

ANÁLISE DE UM BOMBEADOR ELETROMAGNÉTICO DE FLUIDOS CONDUTORES, UTILIZANDO A MAGNETOHIDRODINÂMICA

Luciano Pires Aoki¹

Paulo Sérgio Torquato Vanucci, paulo.vanucci@gmail.com¹

Marco Aurélio dos S. Diniz, marcodiniz@anhanguera.com²

¹Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. Avenida Trabalhador são-carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt. CEP 13566-590 - São Carlos – SP.

²Faculdade Anhanguera, Av. Eduardo Andréia Matarazzo, 891 - Subsetor Norte 2. CEP 14080-730 -Ribeirão Preto – SP.

Resumo: O trabalho destinou-se a produção experimental de um bombeador de fluidos condutores eletromagnético, vinculado, portanto a uma área conhecida como magnetohidrodinâmica ou (MHD), que consiste no controle e movimento de fluidos eletrolíticos por meio de campos elétricos e magnéticos. Aplicando um campo magnético contínuo e quase uniforme de 0,3 Tesla, e variando-se a tensão no sistema (12 V - 20 V - 30 V) através de eletrodos de alumínio em contato com o fluido (no caso água salgada), obteve-se perfis interessantes de velocidades de escoamento. A partir desses perfis e dos valores das tensões e campos aplicados, foram possíveis calcular a força de Lorentz gerada pelo conjunto MHD (força responsável pelo movimento do líquido) e a força de propulsão efetiva transmitida para o fluido. As velocidades obtidas nos escoamentos, apesar de serem baixas (na ordem de 10-1 m/s), são bem satisfatórias nessa área da magnetohidrodinâmica.

Palavras-chave: bombeador eletromagnético, magnetohidrodinâmica, fluidos eletrolíticos, força de Lorentz, propulsão.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do eletromagnetismo, estudiosos já sabiam que o campo magnético interagiu com muitos fluidos, desde artificiais até naturais, a citar por exemplo o campo magnético criado pela Terra quando seu núcleo de metal se movia. A partir desses fenômenos, criaram-se áreas de estudo que visavam manipular os fluidos, como levitar e bombeá-los. Esse fenômeno no qual o fluido interage com campos magnéticos e também elétricos é conhecido como magnetohidrodinâmica ou MHD.

Um dos pioneiros nessa área foi Michael Faraday, que tentara medir a corrente induzida pelo movimento do rio Tamisa ao interagir com o campo magnético da Terra. Apesar do pouco sucesso isso não se tornou em empecilho para posteriores estudos.

Ritchie (1832) foi um dos primeiros a descrever esse fenômeno quantitativamente, como o funcionamento básico de um bombeador MHD, e como o fluido condutor se comportava sob campos eletromagnéticos.

A partir desses pioneiros, uma série de estudos então se iniciou, partindo desde os princípios básicos de propulsão MHD até aplicações mais complexas como resfriamento de geradores nucleares, separadores de metais e aplicações navais e aeronáuticas.

O experimento discutido aqui consistiu em um circuito retangular, conhecido como macro bomba, cujo objetivo é bombear uma solução eletrolítica (no caso água salgada). A partir dos perfis de velocidade, pode-se calcular a força de Lorentz produzida e a força propulsiva transmitida para o fluido.

2. METODOLOGIA

O objetivo do experimento é obter um perfil de velocidades e pressões gerados pela MHD no fluido e partir deles calcular a força de Lorentz gerado pelo MHD, a força propulsiva transmitida ao fluido e a potência elétrica do bombeador. A figura 1, mostra a construção do bombeador que está ligado a um circuito, de forma a reaproveitar o fluido.

2.1. Procedimento Experimental

A figura 1, mostra a construção do bombeador que está ligado a um circuito, de forma a reaproveitar o fluido.

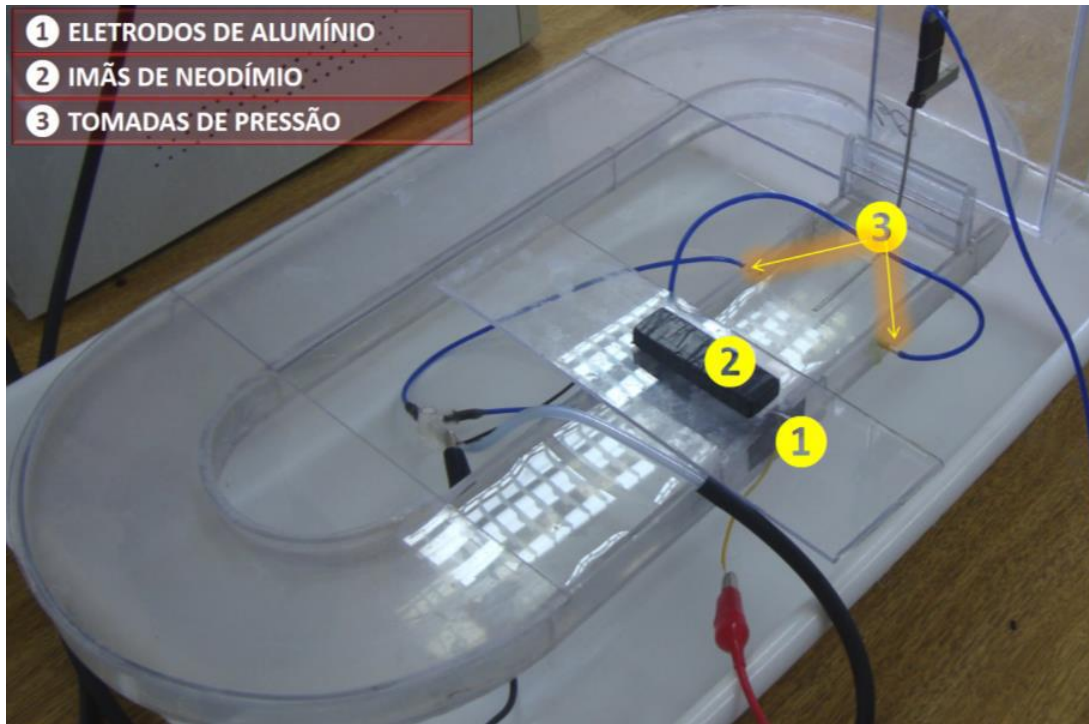


Figura 1. Construção do circuito MHD. Do próprio autor.

A parte estudada possui 30 cm de comprimento, largura do canal de 7 cm, e altura 2 cm. O domínio eletromagnético é composto de dois ímãs de neodímio (grade N35 e densidade de fluxo magnético de 0,3 T) com 7 cm x 2 cm x 1 cm de dimensão, acoplados de forma a produzir um campo magnético perpendicular ao campo elétrico, esse produzido por dois eletrodos de alumínio (2 cm x 2 cm x 0,3 cm), e alimentados por uma tensão variável, ver figura 2. O campo magnético foi medido usando um gaussímetro (FW Bell Gauss/Tesla meter model 4048). É importante notar que o campo foi medido apenas no interior do domínio eletromagnético (ou seja, entre os ímãs). Como a distância entre os ímãs era pequena, o decaimento do campo magnético era sensível.

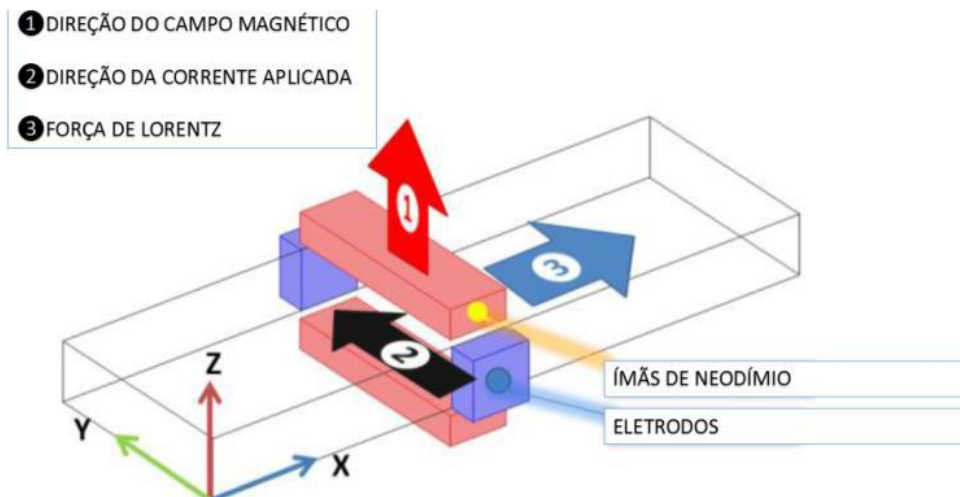


Figura 2. Representação das forças eletromagnéticas agindo no fluido. Figura do próprio autor.

O fluido em questão é água salgada com condutividade aproximada de 5 S/m (representando a água do mar). Ao ligar a fonte os campos elétricos e magnéticos irão se interagir criando a força de Lorentz (força eletromagnética) que moverá o fluido. Com medidores de pressão (ver figura 1) e um manômetro digital (DP – Calc TSI com resolução de 0,1 Pa) é possível captar esses valores e convertê-los em velocidade que serão analisados posteriormente. Aqui os perfis de

velocidade são tomados próximo ao domínio eletromagnético (nesse caso a 14 mm, 20 mm e 24 mm do ponto central dos ímãs) e ao longo da largura do canal (nesse caso a 1 mm, 5 mm, 15 mm, 35 mm, 45 mm, 60 mm e 69 mm), figura 3.

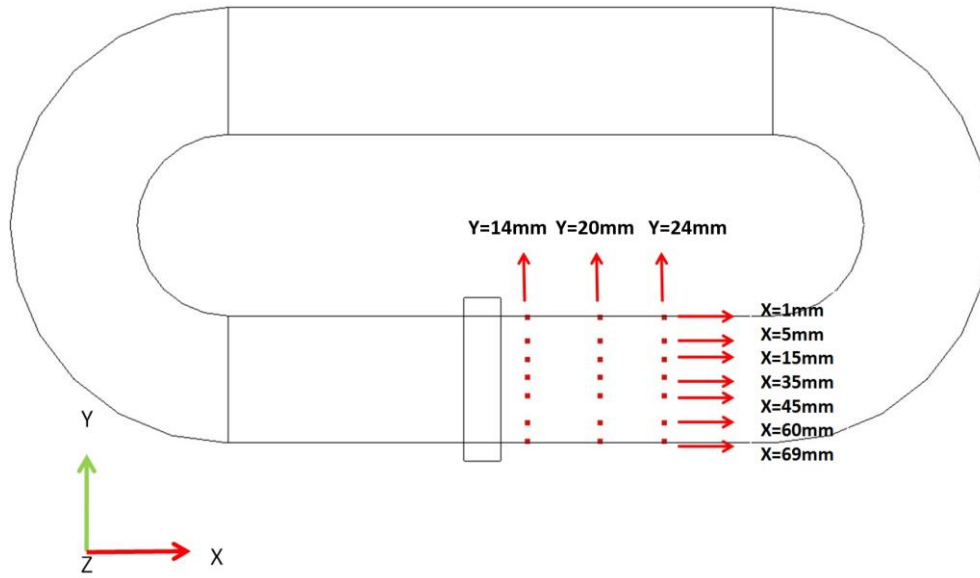


Figura 3. Locais onde a tomada de pressão foi utilizada. Aoki (2011).

2.2. Análise teórica

No que diz a parte teórica, a formulação do estudo MHD deriva basicamente das equações de Maxwell acopladas com as equações de Navier – Stokes. Logo o modelo é descrito e governado pelas equações do eletromagnetismo e fluidodinâmica:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{Lei de Ampère} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Lei de Faraday} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad \text{Lei de Gauss} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Inexistência de monopolos} \quad (4)$$

Usando o divergente e aplicando a lei de Gauss na equação 1 obtém-se:

$$\nabla \times \mathbf{J} = -\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{E} = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (5)$$

Usando a lei de Ohm e a lei de Ampère chega-se a:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu_0} \right) = \mathbf{J} \quad \text{ou} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \left[-\nabla \phi + \mathbf{u}_1 \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right] \quad (7)$$

Onde a Eq. 6 representa a lei de Maxwell – Ampère e Eq. 6, lei de Ohm, onde $\mathbf{J}$ é a densidade de corrente, $\mathbf{A}$ é o vetor potencial magnético, μ é a permeabilidade, σ a condutividade elétrica da água salgada, $\mathbf{u}_1$ a velocidade de uma

partícula elétrica e ϕ é o vetor potencial elétrico. Para a brevidade da proposta, alguns passos serão deixados de lado, e as principais equações serão citadas. Aproximando a solução salina para um fluido Newtoniano Incompressível tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \mathbf{u}_2 = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{u}_2 + \frac{1}{\rho} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

Onde $\mathbf{u}_2$ é a velocidade local do fluido e $\nabla \cdot \mathbf{u}_2 = 0$. O potencial elétrico ϕ pode ser resolvido pela equação de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot [\mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{A})] \quad (9)$$

E considerando $\mathbf{E} = -\nabla \phi$ e $\mathbf{B} = (\nabla \times \mathbf{A})$, chega-se a densidade de corrente:

$$\mathbf{J} = \sigma [-\nabla \phi + \mathbf{u}_1 \times (\nabla \times \mathbf{A})] \quad (10)$$

O acoplamento entre o eletromagnetismo e a fluidodinâmica vem com o termo $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$, que representa a força de Lorentz. Para o cálculo da força propulsiva se considera a equação da quantidade de movimento.

$$\mathbf{F}_t = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{Volume de controle}} \mathbf{V} \rho dVol + \int_{\text{Superfície de controle}} \mathbf{V} \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (11)$$

Aqui, novamente, para a brevidade da proposta os passos serão omitidos, chegando-se a:

$$\mathbf{F}_t = \rho V^2 A \quad (12)$$

Onde V é a velocidade do fluido em questão e A é área do bombeador no caso 7 cm de largura por 2 cm de altura.

3. RESULTADOS

O fluido foi submetido a três variações de tensões: 12 Volts, 20 Volts e 30 Volts, sempre com um campo magnético de 0,3 T. A figura 4 mostra as linhas de velocidades obtidas com o manômetro e o tubo de Pitot.

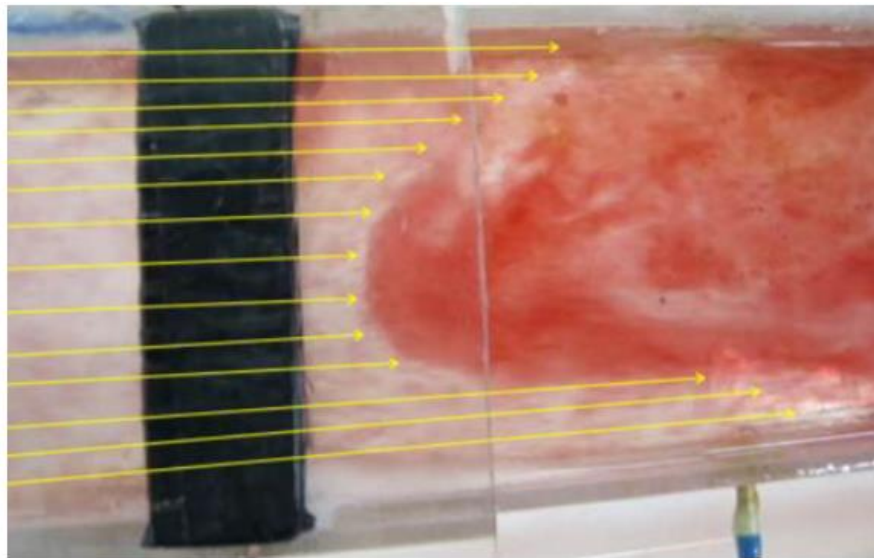


Figura 4. Movimento do fluido e suas linhas de velocidades. Aoki (2011).

Aqui é importante notar que, inicialmente o fluido encontra-se em repouso. Ao ligar a fonte, imediatamente o fluido se comporta como visto na figura 4. Note que as forças de Lorentz tendem a agir com maior intensidade nas bordas, ocasionando uma maior velocidade do fluido.

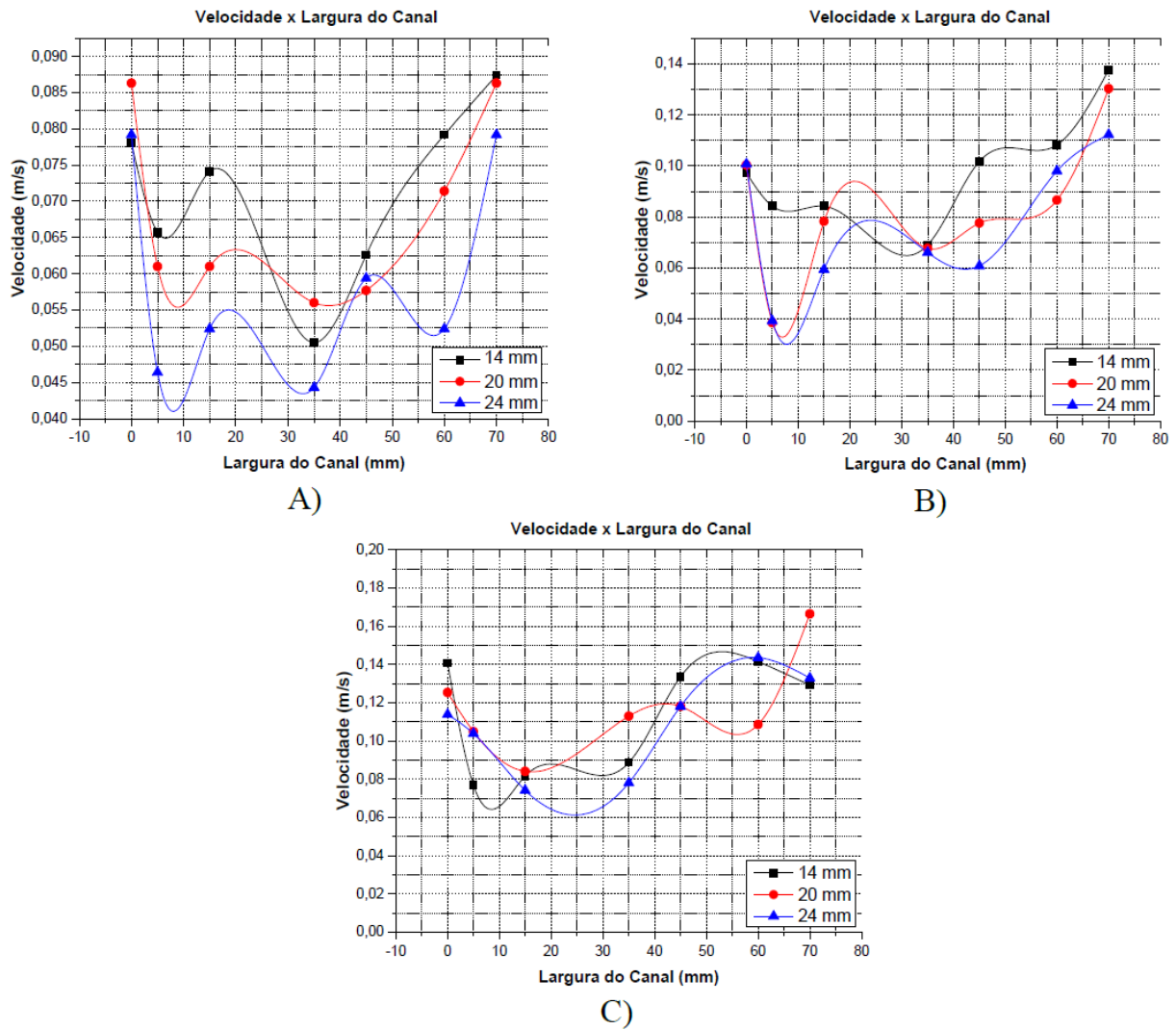


Figura 5. Perfis de velocidade para as três voltagens. A) 12 Volts, B) 20 Volts e C) 30 Volts.

Note pelas figuras, que o fluido tende a acelerar nas extremidades da parede do circuito, enquanto que no meio dele o valor é menor. Aqui não se pode definir um comportamento para as curvas apenas uma tendência. Com base nesses dados e também com os valores de tensão e campo magnéticos, pode-se calcular a força propulsiva e a força de Lorentz (utilizando as equações $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ e 12), as forças são vistas na figura 6.

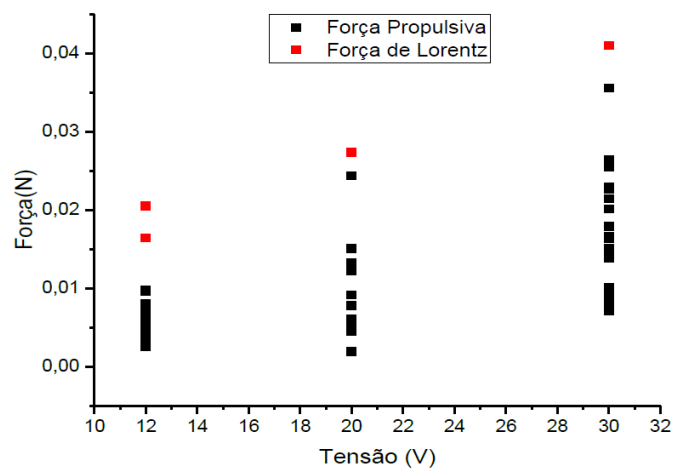


Figura 6. Comparação da força de Lorentz com a força propulsiva para as três tensões.

Nota-se que a força de Lorentz ligeiramente maior que a força propulsiva, o que indica, que parte da energia fornecida pela fonte ao bombeador eletromagnético não está sendo convertida em força propulsiva. Uma das explicações possíveis,

seria a perda de carga no eletrodo, baixa condutividade do fluido, problemas nos conectores dos fios e aquecimento da água salgada o que ocasionaria uma perda de transmissão também.

4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, análises experimentais foram realizadas para explicar o fenômeno MHD. As velocidades da água salgada foram obtidas para três voltagens diferentes e os gráficos de seus perfis em relação ao comprimento do canal foram criados, revelando um comportamento não convencional; as velocidades tendem a ser maiores próximo ao domínio eletromagnético e das paredes do bombeador e menores no meio do canal, o que mostra que as forças de Lorentz estão atuando de fato no fluido. Devido as imperfeições do circuito, dos instrumentos de medição e da própria natureza complexa da magnetohidrodinâmica ao interagir com o fluido, os perfis de velocidades não puderam mostrar um melhor padrão curvas, no entanto foi possível obter uma velocidade média e partir dela e calcular as forças propulsivas presentes para as três tensões analisadas.

Notou-se uma pequena diferença entre a força de Lorentz gerada e a força efetiva transmitida ao fluido, o que sugere perdas por condução, aquecimento e até mesmo imprecisão dos equipamentos de medição. No entanto tais valores calculados são válidos e satisfatórios na área de MHD. Pode-se comparar, por exemplo, o perfil de velocidades baixo com os trabalhos de Patel (2009), no qual ele simula um bombeador MHD, o de Andreev et al (2006) que utiliza metal líquido ao invés de água salgada, assim como a tese de Aoki (2017) acerca das eficiências propulsivas. O controle do fluido apresentado nesse trabalho pode facilmente ser empregado em propulsores marítimos, bioengenharia, mineração, resfriadores de usinas nucleares, provando que a MHD possui um futuro promissor.

5. REFERÊNCIAS

- Andreev, O., Kolesnikov, Yu. and Thess, A. Experimental study of liquid metal channel flow under the influence of a nonuniform magnetic field. *Physics Of Fluids*, v. 18, n. 6, 2006.
- Aoki, L. P. Estudo do efeito magnetohidrodinâmico em um eletrólito a partir do uso de um dispositivo ejetor eletromagnético. São Carlos – SP 2011. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP, São Carlos, 2011. 226 p.
- Aoki, L. P. Magnetohidrodinâmica aplicada a um veículo de densidade relativa unitária. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP, São Carlos, 2017. 331 p.
- Patel, V. D. Electroosmosis and thermal effects in magnetohydrodynamic (MHD) micropumps using 3D MHD equations. San Diego: Faculty of San Diego University – California, 2007. 69 p.
- Ritchie, W. Experimental researches in voltaic electricity and electromagnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, London v. 122, pp. 279 – 298.

6. RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

AFTER FULL PAPER IN PORTUGUESE OR SPANISH, IT'S NECESSARY THE ABSTRACT IN ENGLISH

Luciano Pires Aoki, lucianoaoki@gmail.com¹

Paulo Sergio Torquato Vanucci, paulo.vanucci@gmail.com¹

Marco Aurélio dos S. Diniz, marcodiniz@anhanguera.com²

¹Escola de Engenharia de São Carlos – EESC USP, Avenida Trabalhador são-carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt. CEP 13566-590 - São Carlos – SP.

²Faculdade Anhanguera, Av. Eduardo Andréia Matarazzo, 891 - Subsetor Norte 2. CEP 14080-730 -Ribeirão Preto – SP.

Abstract. *The Project was intended for research and experimentation of a electromagnetic pump model powered by electromagnetic propulsion, linking the project, therefore, to the magnetohydrodynamics (MHD) which means, control and movement of electrolyte solutions using electric and magnetic fields. Applying a uniform magnetic field (0,3 T), and changing the voltage between (12 V, 20 V and 30 V), using aluminum electrodes in contact with the fluid (salt water), it was possible to obtain a interesting flow velocity profiles. Starting with this flow profiles and knowing the voltage and magnetic fields applied it was possible to calculate the thrust of the pump as well as the Lorentz force. Despite the low velocities obtained, these results agree with most of the MHD experiments in this area.*

Keywords: *electromagnetic pump, magnetohydrodynamic, electrolyte fluid, Lorentz Force, propulsion.*

