

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DO FENOMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4678

Antonio Roniel Marques de Sousa - roniel@ufpa.br
UFPA

Lucas Henrique Brito Santos - lucas.brito.santos@itec.ufpa.br
UFPA

Damasio Alves de Lima Júnior - damasio.junior@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará

WELLINGTON DA SILVA FONSECA - fonseca.ufpa@gmail.com
UFPA

Resumo: O fenômeno da magnetohidrodinâmica (MHD) é o estudo do comportamento que um fluido condutor exibirá ao fluir na presença de um campo magnético externo. O MHD possui diversas aplicações no setor industrial, bem como para estudos de diversos tipos de materiais como ferrofluidos através de um duto, desta forma este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema para medição dos valores do campo magnético utilizando sensores de efeito Hall conectado a um ESP32 em uma bancada magnetohidrodinâmica.

Palavras-chave: magnetohidrodinâmica, fluido, sensor, detecção, esp32.

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DO FENÔMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da magnetohidrodinâmica (MHD), consiste no comportamento que um fluido condutor apresenta quando escoar na presença de um campo magnético externo. Este fenômeno vem sendo estudado desde o século passado, começando pelos trabalhos de Hartmann (1937) e Alfvén (1942). Esse fenômeno vem sendo de grande interesse tanto para o ramo industrial, quanto para o acadêmico devido às suas diversas possibilidades de aplicações, como na polarização de gases, ou no escoamento de petróleo.

Apesar da importância crescente que o estudo de MHD vem mostrando, vários fatores vêm dificultando seu ensino, dentre eles de destacam o fato de ser um ramo com muitos estudos sendo desenvolvidos. Outro fator que provoca essa dificuldade se encontra no fato de que como mostrado por Tassone (2016) a magnetohidrodinâmica se baseia na equação de Navier-Stokes e, portanto não possui solução analítica, que ainda é combinada com as equações de Maxwell para prever o efeito eletromagnético do fluido.

Dessa forma, como tentativa de tornar mais compreensível esse fenômeno, foi desenvolvida uma bancada educacional que mostra os efeitos de mhd tanto no fluido quanto no campo magnético externo, utilizando para isso um microcontrolador. A utilização de microcontroladores em estratégias de ensino para engenharia é algo que vem sendo consolidado como pode ser visto em trabalhos como os de Santos, Fonseca e Sousa *et al.*(2021) e Matias, Meloni e Silva(2022), isso se deve pela sua praticidade e pela diversidade de aplicações que podem ser feitas com elas. Com isso em vista foi acoplada à bancada um microcontrolador ESP WROOM-32, juntamente com sensores de efeito hall, para medição do campo magnético, e sensores de fluxo, para detectar as alterações do escoamento.

2 EQUAÇÕES E PARÂMETROS

Fenômenos de escoamento em tubulações geralmente são regidos pela equação de Navier-Stokes, e no caso da magnetohidrodinâmica, assim como explicado por Fonseca *et al.* (2021), essa equação é combinada com as equações do eletromagnetismo para representar o efeito do campo magnético, assim como pode ser visto na Equação (1).

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 U + \frac{J \times B}{\rho} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

Onde U e p são, respectivamente, a velocidade de escoamento e a pressão no duto. As propriedades do fluido são expressas na Equação (1) por ρ (densidade) e ν (viscosidade cinemática). O produto vetorial no lado direito representa a Força de Lorentz que atua no fluido, e que é causada pela densidade de corrente (J) gerada dentro dele, e pela densidade do fluxo magnético (B) externos. A Equação (2), é a equação da continuidade para fluidos incompressíveis.

Porém com a adição de duas novas variáveis, torna-se necessário outro conjunto de equações baseadas nas leis de Maxwell. Assim como citado por Tassone (2016) os valores de B e J podem ser obtidos através das equações:

$$\frac{\nabla \times B}{\mu} = J \quad (3)$$

$$J = \sigma (-\nabla\Phi + U \times B) \quad (4)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (U \times B) - \frac{\nabla^2 B}{\mu\sigma} \quad (5)$$

Onde a Equação (3) representa a lei de Amperè, na sua forma pontual, onde μ é a permeabilidade magnética do meio. Essa equação é utilizada para calcular o valor da densidade de corrente, ao combinar essa equação juntamente com a lei de Ohm também na sua forma pontual Equação (4), com Φ representando o potencial elétrico gerado no fluido, obtém-se a fórmula da Equação (5), que é conhecida como equação da indução magnética, utilizada para calcular o campo B. Vale realizar que B deve também respeitar a lei de Gauss para o campo magnético.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

Outros parâmetros importantes para o estudo de MHD são os números adimensionais. Dentre estes números se destacam o número de Reynolds Magnético e o número de Hartmann. O número de Reynolds Magnético (Rem) serve para medir o quanto o campo magnético que o fluido gera interfere no campo externo (TASSONE, 2016), ele pode ser calculado conforme mostra a Equação (7), que depende das propriedades do fluido assim como da velocidade (U), e do comprimento do duto (L).

$$Rem = UL\mu\sigma \quad (7)$$

O número de Hartmann (Ha) é a razão entre as forças eletromagnéticas e as forças viscosas atuantes e mede o quanto o campo magnético desvia o escoamento do fluido de seu comportamento padrão (FONSECA *et al.*, 2021).

$$Ha = BoL \sqrt{\frac{\sigma}{\rho\nu}} \quad (8)$$

2.1 Materiais

O monitoramento e a estruturação do experimento do MHD é dividido pelo sistema eletrônico e a estrutura física. O sistema de monitoramento é dividido pelos sensores de fluido e fluxo magnético, onde se gerencia a partir de um microcontrolador dedicado para receber altos volumes de dados com o intuito de reduzir a perda de pacotes de informações durante os testes e que tenha uma conexão de fácil acesso com o Wi-Fi. A partir disso, o microcontrolador escolhido foi o ESP WROOM-32 (2022), a qual há conexão Wi-Fi e Bluetooth embutida na própria placa de desenvolvimento e tem um poder de processamento de 4 vezes em relação ao Arduino Uno, onde é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – A placa de desenvolvimento ESP-32.



Fonte: Autores.

O sistema de sensores de fluido utiliza duas unidades do modelo do SAIER SEN- HZ21WA que são instalados no início e no final dos tubos de análise do MHD para verificar a diferença da velocidade do fluido, onde é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Sensor de fluxo usado para verificar o fluxo.



Fonte: Autores.

O sistema de detecção de distúrbios magnéticos funciona a partir do sensor de efeito Hall KY-024 (2022), pois utiliza uma porta analógica para detectar a intensidade do campo magnético submetido em sua vizinhança. Assim, este modelo foi escolhido por ser de fácil manuseio e compatível com a programação do microcontrolador e do Ide Arduino. O sensor é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Módulo de sensor de efeito Hall modelo KY-024.



Fonte: Autores.

A variação da vazão é feita a partir de uma bomba d'água de fonte submersa modelo EL-P310 com vazão de 220 litros por hora, parâmetros suficientes para um fluxo laminar, além de ter baixo consumo de energia e sua voltagem é bivolt. A bomba d'água utilizada é mostrada na Figura 4.

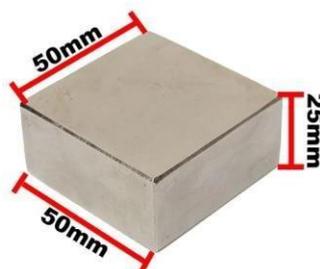
Figura 4 – Bomba de água usada para gerar o fluxo laminar.



Fonte: Autores.

Para a montagem do campo magnético do sistema foram utilizados 2 ímãs de neodímio revestido com níquel, medindo 50x50x25mm, que segundo o fabricante suporta até 280 Kg e apresenta aproximadamente 14.800 Gauss, a Figura 5 ilustra o ímã utilizado na montagem do experimento.

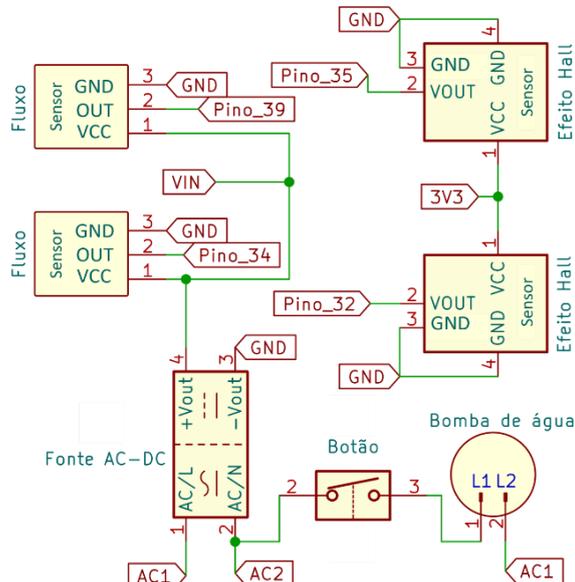
Figura 5 – Ímã de neodímio revestido com níquel.



Fonte: Autores.

A construção do circuito eletrônico foi feita com otimização de espaço e reutilização de ligações entre sensores, contribuindo assim para a eficiência da instalação e manutenção do dispositivo. Além disso, os sensores de detecção de campo magnético são alimentados com 3,3 V enquanto os sensores de fluxo são alimentados com 5V para que não ocorram interferências nas medições. O esquema seguinte mostra a disposição dos componentes eletrônicos na placa de circuito impresso, de acordo com a Figura 6.

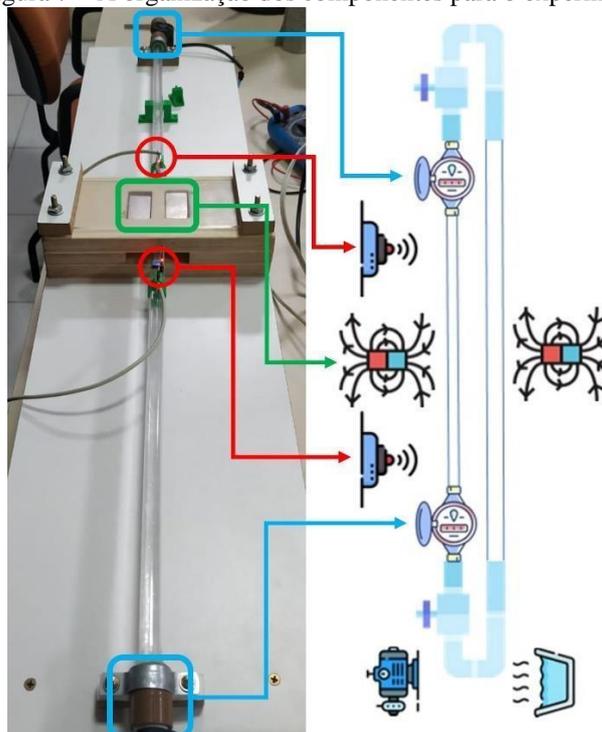
Figura 6 – O posicionamento dos componentes de monitoramento.



Fonte: Autores.

O sistema hidráulico foi construído a partir de um tubo transparente de 1 polegada e 2 metros de comprimento, pelo qual o fluido condutor circula até o tanque de água onde está localizada a bomba de água submersa. Além disso, duas válvulas de esfera foram instaladas para controlar o fluxo de retorno do fluido que passa pelos ímãs, Figura 7.

Figura 7 – A organização dos componentes para o experimento.



Fonte: Autores.

Por fim, foi desenvolvido um painel de controle a partir de um documento HTML programado na plataforma Jupyter Lab para plotar gráficos dos sensores no mesmo período de tempo, o que melhora a percepção da perturbação magnética por meio do fluxo do fluido condutor. O acesso é feito pela própria rede gerada por IP do ESP-32, onde os gráficos são atualizados em tempo real. O diagrama a seguir, na Figura 8, mostra a dinâmica do painel de monitoramento.

Figura 8 – O layout de como o painel funciona com o teste.



Fonte: Autores.

Além disso, os dados são armazenados em uma planilha on-line para uso em simulações de forma prática, pois quantidades relevantes são geradas durante o teste para que haja perda mínima de pacotes. Dessa forma, o usuário tem o controle do monitoramento dos distúrbios no

momento do teste e, posteriormente, pode executar simulações comparando-as com os resultados esperados. O esquema de armazenamento de dados é mostrado abaixo na Figura 9.

Figura 9 – Armazenamento on-line dos dados obtidos pelo teste.



Fonte: Autores.

Na construção do dispositivo foram utilizadas diversas conexões e tubos PVC de 20 mm, outro elemento presente na estrutura são dois registros esféricos que possibilitam variar a velocidade da água, dando ao experimento a funcionalidade de avaliar várias condições de escoamento, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – O layout de como o painel funciona com o teste.

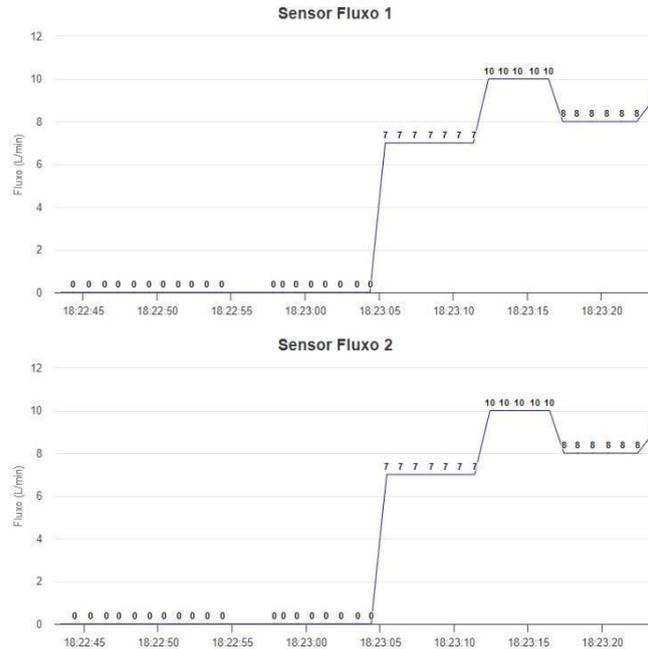


Fonte: Autores.

3 RESULTADOS

Após toda a montagem e configuração do experimento, foram analisadas duas situações para analisar a influência do fluido no campo magnético dos ímãs. Inicialmente foi analisado o campo sem vazão de água no duto, a Figura 11 ilustra a medição dos dois sensores instalados no início (sensor 1) e no final do duto (sensor 2). Observando a Figura 11 é possível observar que o experimento iniciou sem escoamento de água e logo após foi iniciada a circulação do fluido no duto.

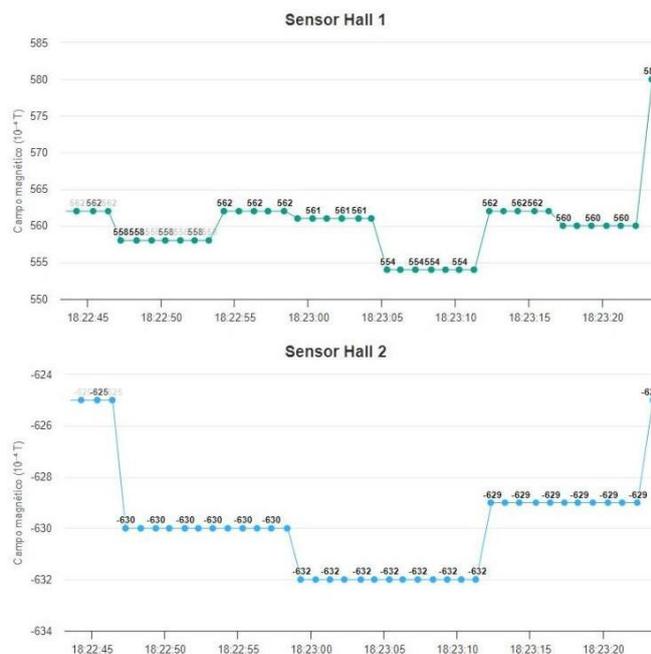
Figura 11 - Medindo os sensores de fluxo de água durante o experimento.



Fonte: Autores.

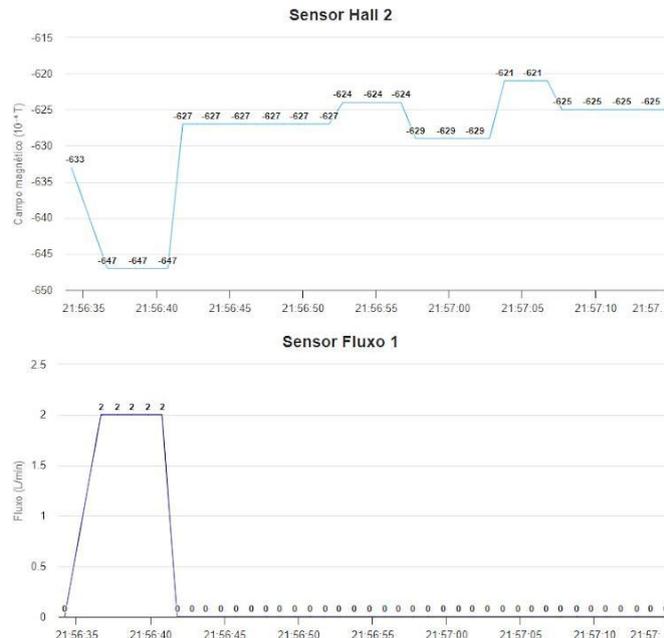
Seguindo a mesma estrutura dos sensores de fluxo, foram instalados dois sensores de efeito Hall, um antes dos ímãs (Sensor 1) e outro após os ímãs (Sensor 2). A Figura 12 mostra os valores medidos pelos sensores durante o experimento, pode-se observar que ao iniciar a análise os sensores já registram o campo magnético dos ímãs, logo após ligar o fluxo de água no duto este campo sofre um aumento que foi registrado pelos sensores, mostrando assim que o fluxo de água exerce influência sobre o campo magnético.

Figura 12 - Medição dos sensores de Efeito Hall durante o experimento.



Na parte experimental, foram feitos testes para verificar a influência dos ímãs nos sensores de efeito Hall para analisar a magnitude do campo gerado ao seu redor. O primeiro teste foi feito com água entrando em contato com o campo magnético conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - A figura mostra a influência da perturbação do fluido condutor no campo magnético.



Fonte: Autores.

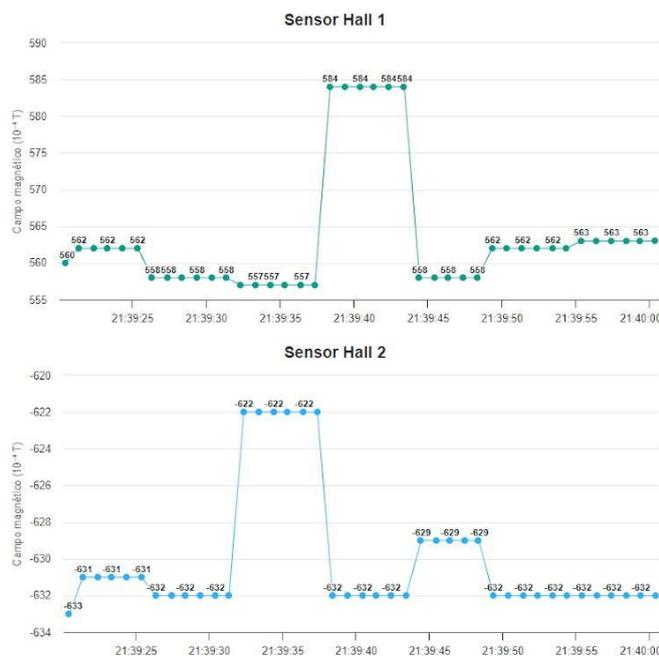
No segundo teste mostrado na Figura 14, o fluido condutivo já existente no sistema hidráulico foi utilizado para verificar se poderia haver alguma perturbação com o fluxo já contínuo. Essa abordagem também demonstra que a bomba de água não afeta as medições dos sensores de campo magnético.

Figura 14 - O gráfico mostra que a ignição da bomba d'água não impacta na medição



Em seguida, os sensores foram colocados em direções opostas de medições para observar que dependendo da instalação da eletrônica eles podem medir valores de sinal opostos, pois os ímãs possuem pólos positivo e negativo que podem ser comprovados pelo sensor de efeito Hall, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Os valores variando com sinais opostos mostram a fidelidade das medições do sensor de efeito Hall.



Fonte: Autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos através das simulações na bancada pode-se constatar que o campo magnético gerado pelos ímãs influencia, mesmo que em pequena escala devido ao número de Hartmann, o escoamento do fluido condutivo estudado, quando este se encontra em regime laminar, regime totalmente desenvolvido. E para valores maiores do número de Hartmann maior será essa interferência.

Assim, fica claro que o fenômeno da magnetohidrodinâmica (MHD) atua não apenas no regime de fluxo, mas também no espectro eletromagnético. Assim, pode ter diversas aplicações e formas de serem estudadas. E ainda está sendo estudado para aplicações na indústria, como petróleo ou metalurgia como pode ser visto em Martins et al (2012), ou no desenvolvimento de equipamentos elétricos utilizados na geração de energia.

Em trabalhos futuros, os autores pretendem estudar o comportamento do campo magnético e potencial para fluidos com propriedades que causem maior interferência. Além de estudar o fluxo MHD para números Hartmann maiores.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará (UFPA)

Ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON)

REFERÊNCIAS

ALFVÉN, H. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature* 1942, 150, 405–406.

Espressif Systems. (2022). "ESP32 Series Datasheet". Accessed: Feb. 14, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

FONSECA, W.d.S.; Araújo, R.C.F.; Silva, M.d.O.e; Cruz, D.O.d.A. Analysis of the Magnetohydrodynamic Behavior of the Fully Developed Flow of Conducting Fluid. *Energies* 2021, 14, 2463. <https://doi.org/10.3390/en14092463>.

MARTINS, A.; Ferreira, M.; Neto, J.; Vianna, A.; Ressel, F.; Santos, R.; Rosa, K. Aplicação de Dispositivos Magnéticos no Combate à Incrustações Inorgânicas (in Portuguese). In Proceedings of the VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2012), São Luís, Brazil, 31 July–3 August 2012.

HARTMANN, J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field. *Math.-Fys. Meddelelser* 1937, 15, 3–28.

TASSONE, A.: Magnetic induction and electric potential solvers for incompressible MHD flows. In Proceedings of CFD with OpenSource Software, 2016, Edited by Nilsson. H., http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2016.

MATIAS, O. C; MELONI, L. F. J., SILVA, F.S.: Desenvolvimento de uma API para ensino de IOT com ESP32 em disciplinas de Laboratório de Engenharia Elétrica. L Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2022. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3837.

SANTOS, G. X.; FONSECA, W. S.; SOUSA, A. R. M.: Desenvolvimento de um dispositivo de automação residencial de baixo custo como proposta de aula prática para alunos de engenharia. XLIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2021. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2021.3749.

CONSTRUCTION OF A DIDACTIC BENCH TO STUDY THE MAGNETOHYDRODYNAMICS PHENOMENON

Abstract: *The phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD) is the study of the behavior that a conductive fluid will exhibit when flowing in the presence of an external magnetic field. The MHD has several applications in the industrial sector, as well as for studies of different types of materials such as ferrofluids through a pipeline, in this way this work proposes the development of a system for measuring the values of the magnetic field using Hall effect sensors connected to a ESP32 on a magnetohydrodynamic bench.*

Keywords: *magnetohydrodynamics, fluid, sensor, detection, esp32.*

**"ABENGE 50 ANOS: DESAFIOS DE ENSINO, PESQUISA E
EXTENSÃO NA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA"**

**18 a 20 de setembro
Rio de Janeiro-RJ**



2023

51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia

VI Simpósio Internacional de Educação em Engenharia

Realização:



Organização:

