

## **SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA BOMBA ELETROMAGNÉTICA TERMOELÉTRICA CIRCULAR**

Eduardo Madeira Borges, [eduardo@ieav.cta.br](mailto:eduardo@ieav.cta.br)  
Francisco Antonio Braz Filho, [fbraz@ieav.cta.br](mailto:fbraz@ieav.cta.br)  
Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, [guimarae@ieav.cta.br](mailto:guimarae@ieav.cta.br)  
Giannino Ponchio Camillo, [giannino@ieav.cta.br](mailto:giannino@ieav.cta.br)

Instituto de Estudos Avançados – IEAv, Rodovia dos Tamoios, Km 5,5, São José dos Campos, SP, CEP: 12228-001.

**Resumo:** *O objetivo deste trabalho é simular e avaliar o desempenho de uma bomba eletromagnética termoelétrica (EMTE) circular, que poderá ser utilizada no controle de escoamento dos circuitos primário e secundário de lítio líquido de um reator nuclear espacial similar ao SP-100. As simulações da bomba EMTE, os cálculos das perdas de carga nos circuitos primário e secundário do reator espacial e a avaliação dos pontos de atuação dos sistemas, em função da potência térmica do reator em estudo, são executadas com o programa BEMTE-3 e demonstram o bom funcionamento deste sistema térmico.*

**Palavras-chave:** *bomba eletromagnética, reator nuclear espacial, simulação computacional, energia*

### **1. INTRODUÇÃO**

Um dos requisitos necessários para se alcançar os objetivos de uma missão espacial, bem como para o bom funcionamento de satélites e estações espaciais, é o suprimento adequado de energia elétrica. As principais fontes de energia elétrica que podem ser utilizadas no espaço são: células solares, baterias químicas, geradores termoelétricos a radioisótopos (GTR), e reatores nucleares. Cada uma delas apresenta características e limitações que definem a escolha do sistema a ser utilizado em função da missão desejada. Atualmente, para missões em órbita terrestre que necessitam de potências elétricas superiores a 40 KWe e para as interplanetárias acima de 20 KWe, os reatores nucleares oferecem a melhor solução de geração elétrica entre as possíveis (Truscello, 1984).

Na Figura 1 pode-se observar a faixa de utilização das fontes de energia elétrica disponíveis para aplicação espacial, em função dos níveis de potência fornecida e do tempo de duração da missão.

O programa de Tecnologia de Reatores Rápidos Avançados (TERRA) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), desenvolve equipamentos e sistemas de interesse para aplicação em reatores rápidos avançados para uso em terra e no espaço (Guimarães, 2008). Uma possível aplicação deste tipo de tecnologia é a geração de energia elétrica no espaço, utilizando um sistema similar ao do projeto norte americano SP-100 de reatores espaciais, iniciado na década de 80, e que ainda apresenta muitos sistemas em desenvolvimento (Armijo, 1989 e Atwell, 1989).

O objetivo deste trabalho é simular e avaliar o desempenho de uma bomba eletromagnética termoelétrica (EMTE) circular, que poderá ser utilizada no controle de escoamento dos circuitos primário e secundário de lítio líquido de um reator nuclear espacial similar ao SP-100.

### **2. PROJETO SP-100**

Desde 1983 está sendo desenvolvido nos USA o projeto de reatores nucleares espaciais SP-100, para geração elétrica na faixa de 100 a 1000 KW elétricos. Neste projeto o calor é gerado em um núcleo de um reator rápido, compacto refrigerado a lítio líquido, a energia elétrica é produzida em corrente contínua por conversores termoelétricos e o controle de escoamento nos circuitos primário e secundário é feito por bomba eletromagnética termoelétrica.

Sistemas de refrigeração que utilizam metal líquido como fluido de trabalho podem resfriar as altas densidades de potência térmica de núcleos de reatores rápidos, que podem utilizar bombas eletromagnéticas para o controle de escoamento dos circuitos.

Sem partes móveis e com alta confiabilidade, bombas eletromagnéticas podem controlar o escoamento de um metal líquido de alta condutividade elétrica e térmica num circuito fechado. Estas características tornam este tipo de equipamento útil em sistemas projetados para não sofrer manutenção, como os espaciais.

Na Figura 2 é apresentado o esquema completo de um sistema de geração elétrica utilizando um reator nuclear espacial com conversão termoelétrica. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características do projeto SP-100.

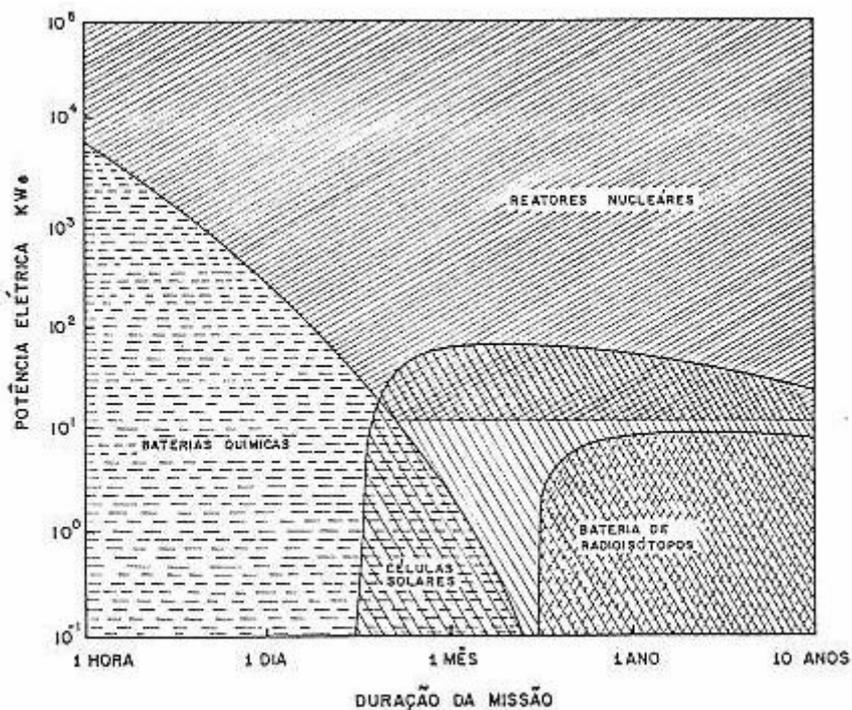


Figura 1. Faixa de aplicação das fontes de energia no espaço.

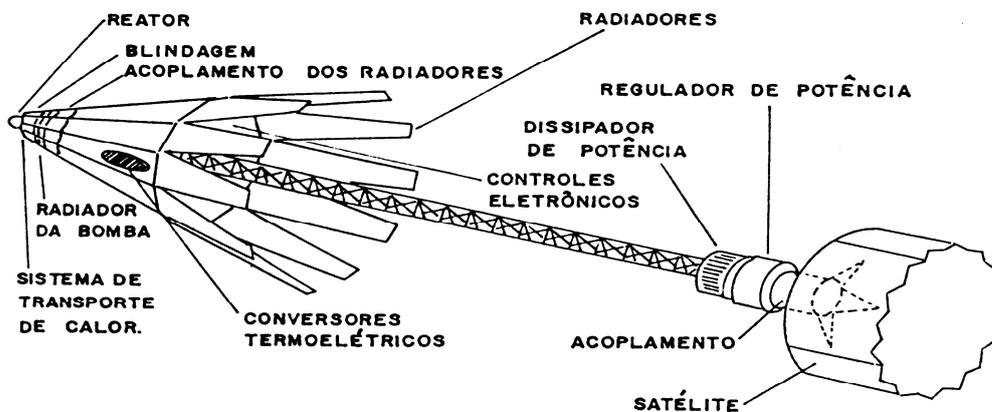


Figura 2. Conceito do sistema nuclear espacial de geração elétrica.

Tabela 1. Características do Projeto SP-100.

Objetivo	Geração elétrica
Início do projeto	1983
Potência nominal	100 a 1000 KWe
Tipo de reator nuclear	Rápido
Sistema de geração	Conversor termoeletrico
Radiação	Tubos de calor
Refrigerante	Lítio líquido
Controle de escoamento	Bomba EMTE

### 3. PROGRAMA BEMTE-3

Para o estudo e simulação de um reator nuclear espacial do tipo SP-100 é necessário conhecer como operam circuitos de refrigeração, conversores termoeletricos, trocadores de calor e radiadores e relacioná-los à operação da bomba em função da potência do reator.

Para se determinar o ponto de atuação do reator nuclear espacial, é indispensável a simulação da bomba EMTE, assim como, os outros componentes térmicos e hidráulicos do sistema, já que todos os parâmetros de funcionamento estão interligados. Para tanto, utilizou-se o programa BEMTE-3 (Borges, 2009), que é a versão atualizada para micro computador do programa BEMTE desenvolvida em FORTRAN na década de 90 (Borges, 1991).

O BEMTE-3 resolve, iterativamente, as equações de interesse para analisar o comportamento de bombas eletromagnéticas termoeletricas controlando o escoamento dos circuitos de refrigeração de um reator nuclear espacial rápido, em função da sua potência térmica e da geometria dos circuitos de refrigeração calculando-se iterativamente as perdas de carga em função da vazão da bomba, bem como, de bombas eletromagnéticas de corrente contínua em estado estacionário.

No BEMTE-3 o conversor termoeletrico é modelado calculando-se a distribuição de temperatura em cada termoelemento, resolvendo a equação diferencial de condução de calor numericamente, obtendo-se o valor da resistência elétrica interna e a tensão Seebeck gerada pelos conversores termoeletricos, em função dos dados geométricos, parâmetros de conversão e da diferença de temperatura imposta aos seus terminais, que é função da potência do reator. Obtêm-se assim corrente elétrica, que circula nos canais da bomba EMTE. O programa calcula o campo magnético gerado no magneto central em função da corrente elétrica que o circunda e a altura dinâmica fornecida pela bomba para os circuitos de refrigeração, que é obtida da interação do campo magnético com a corrente elétrica útil em cada canal, utilizando os equacionamentos de Barnes (1953) e Blake (1956).

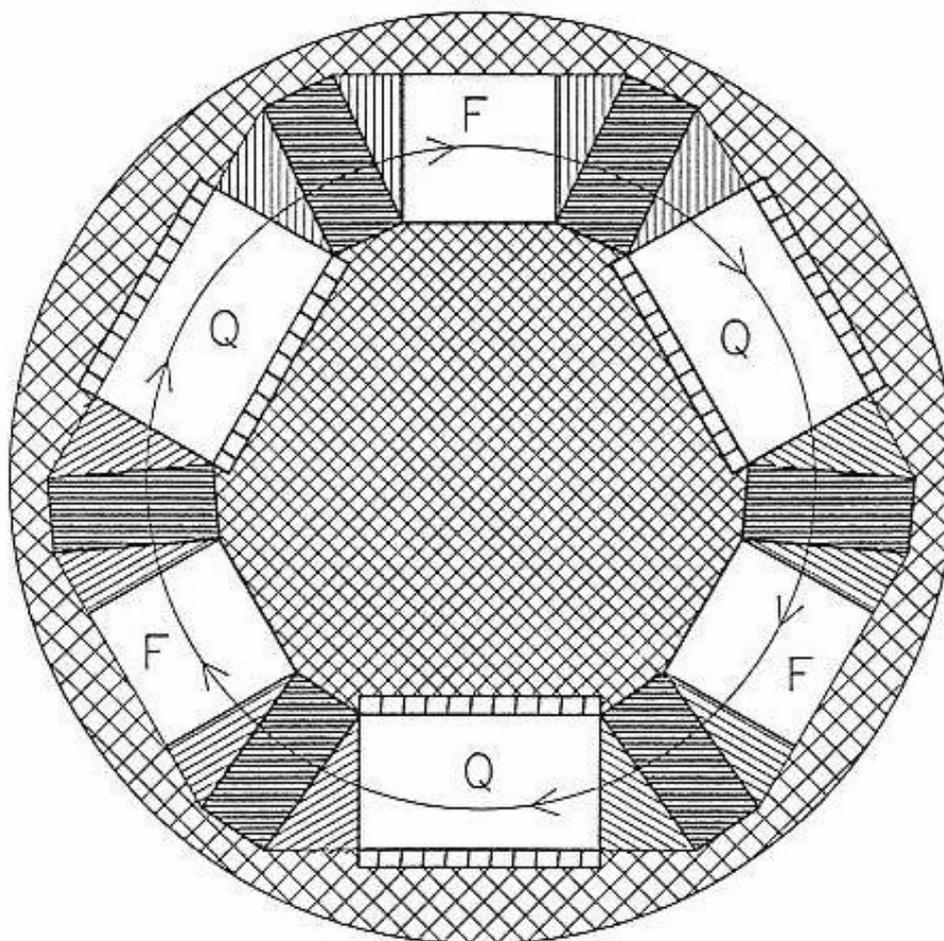
### 4. BOMBA EMTE CIRCULAR

Neste trabalho está sendo simulada uma bomba eletromagnética termoeletrica circular, que pode controlar sozinha o escoamento de lítio líquido nos circuitos de refrigeração primário e secundário do reator nuclear espacial. Diferentemente do reator SNAP-10, que utilizava ímãs permanentes para a geração de campo magnético (Johnson, 1973). Com o esquema estrutural da bomba eletromagnética termoeletrica circular e o uso de termoelementos elimina-se a necessidade do uso de ímãs permanentes para a geração de campo magnético, tornando-a mais compacta e leve, podendo assim, diminuir consideravelmente o peso total do sistema termo-hidráulico. A bomba EMTE utiliza como material ferromagnético o Hyperco-27, que apresenta uma elevada temperatura de Curie (temperatura na qual o material perde as suas propriedades eletromagnéticas), da ordem de 1240 K. Na Tabela 2, são apresentadas as principais características e dados geométricos da bomba EMTE circular.

**Tabela 2. Parâmetros da bomba EMTE circular.**

Altura do canal (a)	1,784 cm
Largura do primário (bp)	2,676 cm
Largura do secundário (bs)	0,657 cm
Comprimento útil (c)	25,5 cm
Espessura da parede	0,076 cm
Comprimento dos termoelementos	0,30 cm
Material dos termoelementos	SiGe/GaP
Material do magneto	Hyperco-27
Temperatura de Curie do magneto	1240 K

As Figuras 3 e 4 apresentam o esquema de funcionamento da bomba EMTE circular. Notam-se seis canais, sendo três quentes (por onde escoo lítio da perna quente do circuito primário) e três frios (por onde escoo lítio da perna fria do circuito secundário). Observa-se que os canais quentes estão cercados por canais frios e vice versa. Entre os canais de escoamento estão os conversores termoeletricos. São utilizados três termoelementos do tipo P (que geram corrente elétrica no mesmo sentido que transferem calor, ou seja, da perna quente para a perna fria) e três do tipo N (que geram corrente elétrica no sentido contrário, ou seja da perna fria para a perna quente), logo a corrente elétrica gerada pelos seis termoelementos utilizados se somam. A corrente elétrica gerada atravessa os canais de fluido e placas condutoras fechando o circuito elétrico, envolvendo a parte central do magneto circular e induzindo, portanto um campo magnético. A interação entre o campo magnético e a corrente elétrica nos canais produz a força magneto motriz, que controla o escoamento do fluido de trabalho, dos circuitos de refrigeração do reator nuclear espacial.



-  CONDUTOR ELÉTRICO
-  ISOLANTE TÉRMICO
-  TERMOELEMENTO
-  REFRIGERANTE
-  MAGNETO
- F CANAL FRIO
- Q CANAL QUENTE
- CORRENTE ELÉTRICA

Figura 3. Esquema da bomba EMTE circular.

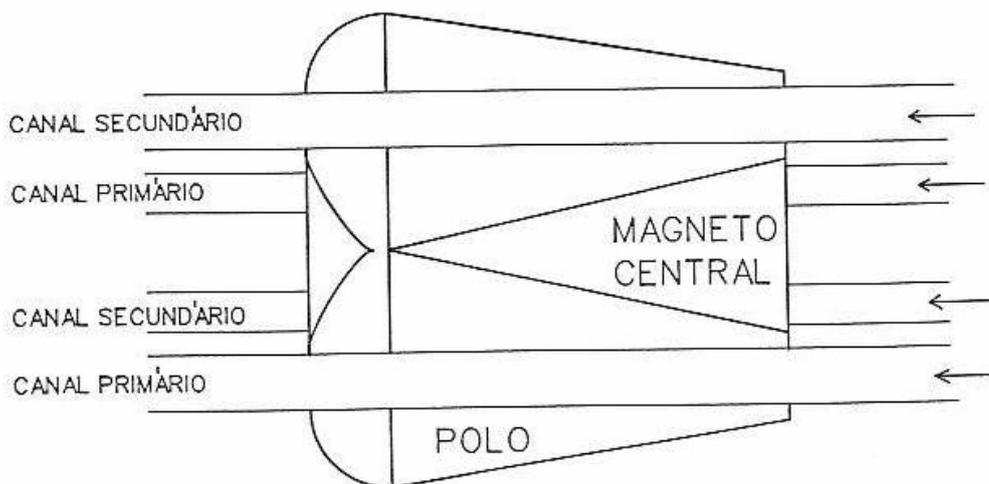


Figura 4. Corte longitudinal da bomba EMTE circular.

## 5. SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO

Na Figura 5 pode-se observar o esquema de acoplamento termo-hidráulico considerado nesta simulação, ou seja, o núcleo do reator é refrigerado pelo circuito primário, que troca calor em contracorrente com o secundário e o controle do escoamento, de ambos os circuitos, é feito pela bomba EMTE circular.

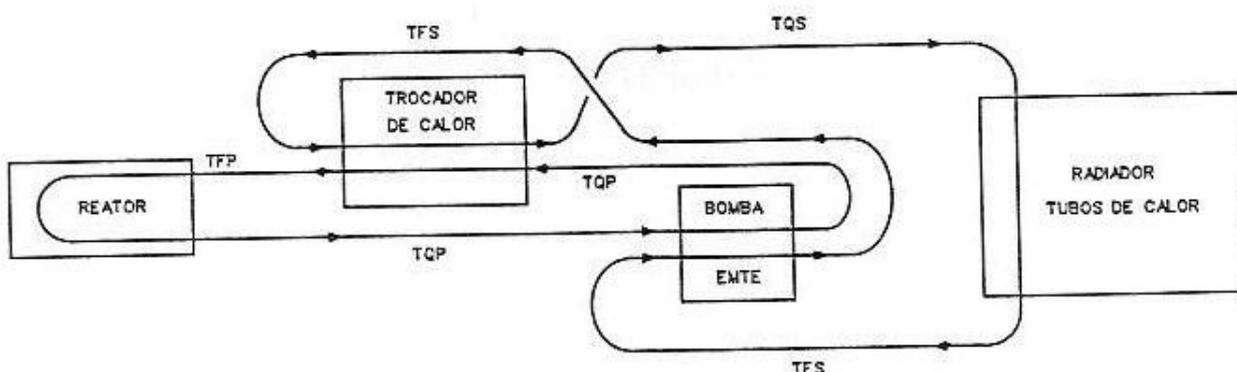


Figura 5. Sistema termo-hidráulico.

### 5.1. Corrente elétrica gerada

A corrente elétrica na bomba EMTE é gerada pelos termoelementos, em função das suas propriedades (Seebeck, Thomson, etc.), dos dados geométricos e das diferenças de temperatura imposta a eles. Considerando as Fig. 3 e 5, estas diferenças de temperatura, são em módulo iguais a TQP-TFS (temperatura quente do primário menos a temperatura fria do secundário) e a corrente total gerada é a soma das correntes geradas por cada um dos seis termoelementos.

Nas Figura 6 e 7 são apresentados respectivamente, as curvas de diferença de temperatura TQP-TFS em função da vazão do circuito primário, e os pontos de corrente gerada na Bomba EMTE circular (acoplada ao sistema térmico do SP-100) em função desta diferença de temperatura. Nota-se que quanto menor a vazão do circuito primário, maior é a diferença de temperatura imposta aos termoelementos e portanto maior será a corrente gerada.

### 5.2. Campo magnético

No BEMTE-3 o campo magnético, B, no canal da bomba EMTE é obtido pela Eq. de campo (1), onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do vácuo (igual a do ar), N<sub>esp</sub> é o número de espiras (no caso da BEMTE circular é 1), I<sub>campo</sub> é a corrente de campo (para a BEMTE circular é a corrente elétrica total gerada) e d é o entreferro (no caso da BEMTE circular é a altura do canal).

$$B = \frac{\mu N_{\text{esp}} I_{\text{campo}}}{d} \quad (1)$$

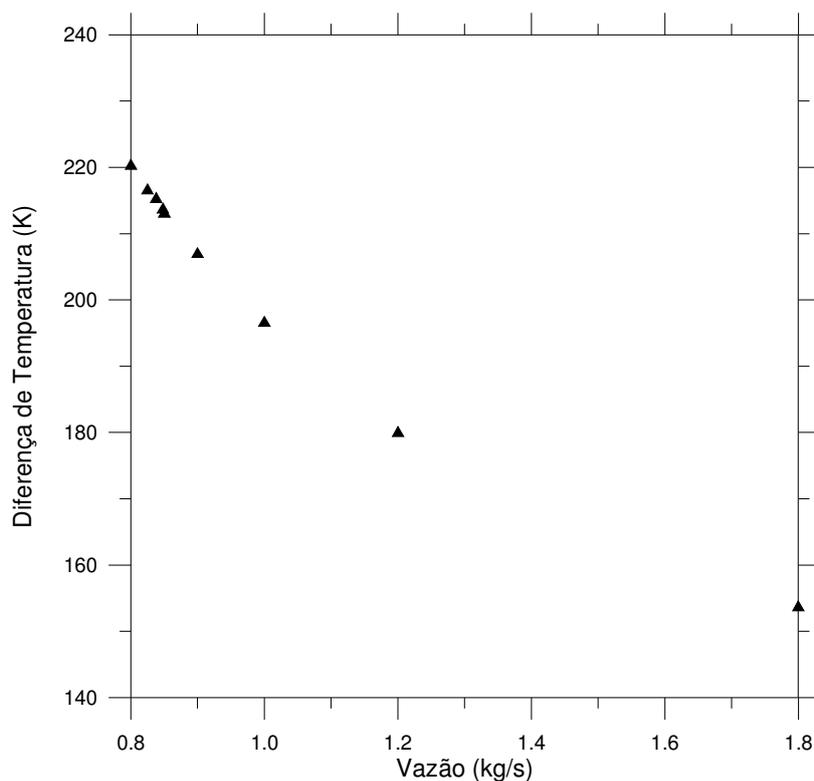


Figura 6. Diferença de temperatura TQP-TFS em função da vazão.

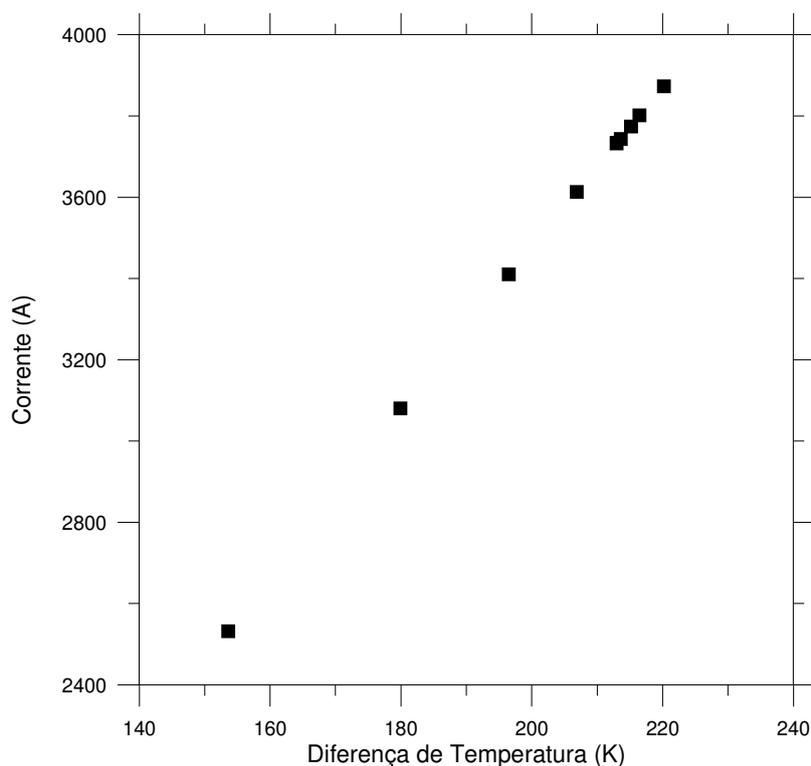


Figura 7. Corrente elétrica em função da temperatura TQS-TFS.

Logo o campo magnético é função da corrente elétrica e dos parâmetros geométricos da bomba EMTE. Pode-se ainda considerar, na simulação das bombas eletromagnéticas termoelétricas (EMTE), os fatores de correção de campo obtidos experimentalmente para a bomba EM, como apresentado por Borges, et al (2006). Na Figura 8 são apresentados os pontos de campo magnético gerado em função da corrente elétrica da Bomba EMTE circular, acoplada ao sistema térmico do SP-100. Nota-se que quanto menor a vazão, maior é a diferença de temperatura imposta aos terminais dos termoelementos e portanto, maior será a corrente gerada e maior o campo magnético produzido.

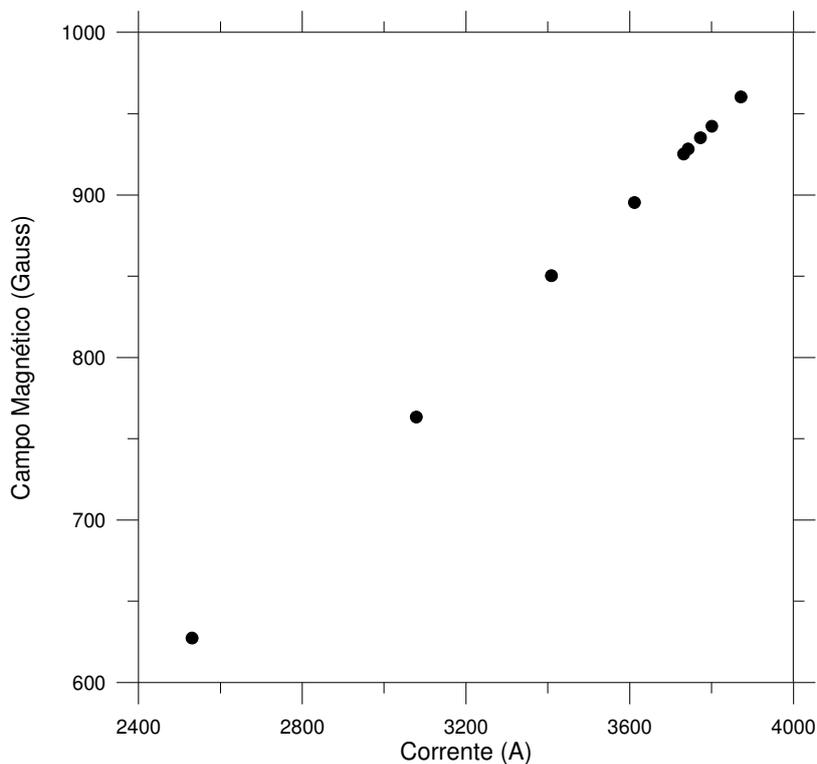


Figura 8. Campo magnético em função da corrente elétrica.

### 5.3. Pontos de atuação do sistema

O cálculo do ponto de atuação do sistema termo-hidráulico, ou seja, os dados de vazão e pressão dos circuitos primário e secundário são obtidos em função dos parâmetros fornecidos pelo usuário e calculados pelo BEMTE-3. Deste modo, os pontos de intersecção das curvas (vazão x pressão) da bomba e de perda de carga nos circuitos primário e secundário definem os pontos de atuação dos circuitos. Na Figura. 9 tem-se a vazão do circuito primário de aproximadamente 0,85 (kg/s). Na Figura 10 tem-se a vazão do secundário.

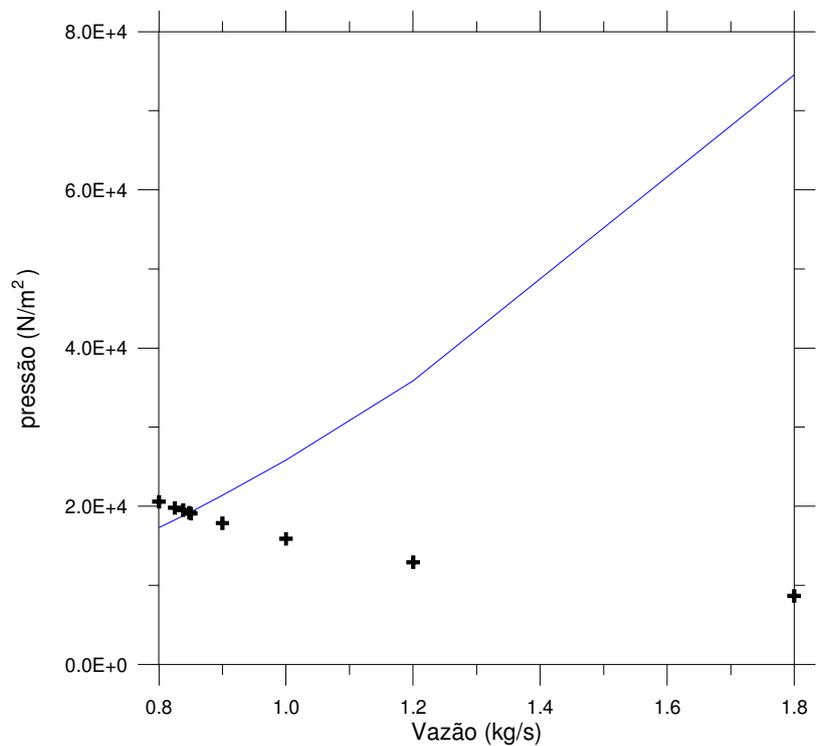


Figura 9. Ponto de atuação do circuito primário.

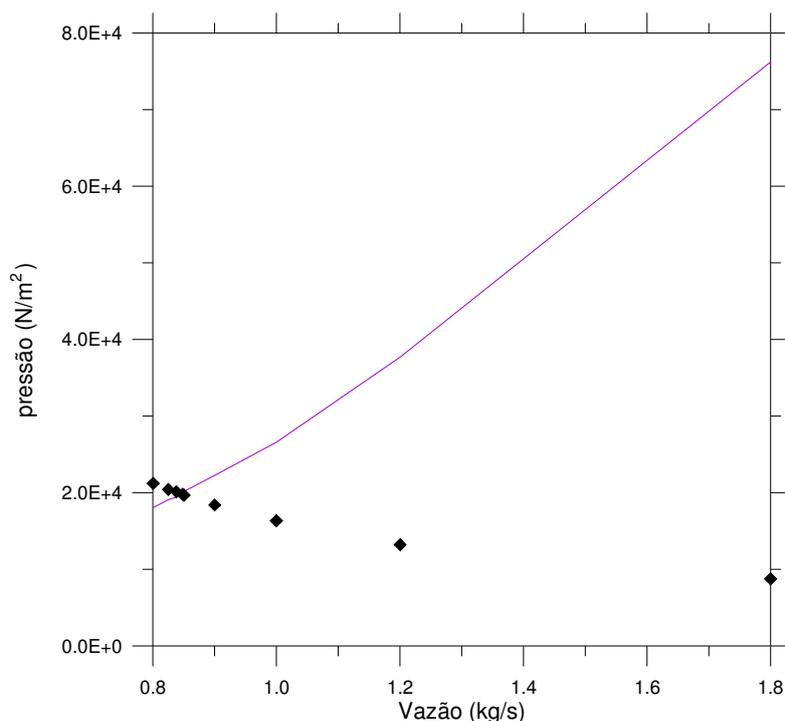


Figura 10. Ponto de atuação do circuito secundário.

## 6. CONCLUSÃO

Sem partes móveis e com alta confiabilidade, bombas eletromagnéticas podem controlar o escoamento de um metal líquido de alta condutividade elétrica e térmica num circuito fechado. Estas características tornam este tipo de equipamento útil em sistemas projetados para não sofrer manutenção, como os espaciais.

O programa de Tecnologia de Reatores Rápidos Avançados (TERRA) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), desenvolve equipamentos e sistemas de interesse para aplicação em reatores rápidos avançados para uso em terra e no espaço. Uma possível aplicação deste tipo de tecnologia é na geração de energia elétrica no espaço, utilizando um sistema similar ao do projeto norte americano SP-100 de reatores espaciais, iniciado na década de 80, e que ainda apresenta muitos sistemas em desenvolvimento.

Este artigo detalha e simula o funcionamento de uma bomba eletromagnética termoeétrica (EMTE) circular que poderá ser utilizada no controle de escoamento dos circuitos primário e secundário de lítio líquido de um reator espacial similar ao SP-100.

As bombas eletromagnéticas utilizam o princípio de Faraday, no qual a interação de corrente elétrica e campo magnético geram uma força magnetomotriz, que produz a circulação do fluido. Na bomba eletromagnética termoeétrica a sua corrente elétrica é gerada pelos conversores termoeétricos (TE), que transformam a diferença térmica, imposta a seus terminais, em corrente elétrica. Esta corrente elétrica circunda o magneto (neste caso do tipo circular) de Hiperco-27, gerando o campo magnético, que é conduzido pelo próprio magneto. A interação campo-corrente gera a força magnetomotriz, isto ocorre nos canais da bomba, onde há lítio líquido dos circuitos primário e secundário do reator espacial. Portanto a bomba EMTE controla o escoamento do fluido de trabalho, em função da potência térmica e de outros parâmetros do reator.

As simulações da bomba EMTE, os cálculos das perdas de carga nos circuitos primário e secundário do reator espacial e a avaliação dos pontos de atuação dos sistemas, em função da potência térmica do reator em estudo, são executadas com o programa BEMTE-3 e demonstram o bom funcionamento do sistema térmico.

## 7. REFERÊNCIAS

- 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.
- Barnes, A.H., 1953, "Direct-Current Electromagnetic Pumps", *Nucleonics*, Vol. 11, No. 1, pp. 16-21.
- Blake, L.R., 1956, "Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals", Proceedings IEEE, paper No. 2111U.
- Borges, E. M., 1991, "Desenvolvimento e Simulação Computacional de Bombas Eletromagnéticas Termoeétricas 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., 2006, "A Parametric Study and Performance Evaluation of DC Electromagnetic Pumps with BEMC-1 Code", *Engenharia Térmica*, ISSN: 1676-1790, Vol 5, No 2, pp. 16-23.
- Borges, E. M., et al., 2009, "Program Computacional BEMTE-3" *Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento – Instituto de Estudos Avançados – IEAv – Anai do 9<sup>th</sup> Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados*. ISSN 1983-1544. São José dos Campos, SP, Vol. 2, pp. 140.
- Guimarães, L., et al., 2008, "Tecnologia de Reatores Rápidos Avançados – TERRA: Reatores para Aplicações Espaciais e Estratégicas", *Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento – Instituto de Estudos Avançados – IEAv – Anai do 8<sup>th</sup> Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados*. ISSN 1983-1544. São José dos Campos, SP, Vol. 1, pp. 115.
- Johnson, J. L., 1973, "Space Nuclear System Thermoelectric NaK Pump Development – Summary Report", NASA-CR-121231, USA.
- Truscillo, V., Davis, H., 1984, "Nuclear Electric Power in Space", *IEEE Spectrum*, Vol. 21, No 12, pp. 58-65.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### **SIMULATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF A CIRCULAR ELECTROMAGNETIC THERMOELECTRIC PUMP**

Eduardo Madeira Borges, [eduardo@ieav.cta.br](mailto:eduardo@ieav.cta.br)  
Francisco Antonio Braz Filho, [eduardo@ieav.cta.br](mailto:eduardo@ieav.cta.br)  
Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, [eduardo@ieav.cta.br](mailto:eduardo@ieav.cta.br)  
Giannino Ponchio Camillo, [giannino@ieav.cta.br](mailto:giannino@ieav.cta.br)

Institute for Advanced Studies (IEAv), Rodovia dos Tamoios, Km 5,5. Sao Jose dos Campos, SP, Brazil

#### **Abstract**

This paper simulates and evaluates the performance of a circular electromagnetic thermoelectric pump (EMTE), which can be used to flow control of primary and secondary circuits of liquid Lithium from a space nuclear reactor, similar to the SP-100. EMTE pump Simulations, losses pressure in primary and secondary circuits of the reactor space calculations and the systems performance values, according to the thermal reactor studied are made with the BEMTE-3 software and demonstrate a good thermal system performance.

Keywords: electromagnetic pump, space nuclear reactor, computational simulation, energy.

#### **RESPONSIBILITY NOTICE**

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.