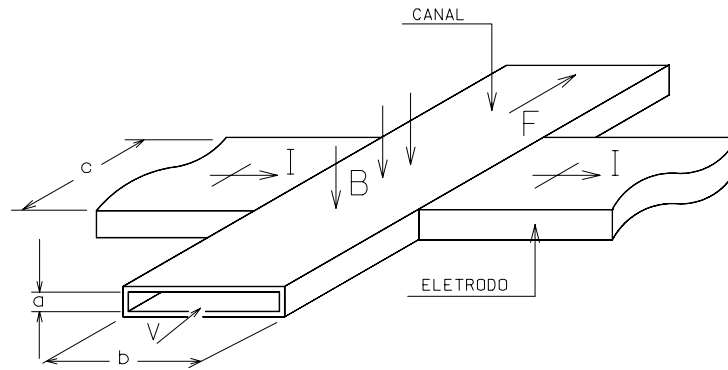


Figura 1 - Princípio de funcionamento da bomba eletromagnética de corrente contínua.

### 2.1 Formulação do problema

A tensão elétrica da bomba é dada por:

$$V = I_e R_e + E_c = I R_t \quad . \quad (1)$$

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 é calculada por:

$$E_c = B w / a \quad . \quad (2)$$

Nota-se que a corrente elétrica útil ( $I_e$ ) é uma função da vazão volumétrica ( $w$ ).

Considerando-se a perfeita perpendicularidade entre o campo magnético ( $B$ ), 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 ( $I_e$ ), pela equação:

$$F = B I_e b \quad . \quad (3)$$

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

$$P = F / (a b) \quad . \quad (4)$$

Substituindo na Eq. (3) tem-se:

$$P = B I_e / a \quad , \text{ em } [N/m^2] \quad ; e \quad (5)$$

$$P = B I_e / ( a 1360 ) , \text{ em [cm Hg] } . \quad (6)$$

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.

$$I_e = \frac{I}{1 + R_e \left( \frac{R_w + R_b}{R_w R_b} \right)} - \frac{E_c}{R_e + \frac{R_w R_b}{R_w + R_b}} . \quad (7)$$

Observa-se nesta equação que no estudo de pressão estática, ou seja, com vazão nula, o último termo é nulo e no cálculo de pressão dinâmica, ou seja, 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 avaliações: do campo magnético, da pressão estática, de vazão e sua respectiva pressão dinâmica e de 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 as resistências elétricas envolvidas.

No caso do estudo de ímãs permanentes pode-se fornecer o campo magnético médio.

O cálculo da pressão estática, que fornece os limites operacionais da bomba, é feito em função do campo e da corrente elétrica imposta, considerando nulo o último termo da Eq. (7).

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. GEOMETRIA DA BOMBA

Para a definição do dimensionamento dos magnetos, compostos por ímãs permanentes de samário-cobalto, foi realizado um estudo, por meio de simulações computacionais com o programa LMAG2D (Abe et al., 1996), da distribuição de indução magnética no canal da bomba, em função de sua geometria.

Pretende-se colocar os ímãs em contato com o canal, separados apenas com finas camadas isolantes. Deste modo, define-se a distância entre os ímãs somando-se a altura do

canal ( $a = 10$  mm), com duas vezes a espessura da parede de aço (1 mm), obtendo-se um entreferro ( $d$ ) de 12 mm. Outro parâmetro geométrico importante é o comprimento ativo da bomba ( $c$ ), que neste caso admite-se igual ao do barramento de cobre, ou seja, 70 mm. Por fim a largura útil do canal ( $b$ ) de 30 mm complementa os dados geométricos necessários à definição dos magnetos permanentes.

Com base nas simulações computacionais de (Borges et al., 1996), decidiu-se pela utilização de magnetos permanentes de samário-cobalto com 60 mm de espessura para a geração de campo. A empresa especializada ERIEZ Ltda. fornece imãs com dimensões máximas úteis de 12 por 23 por 30 mm, o que torna necessário a aquisição de vários imãs para se compor os magnetos permanentes. Dois conjuntos de imãs, denominados ERIMAX-1 e ERIMAX-2, foram testados (ERIEZ Ltda.).

Após a magnetização individual dos imãs na direção desejada (12 mm), estes são justapostos, em um total de cinco imãs (totalizando 60 mm), para compor os blocos construtivos, que por sua vez deverão ser colocados lado a lado, de modo a se obter os magnetos nas dimensões desejadas. Decidiu-se montar os magnetos da bomba EM com a largura máxima útil de um único imã (30 mm), que corresponde a largura do canal. Deste modo, o comprimento total dos magnetos é definido pelo número total de blocos construtivos colocados lado a lado.

## 5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Campo magnético

O desempenho da bomba EM depende do campo magnético gerado pelos imãs. Na Figura 2 são comparadas as curvas de densidade de campo obtidas por simulação computacional com o programa LMAG2D e nos ensaios experimentais dos magnetos ERIMAX-1 e ERIMAX-2, com quatro blocos construtivos. Nota-se que o campo magnético médio teórico na região de interesse (no comprimento ativo da bomba EM) é  $0,52$  [ $\text{Wb}/\text{m}^2$ ].

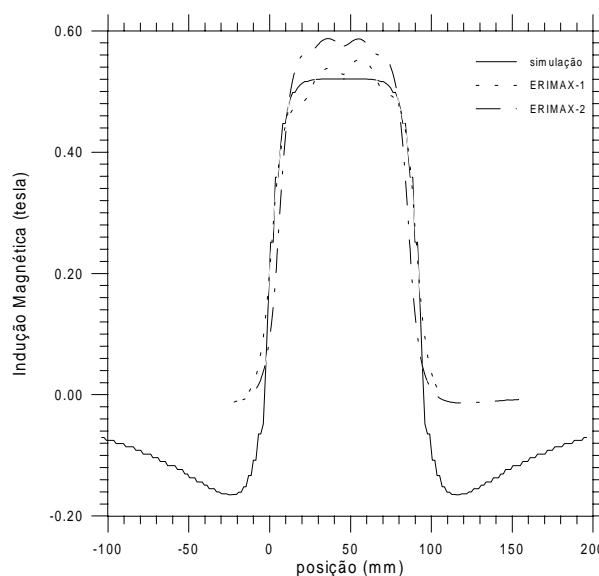


Figura 2 - Comparação de distribuição de campo magnético teórico e experimental.

A curva experimental de indução magnética na direção perpendicular ao canal da bomba EM, ao longo da sua largura é apresentada na Figura 3. Nota-se o efeito de borda, variação de campo próximo ao contorno do magneto, apresentando inversão de sinal na região externa.

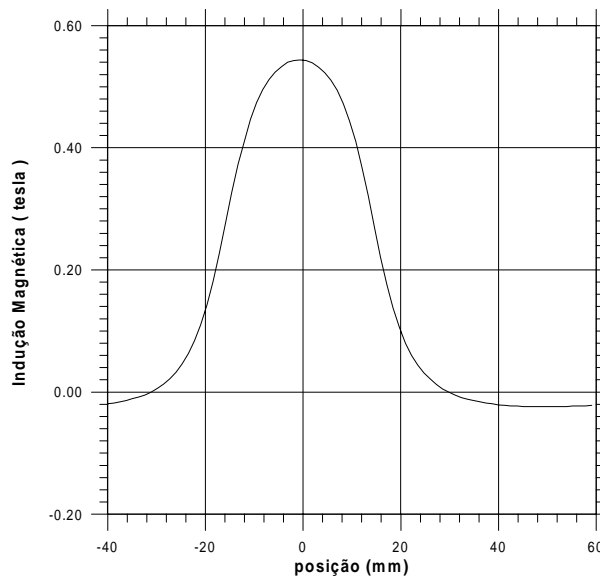


Figura 3 - Campo magnético experimental na direção da largura do canal (no centro).

O ponto zero representa o centro do ímã. Nota-se que 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 pode-se considerar  $B = 0,44 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$ , como o valor de campo magnético médio no comprimento ativo do canal, a ser usado nos cálculos teóricos de pressão manométrica da bomba EM com magnetos de samário-cobalto ERIMAX-1.

## 5.2 Pressão estática da bomba EM

A avaliação teórica da pressão estática da bomba EM de corrente contínua pode ser obtida pela Eq. (6). Nota-se que o campo magnético na região de interesse para a geometria do canal especificado e com os blocos de ímãs de samário-cobalto já foi calculado no item anterior, valendo  $0,44 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$ . Observa-se que este valor de campo médio teórico também é assumido para três e cinco blocos construtivos. A corrente principal ( $I$ ) fornecida à bomba deve ser corrigida pela Eq. (7), considerando o último termo desta equação nulo, para se obter o valor da corrente útil ( $I_e$ ). Para tanto deve-se considerar as resistividades elétricas dos materiais usados, na temperatura de trabalho e a geometria do canal da bomba. Tem-se:  $R_w = 15,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ohms}$  e  $R_e = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ohms}$ . Admitindo-se que  $R_b = 5,0 R_e$ , obtêm-se  $I_e = 0,68 I$ . Como  $a = 0,01 \text{ m}$ , a pressão estática teórica da bomba pode ser calculada, em função da corrente elétrica principal por:

$$P = 0,022 I \text{ [cm Hg]} \quad (8)$$

A Eq. (8) define os limites teóricos de operação desta bomba EM de corrente contínua.

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 Figura 4. Nota-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 EM, as demais partes do circuito são feitas em aço.

Os dados experimentais de pressão estática da bomba EM são obtidos variando-se o valor da corrente principal e medindo-se o desnível de mercúrio total ( $\Delta L$ ). Este é o máximo  $\Delta P$  da bomba, para o respectivo valor de corrente.

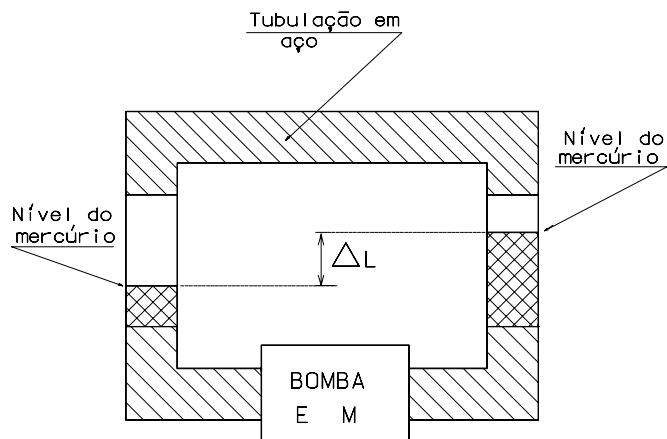


Figura 4 - Esquema do circuito experimental para avaliação de pressão estática.

Na Figura 5 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 coincide com a curva teórica. Usou-se ímãs ERIMAX-1 nestes ensaios.

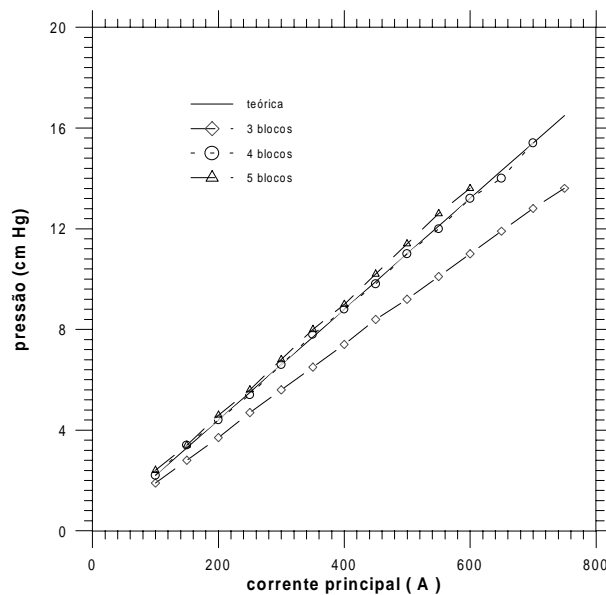


Figura 5 - Curvas de pressão estática teórica e experimental da bomba EM com ímãs.

### 5.3 Avaliação teórica e ensaios dinâmicos da bomba EM

Para a avaliação do desempenho da bomba EM de corrente contínua com imãs permanentes foi utilizado o circuito dinâmico de mercúrio, apresentado na Figura 6.

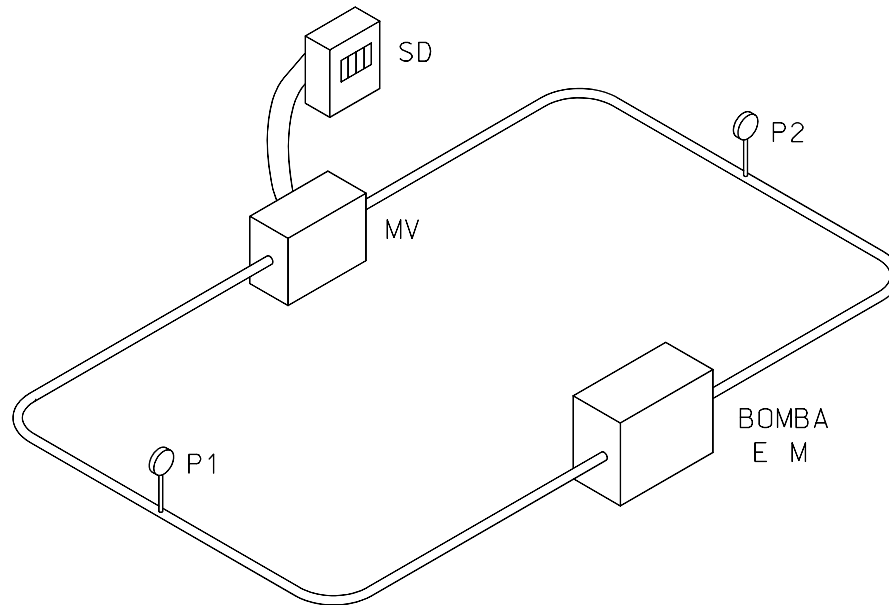


Figura 6 - Esquema do circuito dinâmico de mercúrio para avaliação de bombas EM.

A diferença de pressão ( $\Delta P$ ) que corresponde a perda de pressão no circuito, devido ao escoamento do mercúrio líquido, é obtida com a leitura dos manômetros P1 e P2 em [atm]. A diferença deve ser transformada em [cm de Hg] multiplicando-a por 76; o resultado deve ser novamente multiplicado por 2, pois as leituras são obtidas em metade do percurso total do líquido no circuito. Este dado define o  $\Delta P$  da bomba EM.

A vazão é controlada pela corrente principal fornecida à bomba. Os valores de vazão são obtidos pelo medidor de vazão eletromagnético MV e podem ser lidos em litros por minuto [l/min] no sistema de aquisição de dados SD.

Na Figura 7 são apresentadas as curvas teóricas fornecidas pelo BEMC-1 de perda de carga do circuito experimental ensaiado (com 3,8 metros de comprimento equivalente) e a curva dinâmica (vazão-pressão) fornecida pela bomba EM.

Na Figura 7 tem-se, também, os pontos experimentais de atuação do sistema bomba-circuito e a barra de erro de leitura de vazão correspondente, para a operação da bomba eletromagnética de corrente contínua de quatro blocos construtivos de imãs permanentes de samário-cobalto ERIMAX-2, no circuito dinâmico de mercúrio. A temperatura ambiente na data da experiência era de 25 graus C.

Observa-se que a diferença de pressão obtida pela leitura de pressão de dois manômetros é confiável, não apresentando oscilações, enquanto que as leituras de vazão, pelo medidor eletromagnético, apresenta alguma incerteza, com maior oscilação para o último ponto. Nota-se ainda, que os dados experimentais de operação do sistema estão bastante coerentes, se aproximando bastante da curva teórica de perda de carga do circuito, e com valores menores que os respectivos pontos da curva teórica dinâmica da bomba EM. Verifica-se a coerência dos resultados obtidos, já que os dados teóricos de perda de carga total (devido ao escoamento do mercúrio) são inferiores aos respectivos  $\Delta P$  dinâmicos teóricos fornecidos pelo BEMC-1.

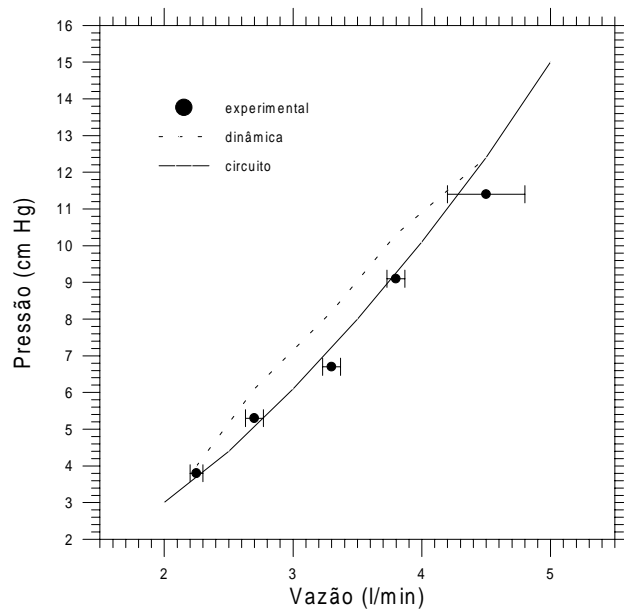


Figura 7 - Dados teóricos e de ensaio dinâmico da bomba EM com ímãs permanentes.

Na Figura 8 apresenta-se várias curvas teóricas dinâmicas da bomba EM de ímãs, obtidas com o BEMC-1, para correntes possíveis, em função das fontes disponíveis. Elas são retas paralelas, 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.

Observa-se que 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 e portanto com a vazão.

Nota-se ainda na Figura 8, as curvas teóricas de perda de pressão de circuitos para diferentes comprimentos equivalentes, obtida pelo BEMC-1. Os pontos teóricos de operação da bomba, em função da corrente aplicada e do circuito usado, são os pontos de interseção.

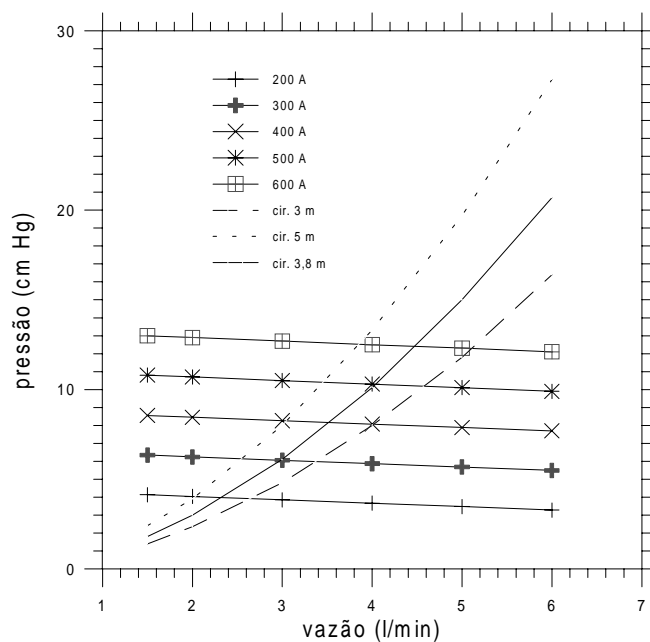


Figura 8 - Curvas teóricas dinâmicas da bomba e de perda de pressão de circuitos.



Nota-se na Figura 9 que o ponto de máxima eficiência teórica da bomba EM, obtida com o BEMC-1, para a corrente de 200 [A], foi da ordem de 28 %, para a vazão de 8 [l/min]. As curvas de eficiência, para outros valores de correntes, apresentam comportamento semelhante, com máxima eficiência em vazões maiores para correntes maiores.

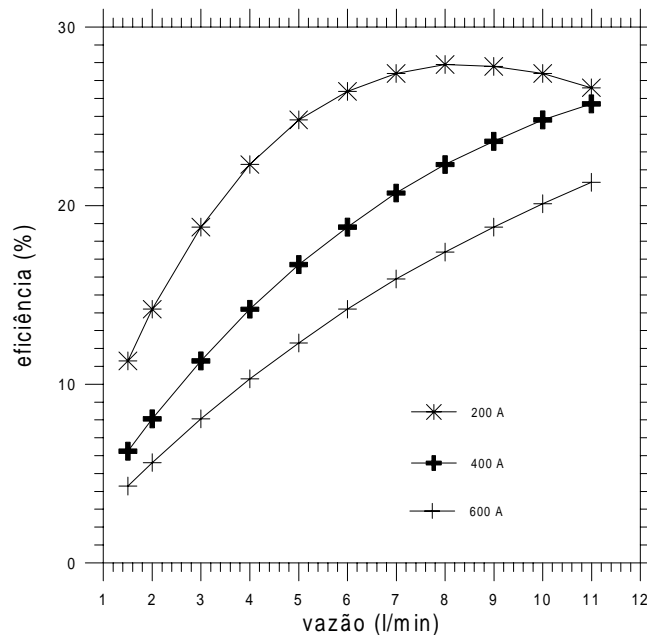


Figura 9 - Curvas de eficiência da bomba eletromagnética de imãs permanentes.

## 6. CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Para se ter um campo magnético médio no canal, compatível com a necessidade de operação da bomba eletromagnética de corrente contínua, gerado por magnetos permanentes de samário-cobalto, é necessário a utilização de vários imãs, a fim de se obter as geometrias desejadas.

O esquema de cálculo usado para a avaliação teórica de campo magnético médio no canal da bomba EM é satisfatório, já que os dados experimentais confirmam os resultados das simulações efetuadas.

A curva de pressão estática experimental obtida para três blocos construtivos apresenta perda em relação à de quatro blocos, que aproveita melhor o potencial da bomba EM. Com cinco blocos construtivos as perdas por inversão da força, devido ao efeito de borda, são minimizadas, melhorando relativamente pouco o seu desempenho, mas aumentando o seu custo final em vinte e cinco por cento.

Os valores de pressão estática (com vazão nula) teórica, obtida pela Eq. (8) e observada no BEMC-1, representam o limite máximo de pressão manométrica que a bomba EM com imãs de samário-cobalto ERIMAX-1 pode fornecer, em função da corrente total.

Os ensaios realizados no circuito dinâmico forneceram os pontos de atuação da bomba EM com imãs de samário-cobalto ERIMAX-2 neste circuito experimental. As perdas de pressão medidas são o resultado do escoamento do mercúrio líquido.

Os dados das simulações com o BEMC-1, comparados aos resultados experimentais validam o programa, que pode ser usado no projeto de bombas EM de corrente contínua, incluindo a avaliação de sua eficiência.

## 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.
- 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, Anais do V Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Borges, E. M.; et al., 1996, Rare-Earth Magnets Applied to Liquid Metal Flow, Proceedings of the XIV International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, São Paulo, SP, Brasil.
- ERIEZ Ltda., Catalogo ERIMAX - ímãs permanentes de samário-cobalto.

## EFFICIENCY OF RARE-EARTH MAGNETS DIRECT CURRENT ELECTROMAGNETIC PUMP

**Abstract.** *The electricity conductor fluid flow can be controlled by direct current electromagnetic pumps by the magnetic induction field intensity and by the electric current inputs. In this work are presented the rare-earth magnets direct current electromagnetic pumps project, theoretical and experimental evaluations used to define pump geometry, your operational characteristics and efficiency data.*

**Key-words:** *Electromagnetic pumps, Computational simulation, Liquid metal.*