



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

DAMASIO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO
FENÔMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA**

Belém - PA

2026

DAMASIO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO
FENÔMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Antonio Roniel Marques de Sousa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca

Belém

2026

DAMASIO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DO
FENÔMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Belém, 20/02/2026

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO RONIEL MARQUES DE SOUSA
Data: 28/02/2026 10:00:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antonio Roniel Marques de Sousa

Universidade Federal do Pará | UFPA

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br WELLINGTON DA SILVA FONSECA
Data: 02/03/2026 08:37:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Wellington da Silva Fonseca

Universidade Federal do Pará | UFPA

Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE OLIVEIRA E SILVA
Data: 03/03/2026 16:34:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Marcelo de Oliveira e Silva

Universidade Federal do Pará | UFPA

Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
gov.br REINALDO CORREA LEITE
Data: 03/03/2026 10:12:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Reinaldo Corrêa Leite

Universidade Federal do Pará | UFPA

Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Damasio Alves de Lima e Rosilene Costa Duarte Lima, que sempre se dedicaram e nunca mediram esforços durante a minha criação, para garantir que eu tivesse um lar acolhedor e amoroso, e sempre se esforçaram para que eu tivesse acesso ao conhecimento, me incentivado e ensinado como ele pode ser uma ferramenta de transformação e como forma crescimento. Agradeço ao meu irmão João Gabriel Duarte de Lima, assim como os outros membros da minha família pelo constante apoio que me deram durante a minha jornada acadêmica. Sobretudo agradecer as minhas avós Hilda Alves de Lima e Maria Costa Duarte por serem sempre presentes na minha formação como pessoa e por sempre serem um exemplo de perseverança perante as adversidades que encontramos pelo caminho.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial para todos os professores que passaram pela minha jornada acadêmica, desde o nível do ensino básico até o ensino superior, por sempre me incentivarem ao aprendizado, em especial a professora Ana Cleia, que sempre me apoio e me incentivou a buscar a educação como uma ferramenta de mudança, e que me permitiu que eu pudesse crescer e estar no meio acadêmico.

Meus agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca, pela paciência, orientação, instruções e por me permitir fazer parte da equipe do LCADE, onde tive a oportunidade de aprender e me desenvolver como pesquisador e profissional, sem essa oportunidade que o senhor me proporcionou a minha trajetória acadêmica não seria a mesma. Da mesma forma gostaria de agradecer aos membros do LCADE, mas em especial ao Dr. Antonio Roniel Marques de Sousa e a Me. Iris Caroline dos Santos Rodrigues, por sempre me orientarem desde o início em conjunto com o Prof. Wellington, e me ajudarem a crescer como pesquisador, pela paciência para corrigir meus artigos e por sempre estarem disposto para me auxiliarem nas pesquisas e tirar as minhas dúvidas.

RESUMO

O fenômeno da Magnetohidrodinâmica (MHD) consiste na interação que o escoamento de um fluido condutor tem com um campo magnético externos, alterando desta forma o valor de ambos e demonstrando uma relação entre os fenômenos de dinâmica dos fluidos e eletromagnéticos. O estudo desse fenômeno se deu inicialmente durante o século XX com os trabalhos de Alfvén e Hartmman, e vem sendo amplamente utilizado tanto no meio industrial, como na metalurgia e mineração, quanto no meio acadêmico, no estudo de nanofluidos e no estudo de equipamentos elétricos isolados a gás. Devido ser baseados na equação de Navier-Stokes e das equações de Maxwell, o fenômeno de MHD não possuindo, desta forma, uma solução analítica dificultando assim o seu ensino. Neste contexto, foi desenvolvido uma Bancada Didática de MHD, com ferramenta para simular e demonstrar o comportamento da magnetohidrodinâmica de uma forma mais lúdica para alunos e professores. Desta forma, a bancada foi dividida em dois sistemas diferentes. Sendo o primeiro, o sistema hidráulico, composto por um duto de acrílico responsável pelo escoamento do fluido condutor que será estudado, e por dois ímãs de neodimel de 1.4T posicionados nas laterais do duto, gerando desta forma um campo magnético externo para interagir com o fluido, o sistema também é composto por uma bomba d'água para o bombeamento do fluido. O segundo sistema da bancada é o sistema eletrônico, composto por quatro sensores, sendo dois sensores de fluxo, para medição da velocidade, e dois sensores de efeito hall, responsáveis por medir a variação de densidade de fluxo magnético, estes sensores são conectados a uma ESP-32, que utiliza tecnologia IoT (*Internet of Things*) para apresentar em um dashboard apresentando os dados lidos nos sensores, atualizados em tempo real, com o intuito de demonstrar de maneira mais prática o comportamento de MHD. Com o intuito de validar o funcionamento da bancada foram realizados experimentos com duas soluções diferentes utilizando em uma NaCl e CH₃COONa em outra, foram realizadas ainda simulações computacionais por meio do Métodos de Volumes Finitos no software OpenFoam, para comparar os dados de velocidade e de densidade de fluxo magnético obtidos durante os experimentos na bancada. Com os resultados obtidos foi possível observar que a Bancada Didática de MHD é capaz de representar o fenômeno de Magnetohidrodinâmica de uma maneira mais didática, possibilitando desta forma a sua utilização como uma ferramenta de ensino.

Palavras-chave: Magnetohidrodinâmica, Simulação Computacional, ESP-32, Volumes Finitos, CFD.

ABSTRACT

The phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD) consists of the interaction between the flow of a conductive fluid and an external magnetic field, thereby altering the value of both and demonstrating a relationship between fluid dynamics and electromagnetic phenomena. The study of this phenomenon began in the 20th century with the work of Alfvén and Hartmann, and has been widely used in industry, metallurgy, and mining, as well as in academia, in the study of nanofluids and gas-insulated electrical equipment. Because it is based on the Navier-Stokes equation and Maxwell's equations, the MHD phenomenon does not have an analytical solution, thus making it difficult to teach. In this context, an MHD Teaching Bench was developed, with a tool to simulate and demonstrate the behavior of magnetohydrodynamics in a more playful way for students and teachers. Thus, the bench was divided into two different systems. The first is the hydraulic system, consisting of an acrylic duct responsible for the flow of the conductive fluid to be studied, and two 1.4T neodymium magnets positioned on the sides of the duct, thus generating an external magnetic field to interact with the fluid. The system also consists of a water pump for pumping the fluid. The second system on the bench is the electronic system, consisting of four sensors, two flow sensors for measuring speed, and two Hall effect sensors, responsible for measuring the variation in magnetic flux density. These sensors are connected to an ESP-32, which uses IoT (Internet of Things) technology to display the data read by the sensors on a dashboard, updated in real time, with the aim of demonstrating MHD behavior in a more practical way. In order to validate the operation of the bench, experiments were carried out with two different solutions, using NaCl in one and CH₃COONa in the other. Computational simulations were also performed using the Finite Volume Method in OpenFoam software to compare the magnetic flux velocity and density data obtained during the bench experiments. The results obtained showed that the MHD Teaching Bench is capable of representing the phenomenon of magnetohydrodynamics in a more didactic way, thus enabling its use as a teaching tool.

Key-words: Magnetohydrodynamics, Computational Simulation, ESP-32, Finite Volumes, CFD.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Metodologia.....	2
3. Desenvolvimento do Projeto.....	2
4. Artigo 1: Construção de uma Bancada Didática do Fenômeno de Magnetohidrodinâmica.....	4
5. Artigo 2: Ananalysis of MHD Effects in Conductive Fluid With Experimental Comparison.....	16
6. Artigo 3: Análise dos Parâmetros Magnetohidrodinâmicos no Escoamento de Fluido Condutor em Bancada Experimental.....	24
7. Conclusão.....	35
8. Proposta de Trabalhos Futuros.....	35
9. Referências.....	36
Anexos.....	38

1. Introdução

O fenômeno da magnetohidrodinâmica (MHD) pode ser definido como o comportamento exibido por um fluido condutor quando flui na presença de um campo magnético. Esse fenômeno começou a ser observado nos trabalhos de Hartmann [1] e Alfvén [2] no final da segunda metade do século XX e, desde então, tem sido de grande interesse tanto para a indústria quanto para a academia devido às suas várias aplicações possíveis, como no estudo de nanofluidos [3,4], polarização de gases [5], comportamento de ferrofluidos [6], fluxo de óleo [7] ou separação de emulsões [8-10].

Devido ao fato de apresentar uma interação entre o fluido e o campo magnético, sendo assim capaz de controlar seu regime de fluxo, o efeito MHD tem sido utilizado no estudo de nanofluidos, como pode ser visto em [3,4], além de ser amplamente utilizado no estudo do fluxo de óleo, como mostrado em estudos de separação de emulsões [8-10]. Esse efeito também pode ser observado no estudo de equipamentos elétricos, como disjuntores à base de SF₆ [5] ou transformadores isolados a gás, além de aplicações nas indústrias de mineração e extração de gás natural e petróleo [7], bem como na metalurgia [6].

No entanto, apesar de suas diversas aplicações e importância, o ensino da MHD é difícil devido à falta de ferramentas pedagógicas e soluções analíticas para o problema, dificultando a explicação do fenômeno e exigindo o uso de métodos numéricos para tal. Entre os métodos numéricos utilizados, destacam-se o Método dos Elementos Finitos (FEM) [11] e o Método dos Volumes Finitos (FVM) [12]. Através da discretização das regiões analisadas em pequenas células de controle no caso do FVM, ou pequenos elementos triangulares e/ou tetraédricos no caso do FEM [13], fornecendo assim soluções aproximadas para problemas diferenciais, próximas das analíticas [14].

Porém, a discretização das geometrias analisadas, apesar de permitir a solução numérica de problemas físicos, acaba por montar sistemas matriciais de equações diferenciais em grande escala [15], exigindo assim o uso de grandes estruturas computacionais para observar o fenômeno [16]. Neste contexto, o uso de simulações computacionais como estratégia de ensino vem ganhando espaço na academia, conforme mostrado em [15], ou estratégias experimentais para a observação do fenômeno. Desta forma estas estratégias vêm ganhando mais espaços nas áreas de automação [17], assim como para o ensino de tecnologias complexas, como Block Chains, na área de Tecnologia de Informação [18].

Por esse motivo, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada didática MHD capaz de medir os valores de vazão e densidade de fluxo magnético utilizando sensores de efeito Hall e sensores de vazão de água acoplados a um microcontrolador ESP-32 para medir os valores de vazão de um fluido condutor que estará em um duto acrílico e passará pelo campo magnético de dois ímãs de neodímio (N52) de aproximadamente 1,4T.

Os resultados obtidos na bancada foram comparados com os resultados obtidos através de simulações computacionais, a fim de verificar seu funcionamento. A bancada foi construída com o objetivo de desenvolver um produto educacional capaz de ilustrar os princípios básicos

do efeito MHD de uma forma mais lúdica, facilitando assim a compreensão desse fenômeno e representando uma importante contribuição tanto para o setor acadêmico quanto para o industrial.

2. Metodologia

A Bancada Didática de MHD foi desenvolvida utilizando dois sistemas distintos sendo eles, o sistema hidráulico, responsável pelo campo magnético e pelo escoamento do fluido condutor, e o sistema eletrônico, responsável pela medição dos sensores e a demonstração dos dados para o usuário. Utilizando estes dois sistemas combinados, é possível simular o efeito de MHD para vários fluidos condutores diferentes.

O sistema hidráulico da bancada é composto por um duto de acrílico de 1m de comprimento, responsável pelo escoamento do fluido condutor, existem dois ímãs de neodímio de aproximadamente 1.4T, que são responsáveis pela densidade de fluxo magnético externo, além destes componentes, o sistema hidráulico também é composto por uma bomba d'água, posicionado em um reservatório externo à bancada, para o bombeamento do fluido através da tubulação.

O sistema eletrônico da bancada é responsável pela medição da velocidade e dos campos magnéticos, através de sensores eletrônicos, além de apresentar os resultados aos usuários do equipamento. O sistema é composto por 2 sensores de fluxo, posicionados nos extremos do duto de acrílico, para a medição da variação da velocidade do fluxo de escoamento. De maneira similar, também foram posicionados dois sensores de efeito hall próximos aos ímãs com o intuito de medir a densidade de fluxo magnético na estrutura da bancada. Estes sensores são ligados a um microcontrolador ESP-32, escolhido devido seu suporte para IoT, que por sua vez se comunica com o usuário através de um dashboard, em um IP hospedado no próprio microcontrolador que transmite em tempo real os dados de velocidade e densidade de fluxo recebidos pelos sensores, possibilitando desta forma que o usuário perceba como o efeito de MHD interage com o fluido condutor.

3. Desenvolvimento do Projeto

Com o desenvolvimento da bancada, foram realizados diversos experimentos e testes com diferentes soluções e para a análise de diferentes aspectos do fenômeno do magnetohidrodinâmica. Foram realizadas ainda simulações computacionais, utilizando o Método de Volumes Finitos, com o intuito de comparar e validar os dados lidos pelos sensores da bancada.

Inicialmente foram realizados os testes do funcionamento da bancada com água destilada, onde os resultados obtidos foram apresentados no artigo “Construção de uma Bancada Didática do Fenômeno de Magnetohidrodinâmica”, publicado no LI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Neste trabalho foi abordado os aspectos construtivos da bancada, assim como os testes iniciais, visualizando desta forma o funcionamento dos sensores e da comunicação pelo

microcontrolador ESP-32, demonstrando desta forma o funcionamento e aplicação didática do projeto desenvolvido.

Para um segundo estudo foi realizado uma comparação entre os resultados dos testes obtidos, com os dados obtidos em simulações computacionais realizadas utilizando o Método de Volumes Finitos, no software OpenFoam aplicando as equações de Maxwell e Navier-Stokes, para o modelo de escoamento de um fluido condutor. Para este estudo também foram considerados diferentes números adimensionais, realizando a comparação entre os parâmetros do perfil de velocidade para números diferentes. Para a parte experimental foi realizada a comparação entre dois fluidos diferentes, sendo eles, água destilada e NaCl (Cloreto de Sódio), demonstrando desta forma o funcionamento da bancada para o fenômeno de MHD. Os resultados obtidos com este estudo foram utilizados na publicação do artigo na *International Conference of Industry Application* (Induscon 2023) denominado “Ananalysis of MHD Effects in Conductive Fluid With Experimental Comparison”, demonstrando o desenvolvimento do projeto da bancada de MHD.

Outro estudo realizado foi para observar o comportamento do efeito de MHD em duas soluções condutoras diferentes, analisando como os sensores da bancada consegue identificar a diferença entre os campos magnéticos e de velocidade para os dois fluidos. Os resultados desta análise foram publicados no artigo “Análise dos Parâmetros Magnetohidrodinâmicos no Escoamento de Fluido Condutor em Bancada Experimental”, no XII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM). Para a definição das propriedades elétricas dos fluidos, foram preparadas soluções com concentrações diferentes e medidos as suas condutividades, que foram utilizadas como dados de entradas para as simulações no software *OpenFoam*. Em seguida, foram comparados os resultados dos escoamentos das simulações com os dados mensurados na bancada, com o intuito de demonstrar não apenas, o efeito de MHD para duas soluções diferentes, mas também que a bancada é capaz de identificar o efeito em fluidos de condutividades diferentes.

Foram também feitas outras produções com o projeto da bancada, sendo elas o relatório que foi enviado para a “Premiação Abenge Mútua: Talentos da Engenharia”, onde o projeto conseguiu a primeira colocação na categoria Educação em Engenharia, além do relatório submetido para a concessão da patente da bancada didática, que possibilitou o Depósito do Pedido de Patente para o Instituto Nacional de Propriedade Industrial.

4. ARTIGO 1: Construção de uma Bancada Didática do Fenômeno de Magnetohidrodinâmica

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 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 pelo 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.

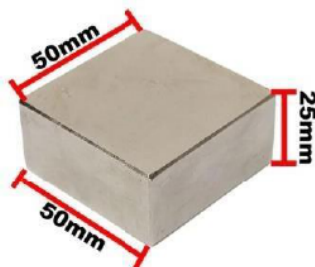
Figura 4 – Bomba de água usada para gerar o fluxo laminar.



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.

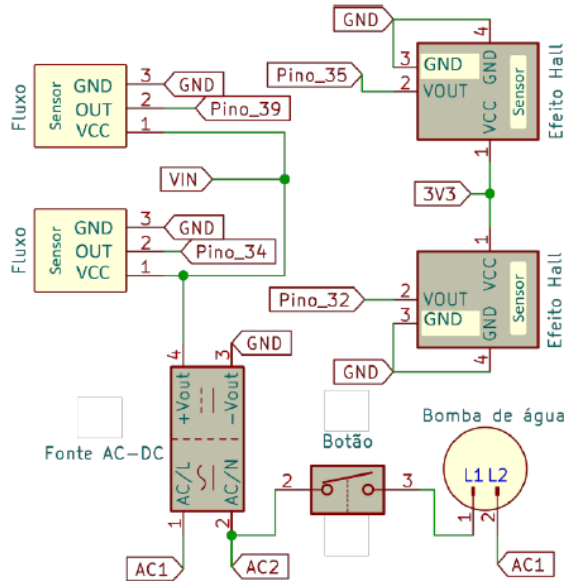
Figura 5 – Ímã de neodímio revestido com níquel.



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.

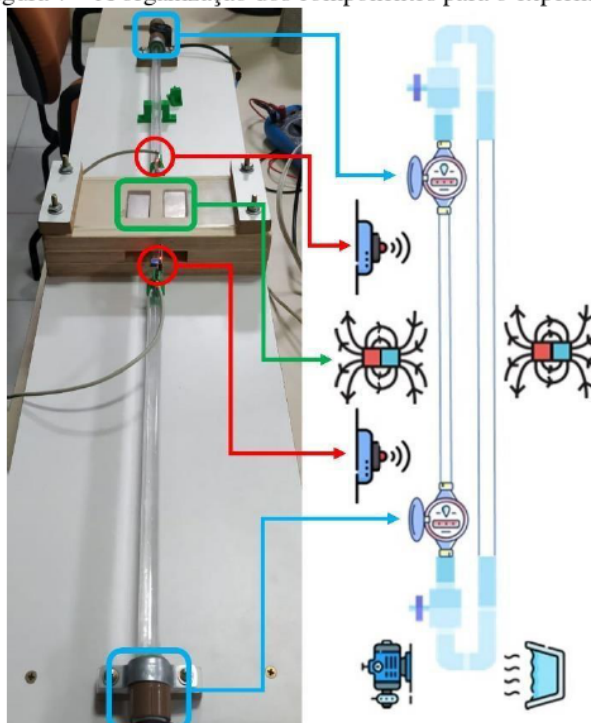
Figura 6 – O posicionamento dos componentes de monitoramento.



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 utilizados 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.

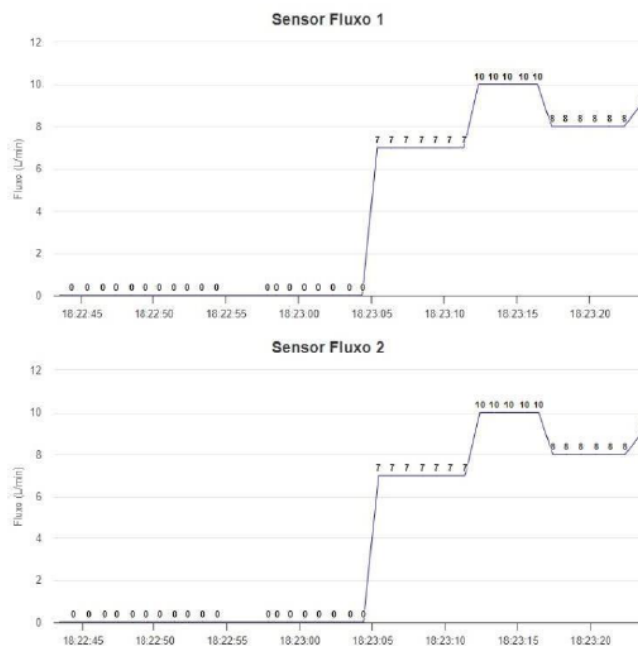


Fonte: Autores.

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.

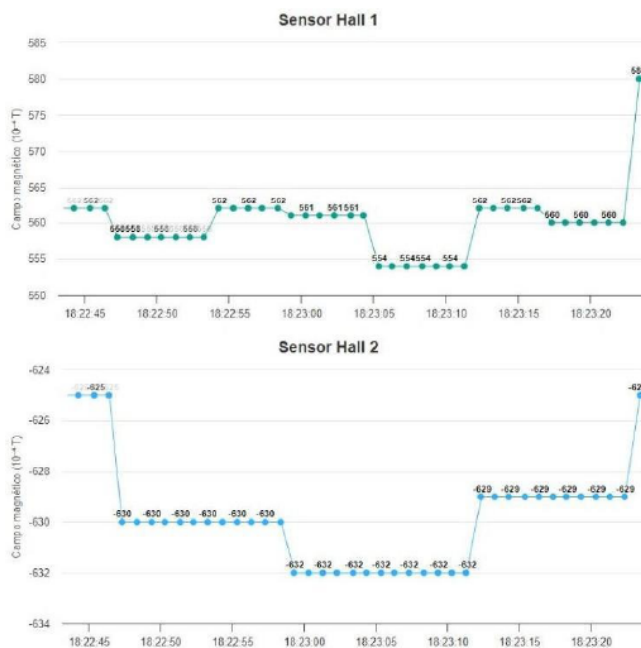
Figura 11 - Medindo os sensores de fluxo de água durante o experimento.



Fonte: Autores.

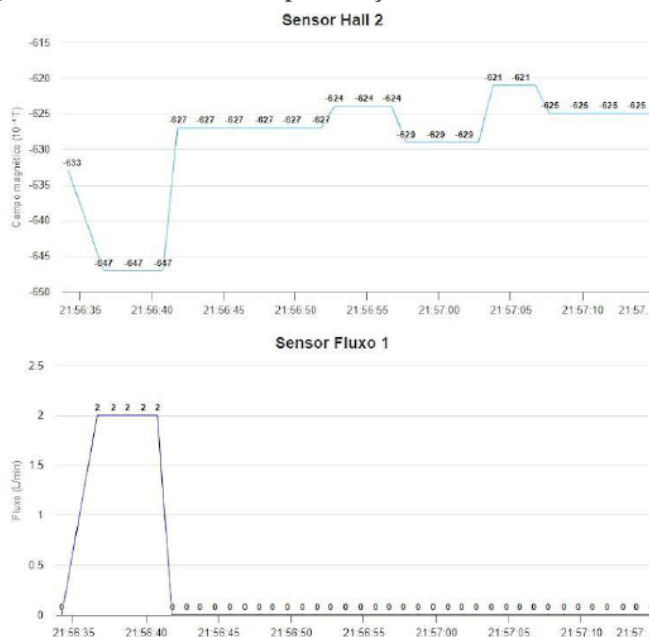
Seguindo a mesma estrutura dos sensores de fluxo, foram instalados dois sensores de efeito Hall, um antes dos ímãs (Sensor 1) e outro após os ímãs (Sensor 2). A Figura 12 mostra os valores medidos pelos sensores durante o experimento, pode-se observar que ao iniciar a análise os sensores já registram 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.

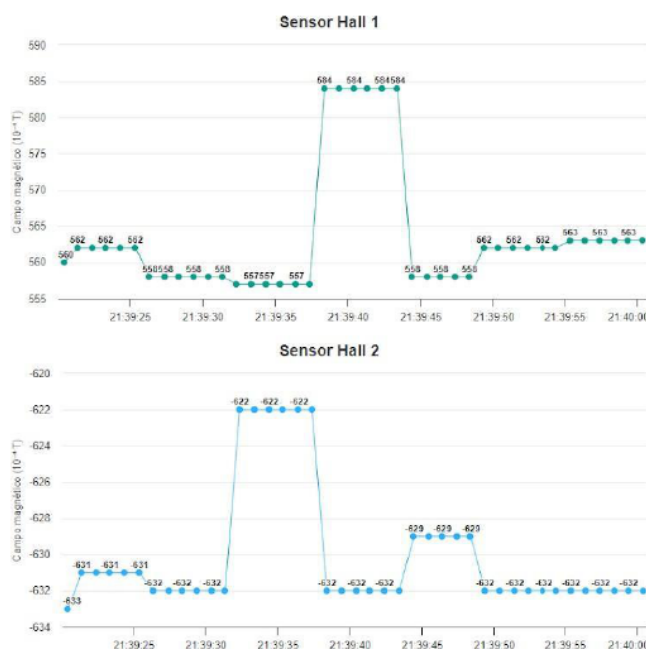
No segundo teste mostrado na Figura 14, o fluido condutivo já existente no sistema hidráulico foi utilizado para verificar se poderia haver alguma perturbação com o fluxo já contínuo. Essa abordagem também demonstra que a bomba de água não afeta as medições dos sensores de campo magnético.

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.*

5. ARTIGO 2: Ananalysis of MHD Effects in Conductive Fluid With
Experimental Comparison

Analysis of MHD Effects in Conductive Fluid With Experimental Comparison

Damasio Alves de Lima Junior
Institute of Technology
Federal University of Pará
Belém, Pará
damasio.junior@itec.ufpa.br

Lucas Henrique Brito Santos
Institute of Technology
Federal University of Pará
Belém, Pará
lucas.brito.santos@itec.ufpa.br

Wellington Fonseca da Silva
Institute of Technology
Federal University of Pará
Belém, Pará
fonseca@ufpa.br

Antonio Roniel Marques de Sousa
Institute of Technology
Federal University of Pará
Belém, Pará
roniel@ufpa.br

Marcelo de Oliveira e Silva
Institute of Technology
Federal University of Pará
Belém, Pará
mos@ufpa.br

Abstract— The phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD) is the study of the behavior of a conductive fluid when it flows in the presence of an external magnetic field. This phenomenon can be found in a variety of equipment, both in everyday life and in the industrial environment, such as transformers or oil pipelines. The aim of this work is to analyze how the MHD phenomenon affects both mechanical and electromagnetic behavior, using computer simulations using the finite element method and the finite volume method. It also aims to develop a system for measuring magnetic field values using Hall effect sensors connected to an Esp32, which is a microcontroller chosen because it has high processing capacity and also has integrated Wi-Fi and Bluetooth connections on the board. In order not only to validate the use of the mathematical methods used in the simulations as a way of predicting the behavior of MHD, but also to understand in a more practical way how this phenomenon works and how it affects the flow of a conductive fluid and its electrical properties.

Keywords - Magnetohydrodynamics, simulation, OpenFoam, Elmer, Sensing, Esp32.

I. INTRODUCTION

The phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD), can be defined as the behavior presented by a conductive fluid, when it flows in the presence of a magnetic field. This phenomenon began to be observed, from the works of Hartmann[1] and Alfvén[2] at the end of the second half of the twentieth century, and since then being of great interest for both the industrial branch, and for academia due to its various possibilities of applications, it can be in the study of nanofluids[3,4], in the polarization of gases [5], or in the behavior of ferrofluids[6], or in the flow of oil[7].

However, despite its various applications, the MHD studies present difficulties in the fact that their equations do not present analytical solutions, thus being necessary numerical solutions to perform a better analysis of the phenomenon. Among these numerical methods, the finite element method (fem) and the finite volume method (fvm) stand out. However, even with the use of these methods it is necessary to use computer simulation software, due to the fact that, to ensure better accuracy of results, the geometries are divided into several cells, control units where the calculations will be performed, which may be tetrahedral elements (fem) or hexahedral volumes (fvm).

Thus, this work aims to study how the interaction between a magnetic field generated by two magnets, and the flow of a conductive fluid (saline water) in a duct affects the electromagnetic and mechanical behavior of the system. Two simulation softwares were used, one being Elmer FEM for the simulation of the stationary electromagnetic effects in the duct [8], and the other OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) for the simulation of the MHD effect in transient regime [9,10]. In addition to the experimental implementation, using flow and hall effect sensors connected to an Esp32, to try to validate the data obtained by the simulations.

II. EQUATION AND PARAMETERS

A-Equations

Generally, the flow phenomena follow the Navier-Stokes equation, but due to the influence of the magnetic field and because the fluid is a conductor, the equation, for conductive and incompressible fluids, assumes that given in (1).

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

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

Where U is the velocity field, p is the pressure, ρ is the density, ν is the kinematic viscosity, the magnetic flux density and the current density are respectively represented by B and J . Where in (1) the vector product between J and B represents the Lorentz Force, while in (2) represents the condition of incompressible fluids. The equations of electromagnetism are also important to describe the fluid behavior, since they are used to determine the values of J and B as in [11,12]. In this work these values were calculated using a set (3) and (4) based on the electric potential.

$$\chi = U \times B \cdot S_f \quad (3)$$

$$\nabla^2(\sigma\phi) - \nabla \cdot \chi = 0 \quad (4)$$

Where (3) calculates the magnetic flux at a surface (S_f), while (4) represents Poisson's equation, where ϕ indicates the electric potential and σ the conductivity of the fluid.

The equations are adapted to the finite volume method (fvm), since by this method it is possible to solve differential equations more precisely. In this way the

differential equations are discretized through a control volume, and they are calculated in the center of this volume. Thus, as shown in [11], the equations take the form.

$$i_f = -\nabla_{sn} \phi + \chi \quad (5)$$

$$J_c = \frac{1}{\Omega_p} \sum_{f=1}^{nf} i_f (r_f - r_p) \cdot S_f \quad (6)$$

The current at the cell faces (i_f) is calculated as shown in (5), then the current density at the centroid of the cell J_c is calculated using i_f according to (6). The current density is used to calculate the Lorentz force in (1).

B- Dimensionless Numbers.

In addition to the equations, other parameters are taken into account for the study of MHD, such as Reynolds number and magnetic Reynolds number. The Reynolds number can be defined as a ratio between viscous and inertial forces, and is calculated by the formula $Re=UL/\nu$, it is used to determine the type of flow that is studied, laminar or turbulent. The magnetic Reynolds number, can be defined as the ratio between the diffusive moment and the advective moment ($Rem= UoL\sigma\mu$), and measures the dependence between the magnetic field of the magnets and the fluid velocity in the case studied.

As in [9,12] there are other important dimensionless parameters for the study of MHD, these being Hartmann number (M), Stuart number (N). Hartmann number measures how much the magnetic field influences the flow and is directly linked to its value as well as the fluid properties, it can be measured as the square root of the ratio between the electric and viscous forces and is denoted as in (7).

$$M = BL\sqrt{\frac{\sigma}{\rho\nu}} \quad (7)$$

Stuart's number is a relative measure between electromagnetic and inertial forces, and thus is a measure between Hartmann's number and Reynolds' number, and is therefore described as in (8).

$$N = \frac{M^2}{Re} = \frac{B^2 L \sigma}{U \rho \nu} \quad (8)$$

Based on the Reynolds number equations in (7) and (8), the data in the table below show the values of these constants for the fluid that suffers the action of the magnets in the pipe.

Based on the data analyzed, it can be seen that the case analyzed is a laminar flow, where the magnetic field generated by the fluid does not interfere in its flow, due to the fact that $Rem \ll 1$, and that, due to the value of Hartmann's number. You can see how far it is from a standard flow. Similarly it is possible to see from the Stuart number the difference between the inertial and electromagnetic forces acting on the fluid.

C-Stability of the simulation

As expressed in [9], for the simulations to express some stability, the Courant-Friedrichs-Lewy condition must be satisfied, which is shown in (9).

$$C \leq 0.5 \quad (9)$$

Besides this factor another criterion to be achieved concerns the magnetic dumping time τ , which is derived from Stuart's number, where $\tau = \sigma\rho/B^2$. Due to the coupling of the U and B fields, this magnetic dumping time must be longer than the time interval used in the simulation [9], as shown in (10).

$$\Delta t < \tau \quad (10)$$

Apart from these conditions the Von Neumann stability criterion must also be respected by the simulation. This criterion for 1D simulations gives rise to the parameter \mathcal{L} , which for a stable numerical scheme $\mathcal{L} \leq 2$ and $\mathcal{L} \neq 1$, where the parameter \mathcal{L} is mathematically defined by (11) and (12).

$$\mathcal{L} = \frac{\sigma B^2 \Delta t}{\rho} \quad (11)$$

$$C + 2\mathcal{L} + \frac{\nu \Delta t}{\Delta x^2} \leq 1 \quad (12)$$

Where (12) is used to define the Von Neumann stability criterion for a monotone case, where Δx is the distance between the analyzed elements. These parameters must be obeyed in order to ensure that the numerical schemes and simulations have a higher stability and converge, delivering a more refined and accurate result of the MHD phenomenon.

III. SIMULATION

To perform this work, simulation software was used as in [9-13], in order to make the calculation and analysis of a complex problem with no analytical solution, simpler. Therefore, two different open source platforms were selected, the first being Elmer, which uses the finite element method (FEM) for the simulation of physical problems, and in this study will be used to calculate the magnetic field that the magnets cause. The second is OpenFoam, a platform used mainly for the study of fluids, which performs its calculations through the finite volume methods, and because of this is used for the simulation of the flow itself.

For the development of the simulation two meshes were created, one for each method used in the simulation. The first mesh consists of a two-dimensional geometry, as shown in Fig.1. This geometry is contained by a plane with 0.5 area, and it represents the duct that is between two magnets, which produce an induced field of 1.4T, the duct is divided into three parts, an upper wall, a lower wall, and the central part where the fluid will flow.

This mesh is exported to the Elmer software, where its boundary conditions are defined for the plane surrounding the magnets and the pipe. In this simulation the magnetic field and the magnetic potential in the region are calculated, using the Mgdyn2D and MgdynPost solvers, and with this it is possible to describe the behavior and the values of the field leaving the magnets inside the central region of the duct.

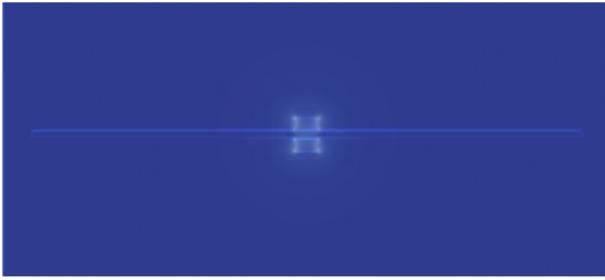


Fig. 1- Mesh used for the Elmer FEM simulation.

Based on the extracted data, the behavior of both the electric potential at the walls and the behavior of the magnetic field flux inside the pipe can be described. These extracted values are used as boundary conditions for the finite volume simulation, where the actual MHD simulation will be performed. For this second simulation a section of the pipe is chosen, as shown in Fig. (1), and this geometry is divided into a mesh with cells of size 0.0001m. In this simulation the electric potential (ϕ), velocity (U), pressure (p) will be calculated. These calculations are performed by a solver called *epotFoam*, just like the one done in [11]. But this solver has been modified to read the value of B as a boundary condition to facilitate the calculations of the program.

The input conditions for both velocity and potential were implemented by means of codes used in the software itself, in order to assimilate the data extracted from Elmer, similar to what was done in [8].



Fig. 2- Simulation in OpenFOAM.

IV. EXPERIMENT

The development of the MHD test involves two systems: hydraulic and electronic, which contain a complex installation structure.

The sensor system was developed to detect the flow and magnetic field data at the same instant of time to determine if there is a magnetic field disturbance between two magnets when a conductive fluid is flowing. The microcontroller responsible for receiving the information and plotting the graphs in real time is the ESP WROOM-32[14], which has Wi-Fi and Bluetooth connectivity built into the development board itself. The ESP 32 is shown in Fig. 3.

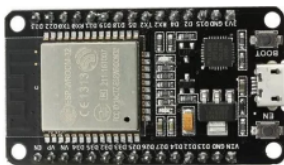


Fig. 3- The ESP-32 Development Board.

The flow system works with two SAIER model SEN-HZ21WA [15] water flow sensors at the beginning and end of the hydraulic system to check for velocity drop throughout the pipeline. The chosen flow sensor is shown in Fig. 4.



Fig. 4- Flow Sensor used to check the flow.

The magnetic disturbance detection system works from the Hall effect sensor KY-024 [16], since it uses an analog port to detect the intensity of the magnetic field submitted in its vicinity. Thus, this model was chosen because it is easy to handle and compatible with microcontroller and Ide Arduino programming. The sensor is shown in Fig. 4.

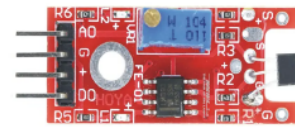


Fig. 5- Hall Effect Sensor Module model KY-024.

The variation of the flow is made from a submerged fountain water pump model EL-P310 with a flow rate of 220 liters per hour, sufficient parameters for a laminar flow, besides having low power consumption and its voltage is bivolt. The water pump used is shown in Fig. 5.



Fig. 6- Water pump used to generate the laminar flow.

The construction of the electronic circuit was done with space optimization and the reuse of connections between sensors, thus contributing to the efficiency of the installation and maintenance of the device. In addition, the magnetic field detection sensors are powered with 3.3 V while the flow sensors are powered with 5 V so that no interferences occur in the measurements. The following schematic shows the arrangement of the electronic components on the PCB board per Fig. 6.

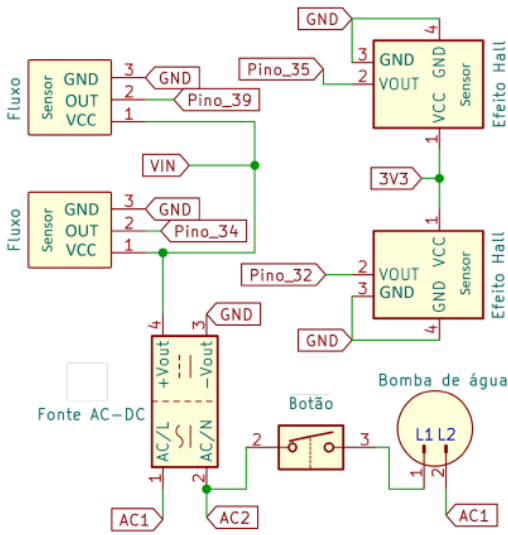


Fig.7- The positioning of the monitoring components.

The hydraulic system was built from a 1-inch-long, 2-meter-long transparent tube through which the conductive fluid circulates to the water tank where the submerged water pump is located. In addition, two ball valves were installed to control the return flow of the fluid passing through the magnets.

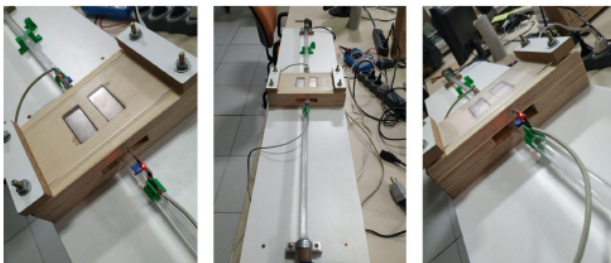
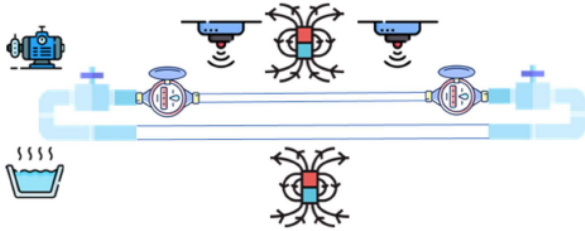


Fig.8- The organization of the components for the experiment.

Finally, a dashboard was developed from an HTML document programmed in the Jupyter Lab platform to plot graphs of the sensors in the same period of time, which improves the perception of the magnetic disturbance through the flow of the conductive fluid. Access is through the ESP-32's own IP-generated network, where the graphs are updated in real time. The following diagram in Fig. 9 shows the dynamics of the monitoring panel.



Fig.9- The layout of how the dashboard works with the test.

In addition, the data is stored in an online spreadsheet for use in simulations in a practical way, as relevant amounts are generated during testing so that there is minimal packet loss. In this way, the user has control of monitoring the disturbances at the time of testing, and can later run simulations comparing them to the expected results. The data storage scheme is shown below in Fig. 10.

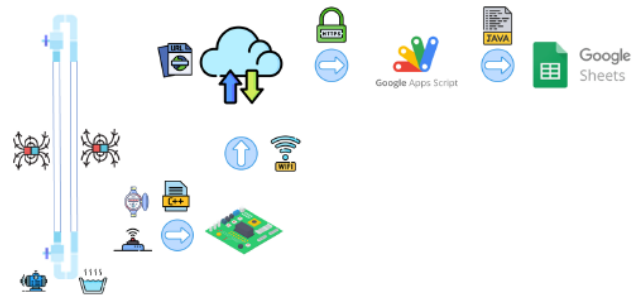


Fig.10- Online storage of the data obtained by the test.

After all the assembly and configuration of the experiment, two situations were analyzed to analyze the influence of the fluid on the magnetic field of the magnets. Initially the field without water flow in the duct was analyzed, Fig. 10 illustrates the measurement of the two sensors installed at the beginning (sensor 1) and end of the duct (sensor 2). Observing Fig. 11 it is possible to observe that the experiment started without water flow and soon after it was started the fluid circulation in the duct.

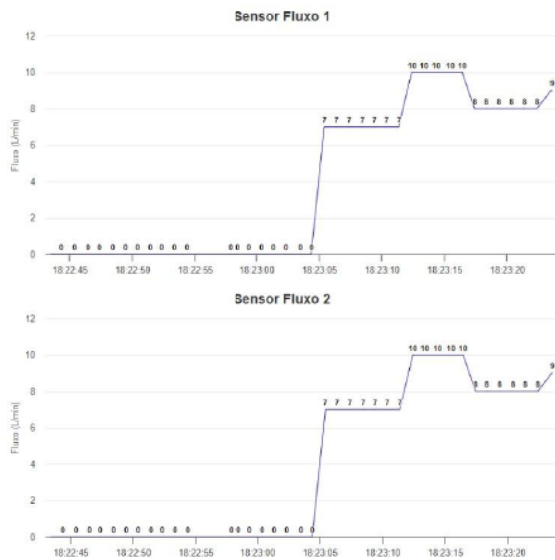


Fig. 11- Measuring the water flow sensors during the experiment.

Following the same structure of the flow sensors, two Hall-effect sensors were installed, one before the magnets (Sensor 1) and one after the magnets (Sensor 2). Fig. 12 shows the values measured by the sensors during the experiment, it can be seen that when starting the analysis the sensors already record the magnetic field of the magnets, soon after turning on the water flow in the duct this field suffers an increase that was recorded by the sensors, thus showing that the water flow exerts influence on the magnetic field.

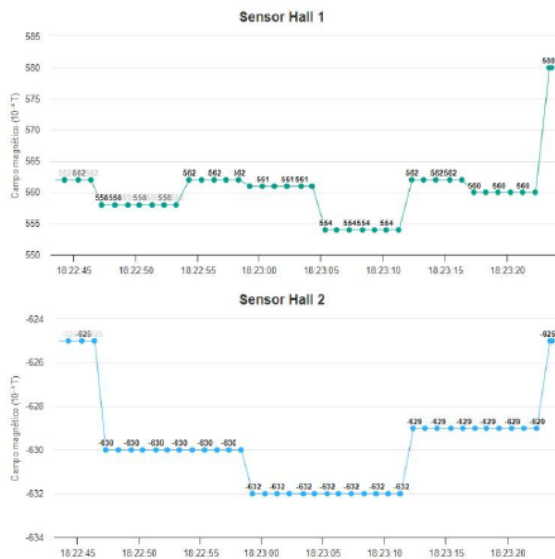


Fig. 12- Measurement of the Hall Effect sensors during the experiment.

V. RESULTS

With the data extracted, through OpenFoam it was possible to see that, as expected, the fluid reaches a constant velocity value in the center of the duct, that is, it is able to form completely at the beginning of its flow, as can be seen in Fig. 13.

Through the simulation performed for the determination of the magnetic field, it can also be noted that the magnetic field will be responsible for the appearance of a potential difference in the internal region, as can be seen in Fig. 14. This potential will be responsible for the generation of the induced current that will act on the Lorentz force, as in [11].

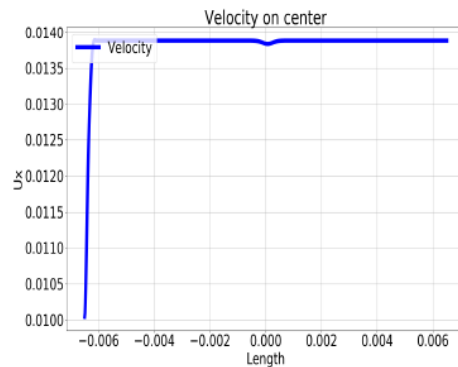


Fig. 13- Velocity profile along the analyzed pipe.

The behavior of the magnetic flux density B was analyzed using the finite element method for the duct filled with both air and the fluid analyzed, in the region where the sensors will be positioned. The results obtained can be seen in (Fig.15), where it is noticeable that, as expected for $Re_m \ll 1$, there is little interference of the fluid on the magnitude B , noticeable only for very small values.

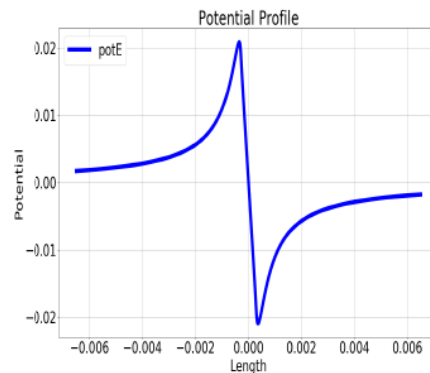


Fig.14- Potential in the inner walls.

By performing an analysis of the velocity behavior in relation to the walls it is possible to see the parabolic behavior of the velocity as a function of the duct width, Fig.16.

However, when comparing this result with the behavior of the flow extracted from a simulation containing the same parameters as the one performed, however, without the presence of the magnets, and therefore without a magnetic field, it is noticeable that there is a small difference between the values obtained, but this difference presents very small values for the flow sensors to capture.

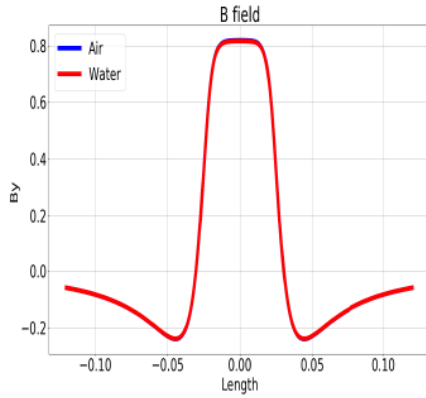


Fig.15- Magnetic flux density behavior.

With the data obtained it was possible to notice a small difference in the velocity values thus proving that the Lorentz force caused by the interaction of the fluid with the magnetic field interferes in the flow, since the force opposes the velocity, decreasing it. Based on (7), one realizes that to have a more noticeable influence of B , it would be necessary to increase its value or change the fluid properties.

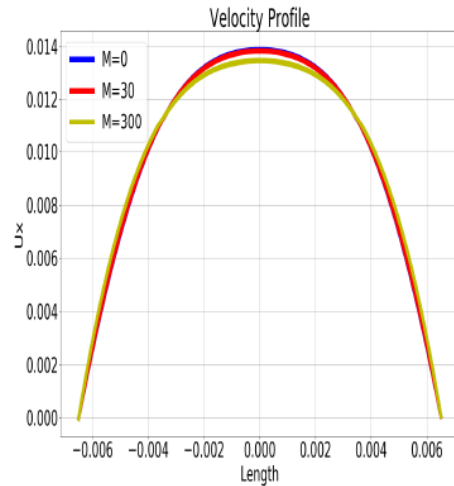


Fig.17- Comparison of different Hartmann numbers.

In the experimental part, tests were made to verify the influence of the magnets on the hall effect sensors to analyze the magnitude of the field generated around them. The first test was done with water coming into contact with the magnetic field as shown in Fig. 18.

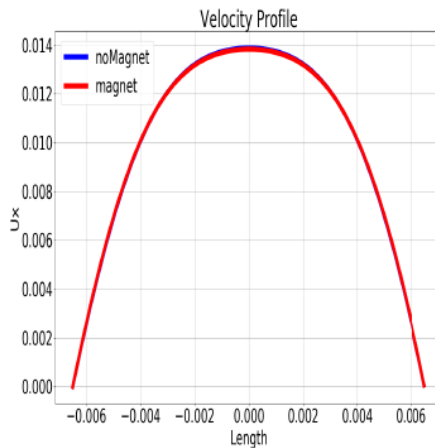


Fig.16-Comparison between velocity behavior without the presence of B (red) and with the presence of B (blue).

For a better visualization of the MHD phenomenon, a simulation was performed with a theoretical fluid with the same characteristics as the one used in the experiment but with a conductivity 100 times higher, resulting in a higher Hartmann number. The comparison of the velocity regime of this simulation with the others can be seen in Fig.17.

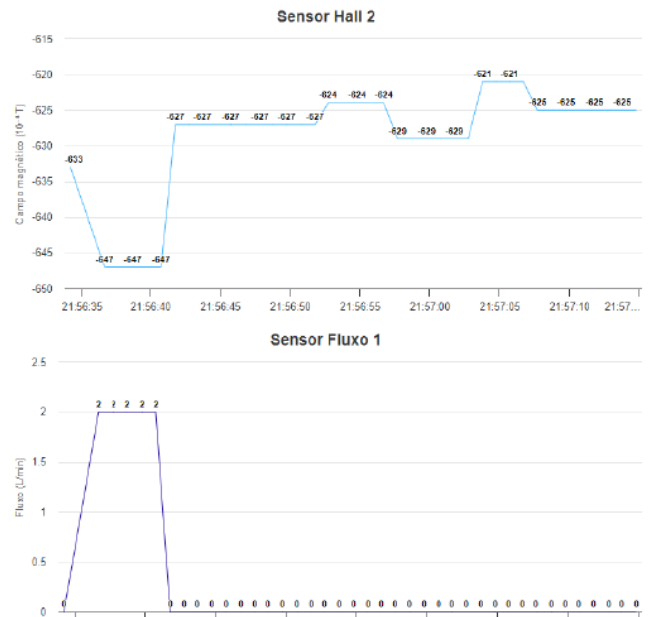


Fig. 18. The figure shows the influence of the disturbance of the conducting fluid on the magnetic field.

In the second test shown in Fig. 19, the conductive fluid already in the hydraulic system was used to see if there could be a disturbance with the already continuous flow. This approach also demonstrates that the water pump does not impact the measurements of the magnetic field sensors.

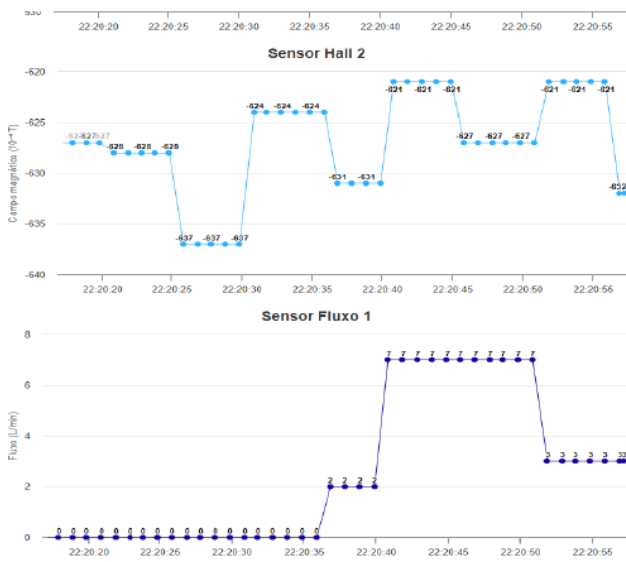


Fig. 19. The graph shows that the ignition of the water pump does not impact the measurement.

Next, the sensors were placed in opposite directions of measurements to observe that depending on the installation of the electronics they can measure opposite signal values, since the magnets have positive and negative poles that can be proven by the Hall effect sensor, as shown in Fig. 20.

INDUSCON - MHD

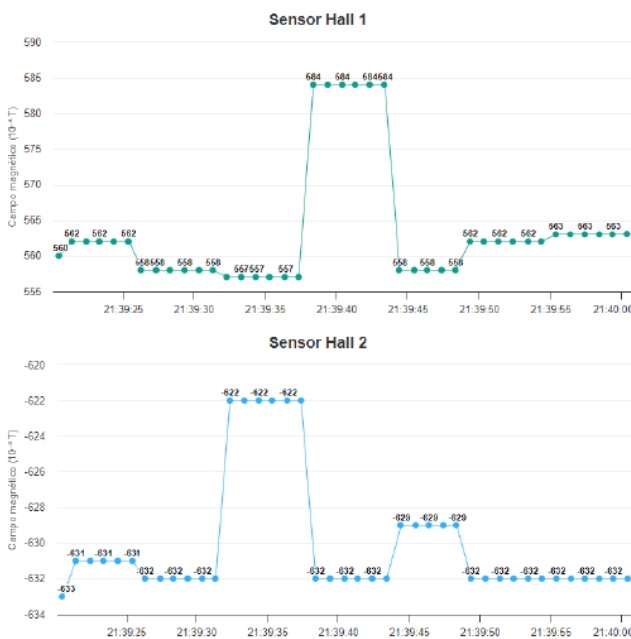


Fig. 20. The values varying with opposite signs show the fidelity of the Hall effect sensor measurements.

VI. CONCLUSION

Based on the data obtained through the simulations using finite volumes it can be seen that the magnetic field generated by the magnets influences, even if in a small scale due to the Hartmann number, the flow of the

conductive fluid studied, when it is in laminar regime and fully developed. Moreover, for larger values of the Hartmann number the greater this interference will be. This turns out to be a positive factor because, as well as making the interaction between the magnetic field and the fluid perceptible, it also shows that this interaction can be used to control the flow of a fluid.

Through simulations performed using the finite element method it is possible to observe that the presence of the magnets leads to the emergence of clearer electrical properties within the pipeline, such as a magnetic field and an electric potential. It is also worth noting that the very presence of the fluid will cause a change, however small, in the value of the magnetic field flux inside the pipe. It is therefore clear that the magnetohydrodynamic effect can be studied and applied in the oil industry [7] to analyze flow ducts, as well as in the use of transformers [5], or in the study of other industrial equipment as the ones in [17,18].

Thus, it is clear that the phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD) acts not only in the flow regime but also in the electromagnetic spectrum. Thus, it may have several applications and ways to be studied. And it is still being studied for applications in industry, such as petroleum or metallurgy as can be seen in [6, 7, 13], or in the development of electrical equipment used in power generation [5].

In future work, the authors intend to study the behavior of the magnetic field and potential for fluids with properties that cause greater interference. In addition to studying the MHD flow for larger Hartmann numbers.

REFERENCES

- [1] Hartmann, J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field. *Math.-Fys. Meddelelser* 1937, 15, 3–28.
- [2] Alfvén, H. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature* 1942, 150, 405–406.
- [3] Bin-Mohsin, B. (2019). Buoyancy Effects on MHD Transport of Nanofluid Over a Stretching Surface With Variable Viscosity. *IEEE Access*, 7, 75398–75406. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2917035>
- [4] Shah, Z., Dawar, A., Alzahrani, E. O., Kumam, P., Jabar Khan, A., & Islam, S. (2019). Hall Effect on Couple Stress 3D Nanofluid Flow Over an Exponentially Stretched Surface With Cattaneo Christov Heat Flux Model. *IEEE Access*, 7, 64844–64855. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2916162>
- [5] Homae, O., & Gholami, A. (2020, January). Prestrike modeling in SF6 circuit breakers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 114, 105385. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105385>
- [6] Islam, S., Zubair, M., Tassaddiq, A., Shah, Z., Alrabaiah, H., Kumam, P., & Khan, W. (2020). Unsteady Ferrofluid Slip Flow in the Presence of Magnetic Dipole With Convective Boundary Conditions. *IEEE Access*, 8, 138551–138562. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3011894>
- [7] 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.
- [8] Vencels, J., Ráback, P., & Geža, V. (2019). EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. *SoftwareX*, 9, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01>

- [9] 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>
- [10] Suponitsky, V.; Khalzov, I. V.; Avital, E. J. Magnetohydrodynamics Solver for a Two-Phase Free Surface Flow Developed in OpenFOAM. *Fluids* 2022, 7, 210. <https://doi.org/10.3390/fluids7070210>
- [11] 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
- [12] Melchiorri, L.: Baseline for developing a general OpenFOAM solver for magnetohydrodynamic (MHD). In Proceedings of CFD with OpenSource Software, 2021, Edited by Nilsson. H., http://dx.doi.org/10.17196/OS_CFD#YEAR_2021
- [13] Panicker, Nithin, Chaudhary, Rajneesh, Jain, Prashant K., Rao, Vivek, and Delchim, Marco. 2021. "COMPUTATIONAL MODELING AND SIMULATION OF ALUMINIUM SMELTING PROCESS USING OPENFOAM". United States. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1807279>.
- [14] Espressif Systems. (2022). "ESP32 Series Datasheet". Accessed: Feb. 14, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [15] e-Gizmo, "SEN-HZ21WA Flowmeter datasheet," Available at: <https://www.e-gizmo.net/oc/kits%20documents/SEN-HZ21WA%20Flowmeter/SEN-HZ21WA%20Flowmeter.pdf>, Accessed on: Mar. 8, 2023.
- [16] Joy-IT, "Linear Magnetic Hall Sensor datasheet," Available at: https://joy-it.net/files/files/Produkte/SEN-KY024LM/SEN-KY024LM_Datasheet_2021-02-23.pdf, Accessed on: Dec. 4, 2022.
- [17] Freitas, A. G.; Santos, R.; B. Pereira, L. M.; Lima, Y. O.; Riasco, L. A. M.; Transporte pneumático de particulados –Otimização energética em um novo vaso de pressão. International Conference on Industry Applications, 2021. Doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529770.
- [18] Freitas, A. G.; Santos, R.; B. Pereira, L. M.; Lima, Y. O.; Riasco, L. A. M.; Parametrização de um novo alimentador de sólidos em função da eficiência energética. International Conference on Industry Applications, 2021. Doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529775.

6. ARTIGO 3: Análise dos Parâmetros Magnetohidrodinâmicos no
Escoamento de Fluido Condutor em Bancada Experimental

CONEM2024-0136
ANÁLISE DOS PARÂMETROS MAGNETOHIDRODINÂMICOS NO
ESCOAMENTO DE FLUIDO CONDUTOR EM BANCADA
EXPERIMENTAL

Damasio Alves de Lima Júnior, damasio.junior@itec.ufpa.br^{1,2}
Lucas Henrique Brito Santos, lucas.brito.santos@itec.ufpa.br^{1,2}
Antônio Roniel Marques de Sousa¹, roniel@ufpa.br^{1,2}
Iris Caroline dos Santos Rodrigues, iris.rodrigues@itec.ufpa.br^{1,2}
Wellington da Silva Fonseca¹, fonseca@ufpa.br^{1,2}
Marcelo de Oliveira e Silva¹, mos@ufpa.br²

¹Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) - Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá- Av. Perimetral, 2651- Guamá, Belém-PA- 66077-830

²Instituto de Tecnologia (ITEC) - Universidade Federal do Pará - Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá Belém-PA - 66075-110

Resumo: O fenômeno da magnetohidrodinâmica (MHD) consiste no estudo do comportamento de um fluido condutor na presença de um campo magnético externo. Esse fenômeno começou a ganhar mais visibilidade durante a primeira metade do século XX, com as publicações dos trabalhos de Hartmann e Alfvén. E, atualmente vem sendo utilizado em diversos estudos, devido a sua aplicação para a predição de escoamento de fluidos, ganhando grande visibilidade no meio industrial, com pesquisas desenvolvidas em diversos ramos, como o petrolífero, ou no estudo de transformadores em SF₆. Contudo, apesar das suas diversas aplicações, a análise deste fenômeno ainda é complexa, isso, por estar baseada nas equações de Navier-Stokes acopladas às equações de Maxwell, pela influência do efeito eletromagnético, de modo que, o fenômeno da MHD não possui solução analítica. Desta forma o presente trabalho tem por objetivo demonstrar de maneira mais efetiva como ocorre o fenômeno de MHD assim como as propriedades do fluido podem interferir no mesmo, utilizando para isso simulações computacionais a partir do software OpenFOAM, que utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF), possibilitando assim a realização dos cálculos por computador. E, a análise de dados experimentais em bancada de teste, obtidos através de sensores de efeito Hall e de fluxo conectados a um ESP-32. Essas informações também foram utilizadas para validar os resultados obtidos na simulação computacional. Para o experimento, foram selecionados dois fluidos com propriedades diferentes para o estudo comparativo, sendo eles o Cloreto de Sódio (NaCl) e o Acetato de Sódio (CH₃COONa). As simulações e testes de bancada foram realizadas considerando ambos os fluidos, nos quais foram medidos valores de fluxo e campo magnético, observando desta forma como estes valores podem ser relacionados. Os resultados demonstram que devido as suas propriedades, o acetato de sódio apresentou uma maior suscetibilidade ao efeito de MDH, que o cloreto de sódio, mostrando uma menor velocidade de escoamento do fluido.

Palavras-chave: MHD, CFD, Esp-32, Simulação Computacional, OpenFOAM

1. INTRODUÇÃO

A magnetohidrodinâmica é um fenômeno que consiste na interação entre um fluido condutor e um campo magnético externo, que por sua vez interfere em seu escoamento. Desta forma, este fenômeno possibilita diversas aplicações no ramo industrial, como por exemplo no escoamento em gasodutos, ou no campo da pesquisa por meio do estudo de ferrofluidos, como demonstrado por Islam *et al.* (2020), ou na utilização em equipamentos elétricos como disjuntores a gás de SF₆ (Homaei *et al.*, 2020). Este fenômeno começou a ser estudado durante o século XX com os trabalhos de Alfvén (1942) e Hartmann (1937), que começaram a explorar a natureza deste fenômeno.

Contudo, apesar de ser um ramo importante para desenvolvimento da indústria, ainda está em desenvolvimento, o que gera certa dificuldade no seu ensino (Marques *et al.*, 2023). Isso ocorre devido ao fato de o efeito de magneto hidrodinâmica ser baseado na equação de Navier-Stokes, sendo necessário desta forma a utilização de simulações numéricas para o entendimento da mesma. Uma vez que, a visualização da influência do campo magnético no escoamento torna-se mais difícil. Desta forma, foram utilizadas simulações computacionais, por meio do método de volumes finitos, assim como realizado por Fonseca *et al.* (2021) e de Tassone (2016), tornando desta forma a visualização deste problema mais prática, para seu estudo.

Com base no apresentado, o seguinte trabalho tem como objetivo realizar o estudo do efeito de Magnetohidrodinâmica em dois fluidos com propriedades diferentes, para o estudo do desvio de escoamento nestes fluidos. Para isso, foram realizados testes experimentais para a determinação da condutividade elétrica dos fluidos analisados, sendo eles soluções de Cloreto de Sódio (NaCl) e Acetato de Sódio (CH₃COONa.3H₂O), que em seguida foram usados como dados para as simulações realizadas para determinar o comportamento do campo magnético e do campo de velocidade. Com o intuito de auxiliar na visualização dos efeitos de MHD do comportamento de diferentes fluidos, foi construída também uma bancada experimental com imãs de aproximadamente 1.4T, que possuem sensores de fluxo e de efeito hall, controlados uma ESP-32, para medição monitoramento do sistema, auxiliando no estudo deste importante fenômeno que se encontra em desenvolvimento.

2. METODOLOGIA

O estudo do escoamento em dutos é regido pela equação de Navier-Stokes em conjunto com a equação do momentum para fluidos incompressíveis, porém, a adição do campo magnético externo, no caso da Magneto hidrodinâmica, acaba por gerar uma força de campo eletromagnética, chamada de força de Lorentz, combinando desta forma os fenômenos mecânicos com os fenômenos eletromagnéticos, conforme explicado por (Fonseca *et al*, 2021), como pode ser observado na Eq.1. Vale ressaltar que ambas as equações são aplicáveis para fluidos condutores e newtonianos.

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

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

Onde U, representa a velocidade do fluido, a pressão no meio do escoamento, B e J às características elétricas representadas, respectivamente, pela densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente. Há também a influência das características físicas do fluido como a sua densidade, ρ , e sua viscosidade cinemática, ν . Devido a presença da força de Lorentz, torna-se necessário a inclusão de outras equações baseadas para assim calcular os valores de B e J, fechando assim o sistema de MHD (Tassone, 2016). De forma, utilizam-se como base as equações de Maxwell do eletromagnetismo para assim poder obter os valores de J e B.

Contudo, apesar destas equações que regem o fenômeno de escoamento, elas não possuem solução analítica, sendo necessário desta forma a utilização de métodos numéricos para a solução dos problemas de escoamento. Para isso, foram utilizados neste trabalho dois métodos numéricos diferentes sendo eles o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos.

O método de elementos finitos, ou em inglês *Finite Volume Method* (FEM), é um método matemático que surgiu na década de 1940 como uma solução para os problemas diferenciais mecânicos, que com o passar do tempo se desenvolveu para outros problemas físicos. Este método se baseia na linearização de equações diferenciais através de aproximações nodais de elementos tetraédricos. A utilização do FEM permite que elementos se conformem a superfícies curvas, o que faz com que haja uma continuidade de vetores potenciais para elementos tangentes, e permite saltos para componentes normais (Vences *et al*, 2019).

Enquanto, o método dos volumes finitos, ou em inglês *Finite Volume Method* (FVM), é um método mais simples de ser implementado em simulações de fluidos, que se baseia na divisão da geometria analisada em pequenos volumes de controle, criando sistemas que calculam as variáveis através do do centro desses volumes (Lima Júnior *et al*, 2023). Desta forma, estes métodos resolvem equações complexas através de suas simplificações para assim trazer um resultado mais aproximado do real (Fonseca *et al*, 2021), criando desta forma um conjunto de equações lineares.

Para o cálculo dos efeitos magnéticos, foi utilizado o sistema proposto por Tassone (2016), um sistema mais estável para a simulação de volumes finitos. Desta forma, calcula-se a força de Lorentz e a densidade de corrente através da variação do potencial elétrico, e como ele é causado no fluido pela interação da velocidade com o campo magnético externo. Para isso, calcula-se o fluxo através das faces das células, Eq. 3, e em seguida utiliza-se da equação de Poisson para assim poder obter o valor do potencial elétrico assim como pode ser visto na Eq. 4.

$$\chi = (U \times B) \cdot S_f \quad (3)$$

$$\nabla^2(\Phi) - \nabla \cdot \chi = 0 \quad (4)$$

Onde S_f se refere a superfície das células em que a geometria é dividida e χ indica o fluxo de velocidade e campo magnético através desta célula, e Φ é o potencial elétrico presente no fluido condutor. Em seguida calcula-se a corrente gerada devido a este potencial elétrico nas faces das células, assim como é representado pela Eq.5, e as correntes obtidas são reconstruídas através dos volumes de controle da geometria analisada, para assim se obter a densidade de corrente presente nos centróides de células, como é mostrado pela Eq.6.

$$i_f = -\nabla \Phi \cdot S_f + \chi \quad (5)$$

$$J_c = \frac{1}{\Omega} \sum_{f=1}^{n_f} i_f (r_f - r_p) \cdot S_f \quad (6)$$

Onde i_f representa as correntes nas faces dos volumes, e os termos r_f e r_p são referentes ao centro da face analisada e ao centróide do volume de controle, respectivamente, desta forma reconstruindo através de aproximações numéricas o valor de J , que será usado para calcular a força de Lorentz que entrara na equação de Navier-Stokes. Além das mudanças na fórmula do escoamento o fenômeno de MHD também surge a necessidade de novos números adimensionais para assim medir como os efeitos do campo magnético afetam o escoamento. Desta forma, dentre os números adimensionais destacam-se o número de Reynolds, número de Reynold magnético, o número de Hartman e o número de Stuart.

Para escoamentos em geral, o número de Reynolds mede o regime em que o fluido se encontra e, desta forma, se torna um fator importante para ser analisado quando no estudo do efeito de MHD, este parâmetro é medido diretamente pelos valores da velocidade, do comprimento do duto e ainda da viscosidade cinemática do fluido, Eq.7. Para os casos de MHD, existe também o número de Reynolds Magnético, que diferente do número de Reynolds, considerando sua dependência também das propriedades elétricas e magnéticas do fluido estudado, além das medidas de velocidade e comprimento, assim como pode ser vista na Eq.8, e define o quanto o comportamento do escoamento desvia do padrão devido ao valor do fluxo magnético.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (7)$$

$$Rem = UL\mu\sigma \quad (8)$$

Onde L se refere ao comprimento do duto μ e σ são, respectivamente, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica do meio. Outros parâmetros a serem abordados são os números de Hartman e o número de Stuart, ambos os quais medem as forças operantes no sistema de escoamento analisado. O número de Hartmann mede o tipo de força predominante no sistema, se são forças eletromagnéticas ou forças viscosas, e depende diretamente dessas propriedades físicas. De forma similar o número de Stuart, acaba por medir a razão entre as força eletromagnéticas e inerciais presentes no sistema, dependendo desta forma tanto dos valores de velocidade quanto dos valores de campo presentes no duto. Além disso, pode ser interpretado como dependente dos números de Reynolds e de Hartmann.

$$Ha = BL \sqrt{\frac{\sigma}{\rho\nu}} \quad (9)$$

$$N = \frac{Ha^2}{Re} = \frac{B^2 L \sigma}{\rho U_0} \quad (10)$$

3. EXPERIMENTOS

A implementação dos experimentos do MHD foram feitos a partir da bancada didática de MHD (Sousa, 2023), é estruturada por dois grupos de componentes: eletrônico e hidráulico. O sistema eletrônico é composto por dois sensores de fluxos SEN-HZ2IWA e a mesma quantidade de sensores de efeito Hall KY-024, os quais serão utilizados simultaneamente para análise da perturbação de um fluido condutor sobre um campo magnético gerado a partir de dois ímãs. Além disso, o gerenciamento dos dados dos sensores foi escolhido pelo microcontrolador ESP-32 pela sua aderência a tecnologia IoT (Internet of Things) pela antena Wi-Fi embutida, a qual pode se conectar via internet e atualizar os valores num banco de dados de forma online. Por último, o fluxo laminar é produzido por uma bomba d'água de fonte submersa modelo EL-P310 com vazão de 220 litros/hora, valores suficientes para os experimentos de MHD.

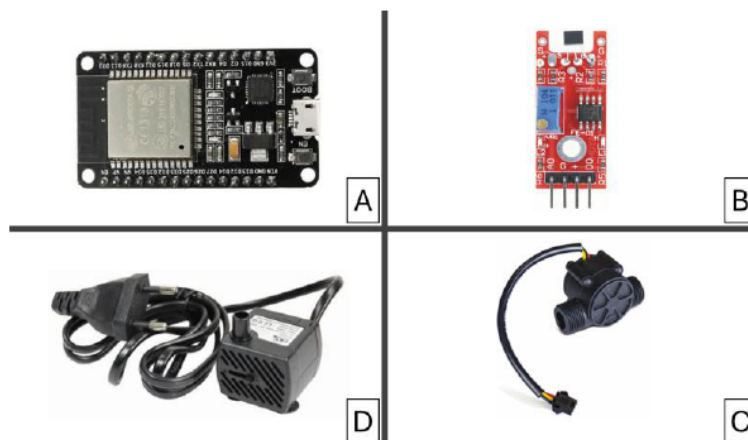


Fig 1. (A) ESP-32; (B) Sensor de efeito Hall; (C) Sensor de fluxo; (D) Bomba D'água.

Fonte: Autores (2024).

De maneira similar, foram realizados testes com o acetato de sódio, utilizando os mesmos tipos de amostras, para assim extrair a concentração necessária para a realização dos experimentos. Desta forma foram analisadas tanto as concentrações em ppm, Tab.3, quanto a condutividade, Tab.4, onde foi perceptível que a partir de 2.0g as soluções começam a saturar, definindo a concentração obtida, para ser utilizada nas soluções que serão utilizadas na bancada, para os experimentos de MHD realizados.

Tabela 3. Concentração em ppm das 10 medições de CH_3COONa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5g	2409	2309	2309	2311	2311	2311	2311	2311	2311	2311
1g	4378	4007	4375	4375	4375	4375	4375	4009	4009	4009
2g	7830	8052	8052	8058	8056	8058	8056	8056	7273	7830

Com os dados obtidos, foi possível realizar a preparação de soluções para assim serem medidos os valores de velocidade e campo magnético que são medidos pelos sensores. Possibilitando, portanto, comparar os resultados experimentais dos dois tipos de soluções diferentes e como suas propriedades elétricas podem influenciar no efeito de magneto hidrodinâmica de maneira mais prática. Os valores de condutividade também foram usados para a realização de simulações, utilizando o método de elementos finitos Elmer, para assim poder observar os valores medidos de campo magnético que é gerado no interior do duto. A geometria utilizada foi dividida em cinco corpos de duas dimensões sendo eles, dois ímãs, que são configurados como sendo materiais magnéticos, as duas paredes do duto, sendo elas compostas por polivinila, a região interior do duto, cujo material é definido como o fluido analisado, assim como o contorno da região, que é definido como ar, para assim facilitar os cálculos realizados nesta região.

Tabela 4. Condutividade em 10^{-4}S/m das 10 medições de CH_3COONa .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5g	4818	4618	4618	4622	4622	4622	4622	4622	4622	4622
1g	8756	8014	8750	8750	8750	8750	8750	8018	8018	8018
2g	1566	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1454	1566

A geometria foi dividida em pequenos elementos triangulares com 25310650 células, formando a malha que será usada para a simulação eletromagnética no Elmer. Em seguida foi feita uma malha tetraédrica com o cano de acrílico, com 390000 células, para realizar a simulação de escoamento dos fluidos que estão sendo estudado e observar o efeito de MHD.

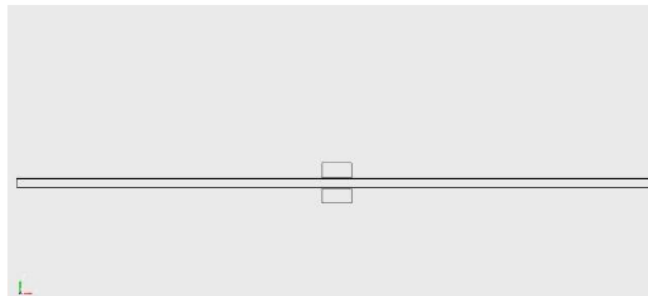


Figura 3. Geometria utilizada nas simulações de fluidos.

Fonte: Autores (2024).

4. SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS

Foram realizadas dois tipos de simulações 2d diferentes, uma para cada tipo de fluido, onde foram analisados como o fluxo de campo magnético irá se comportar na região, Fig.4. Além disso, foi possível extrair os valores do fluxo de campo na região interior do duto, assim como pode ser vista na Fig.5. Com isso é possível perceber que a condutividade do cloreto de sódio e do acetato de sódio causa o surgimento de um campo magnético gaussiano no interior do duto.

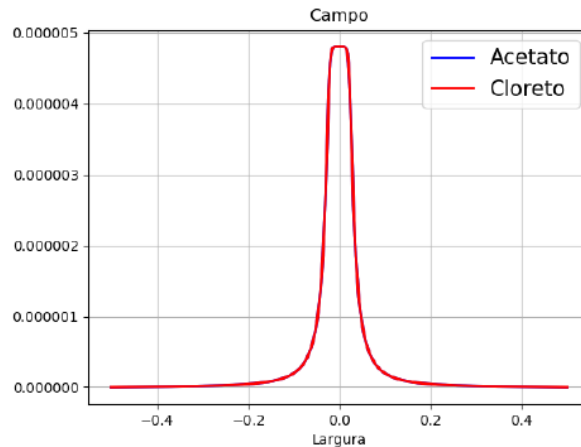


Figura 4. Gráfico da densidade de fluxo magnético no fluido.
 Fonte: Autores (2024).

É possível observar também que as propriedades elétricas de ambos os fluidos também causam o surgimento de um potencial no interior do duto. Mostrando desta forma que o campo magnético e a velocidade do fluido irão interagir, gerando desta forma o efeito de MHD na bancada através dos testes realizados.

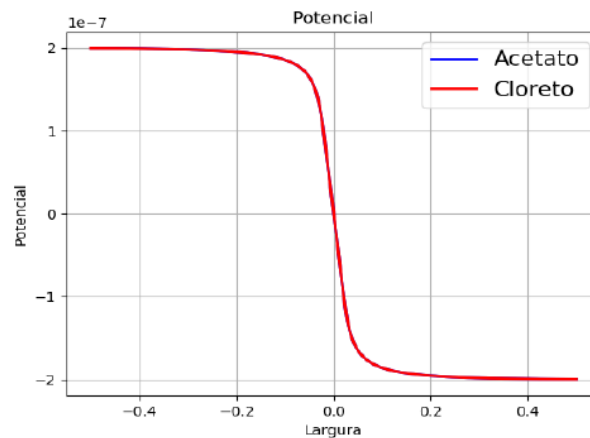


Figura 5. Gráfico do potencial elétrico.
 Fonte: Autores (2024).

Após a realização destas simulações, os valores de campo magnético foram usados como dados de entrada para realização de simulações de escoamento, utilizando para isso o software OpenFOAM, software baseado no método dos volumes finitos, onde foi analisado o comportamento do campo de velocidade dos dois fluidos diferentes, assim como é mostrado na Fig.7, a partir de estudos de escoamentos laminares. Para a realização desta simulação foi feita a divisão da geometria do cano em 5 regiões sendo elas: inlet, outlet, frontAndBack, wall1 e wall2, onde é possível ver as condições utilizadas para cada variável, na Tab.5. As simulações foram realizadas em uma malha estática que onde foi possível obter um valor de convergência adequado para a simulação.

Tabela 5. Condições de Contorno utilizadas na simulação.

	Velocidade (U)	Pressão (p)	Potencial Elétrico (ϕ)
inlet	0.01004	Gradiente zero	0
outlet	0	0	0
frontAndBack	0	0	0
wall1	0	Gradiente zero	2
wall2	0	Gradiente zero	2

Para as condições de contorno da pressão foram utilizadas condições de vonNeumann, para a entrada e para as paredes, exceto pela condição de saída onde é definida uma condição de Dirichlet, com valor nulo. Para o potencial elétrico, foram considerados os valores extraídos nas curvas de cada parede, obtidos pelas simulações de elementos finitos. Após as realizações das duas simulações foi possível extrair os valores residuais utilizando a biblioteca PyFoam, mostrando desta

forma a distância entre os resultados simulados e os resultados esperados da simulação, desta forma indicando a confiabilidade da simulação.

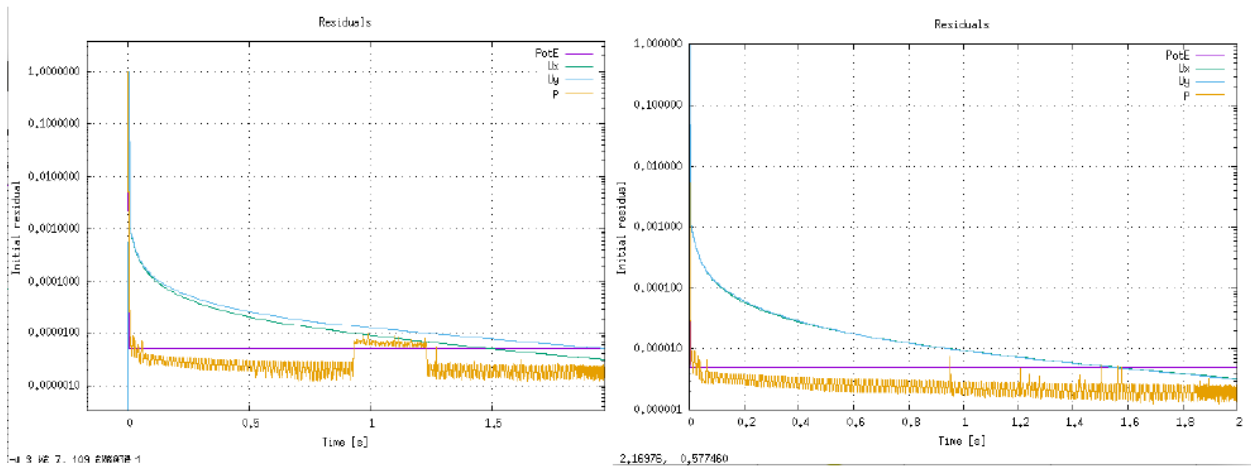


Figura 6. Gráficos dos resíduos das simulações, sendo a esquerda a de Acetato e a da direita a de Cloreto de Sódio.

Fonte: Autores (2024).

É possível perceber que a diferença de condutividade elétrica entre o cloreto de sódio e o acetato de sódio faz com que haja uma diferença de velocidade entre os dois, quando os fluidos estão completamente desenvolvidos mostrando desta forma que as propriedades elétricas de um fluido interferem no escoamento de MHD, assim como, consequentemente, as mudanças de seus números adimensionais.

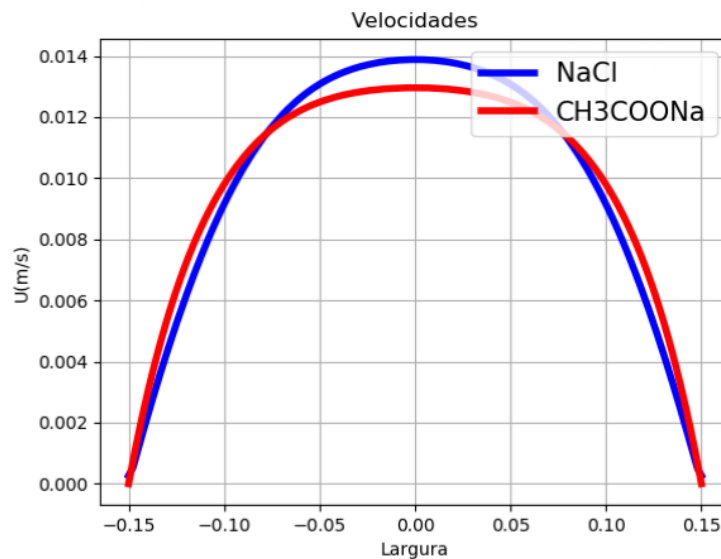


Figura 7. Gráfico comparando a velocidade de escoamento de NaCl e CH₃COONa.

Fonte: Autores (2024).

Com base nos dados extraídos dos testes foi possível perceber a variação tanto do fluxo de entrada quanto do campo magnético que são captados nos sensores. Os primeiros testes foram realizados com uma solução de cloreto de sódio, Fig.8, onde foi perceptível um aumento no campo magnético captado pelos sensores, demonstrando que a presença do fluido influencia no valor gerado. De maneira similar, o fluxo medido também sofreu uma diminuição em relação aos testes realizados apenas com água destilada.

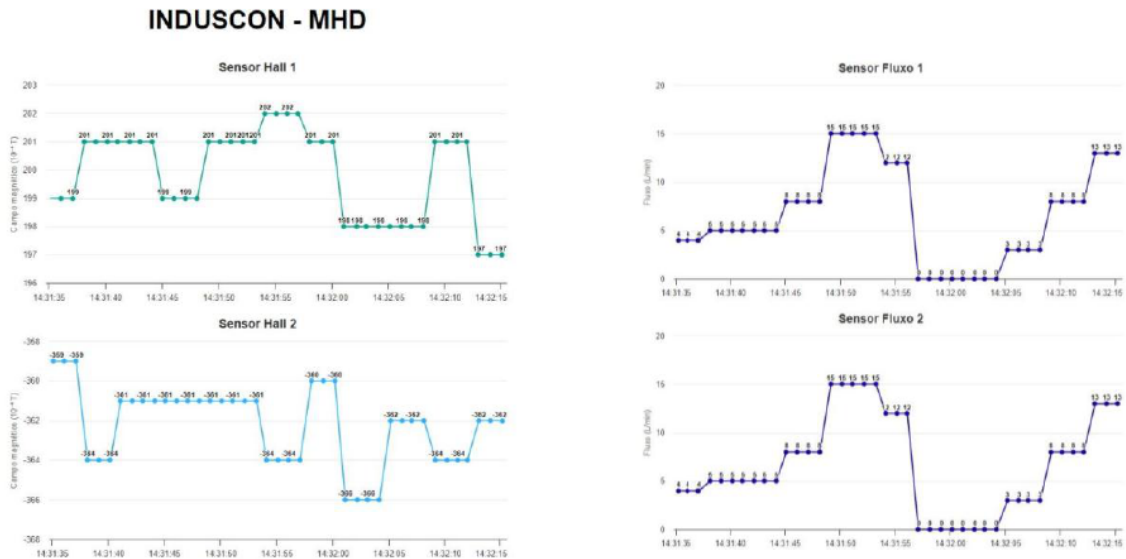


Figura 8. Dados aferidos da bancada para um escoamento de NaCl.
 Fonte: Autores (2024).

Os testes realizados com acetato de sódio, apresentaram um aumento nos valores de campo que são medidos, indicando que as propriedades elétricas diferentes do fluido geram um aumento maior do campo, de acordo com os dados captados pelos sensores, diferenciando dos valores medidos com cloreto de sódio. A análise do campo de velocidade também mostrou uma maior variação para a velocidade, Fig.9, com valores predominantemente menores do fluxo que é captado, demonstrando desta forma uma influência dos ímãs e da condutividade e permeabilidade magnética do fluido no processo de escoamento, onde o cloreto de sódio mostrou valores maiores para o seu fluxo, indicando uma velocidade de escoamento maior, concordando assim com os resultados que foram obtidos na simulação, onde foi demonstrado que a velocidade do acetato de sódio tende a ser menor devido a sua maior condutividade.

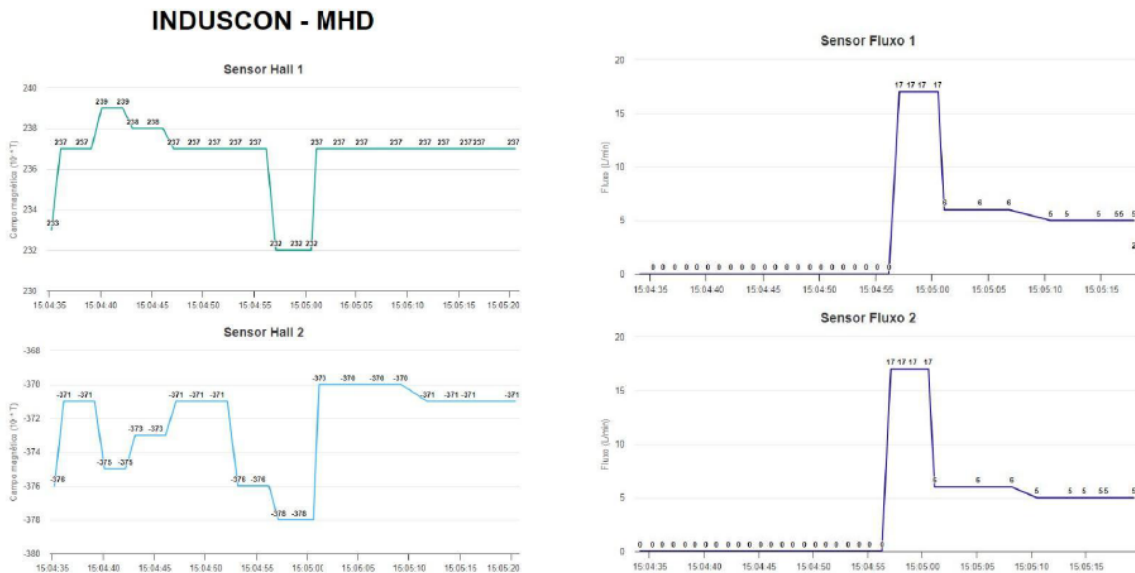


Figura 9. Testes de escoamento da bancada com CH3COONa.
 Fonte: Autores (2024).

Ao mover os sensores de efeito hall para regiões próximas dos sensores de fluxo, foi possível observar valores pequenos de campo magnético, assim como é mostrado pela Fig.10, demonstrando que, ainda que pequena, as propriedades condutoras do fluido são capazes de gerar um campo, assim como pode ser observado na simulação realizada, na qual foi possível observar o comportamento do campo magnético ao longo do duto para ambos os fluidos simulados. Desta forma fica mais visível, que existe uma condução de corrente, e conseqüentemente uma densidade de fluxo magnético, que é medida pelos sensores, causadas pelo efeito de MHD.

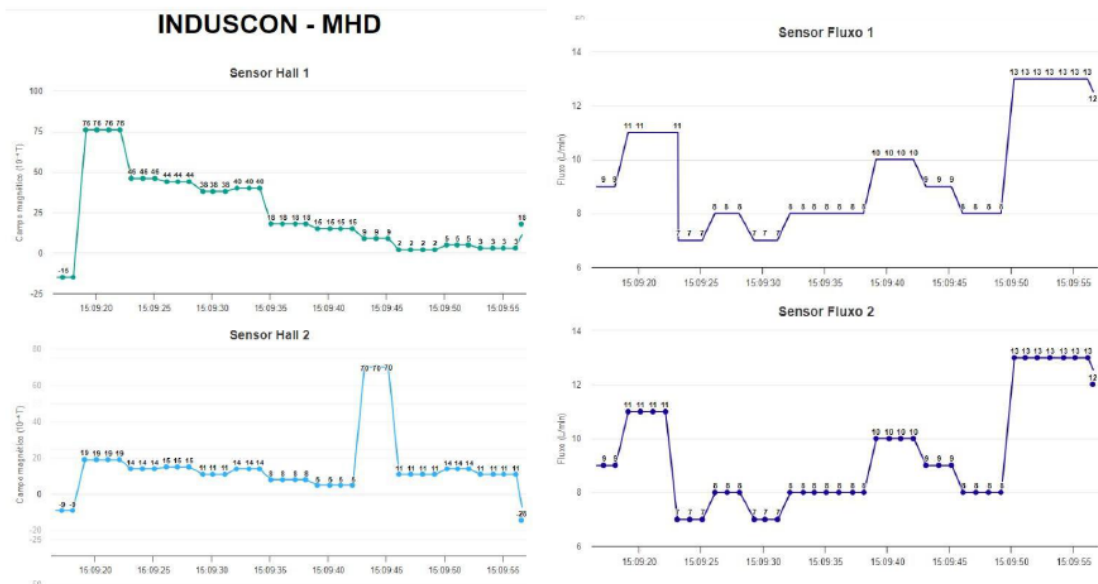


Figura 10. Medidas do campo magnético medidos ao longo do duto com Acetato de Sódio.
Fonte: Autores (2024).

5. CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos tanto com a simulação, quanto pelos valores obtidos com a bancada experimental, foi possível perceber que a presença de um campo magnético externo causa interferência no escoamento de fluidos condutores, desviando-os de seu comportamento padrão, sendo responsável desta forma por diminuir a velocidade do mesmo. Com a comparação realizada a partir dos experimentos, também foi possível notar que as propriedades elétricas do Acetato de sódio, o tornam mais susceptível a interferência do campo magnético em relação ao Cloreto de Sódio, devido a possuir uma condutividade e permeabilidade mais elevadas, além da utilização da bancada tornar possível perceber os valores de campo magnético ao longo do duto onde está ocorrendo o escoamento, assim como é mostrado na simulação. Desta forma, nota-se que o efeito do MHD pode ser demonstrado de maneira mais prática, o que neste trabalho foi realizado por meio da utilização de simulações computacionais e do desenvolvimento de experimentos. Ambos obtiveram êxito ao demonstrar o efeito, apresentando as variações que ocorrem no campo de velocidade e no campo magnético de maneira similar, o que também serviu para a validação dos dados da simulação.

6. AGRADECIMENTOS E EXPERIMENTOS

Os autores do artigo agradecem ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), assim como à Universidade Federal do Pará (UFPA).

7. REFERÊNCIAS

- Alfvén, H. (1942). "Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves". *Nature*, 150, pp. 405-406.
- Fonseca, W. S., Araújo, R. C. F., Silva, M. O., Cruz, D. O. A. (2021). "Analisis of the Magnetohydrodynamic Behavior of the Fully Developed Flow of Conducting Fluid". *Energies*, 14, 2463. doi:<https://doi.org/10.3390/en14092463>
- Hartmann, J. (1937). "Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field". *Math.-Fys. Meddelelser*, 15, pp. 3–28.
- Homae, O., Gholami, A. (2020). "Prestrike modeling in SF₆ circuit breakers". *Electrical Power and Energy Systems*, 114, 105585. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105385>
- Islam, S., Zubair, M., Shah, Z., Alrabaiah, H., Kumam, P., Khan, W. (2020). "Unsteady Ferrofluid Slip Flow in the Presence of Magnetic Dipole With Convective Boundary Conditions". *IEEE Access*, vol.8, pp. 138551-138562. doi:10.1109/ACCESS.2020.3011894
- Sousa, A.R.M., Santos, L.H.B., Lima Júnior, D.A. and Fonseca, W.S. (2023). "Construção de uma bancada didática para estudo do fenômeno de magnetohidrodinâmica". Apresentado no 51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. ABENGE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Tassone, A. (2016). "Magnetic induction and electric potential solvers for incompressible MHD flows". *Proceedings of CFD with OpenSource Software*, Edited by Nilsson H.
- Lima Júnior, D. A. L., Santos, L. H. B., Fonseca, W. S., Sousa, A. R. M., Silva, M. O. (2023). "Analysis of MHD Effects in Conductive Fluid With Experimental Comparison". 15th IEEE International Conference on Industry Applications (Induscon), São Paulo, Brasil.

- Sousa, A. R. M., Santos, L. H. B., Lima Júnior, D. A., Fonseca, W. S., 2023. “Construção de uma Bancada Didática para Estudo do Fenômeno de Magnetohidrodinâmica”. 51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Abenge, Rio de Janeiro, 2023.
- Vences, J., Ráback, P., Geža, V. (2019). “EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM couple for electromagnetics and fluid dynamics”. Software, 9, pp. 68-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01.007>

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF MAGNETOHYDRODYNAMIC PARAMETERS IN THE FLOW OF CONDUCTIVE FLUID ON AN EXPERIMENTAL BENCH

Damasio Alves de Lima Júnior, damasio.junior@itec.ufpa.br^{1,2}
Lucas Henrique Brito Santos, lucas.brito.santos@itec.ufpa.br^{1,2}
Antônio Roniel Marques de Sousa, roniel@ufpa.br^{1,2}
Iris Caroline dos Santos Rodrigues, iris.rodrigues@itec.ufpa.br^{1,2}
Wellington da Silva Fonseca, fonseca@ufpa.br^{1,2}
Marcelo de Oliveira e Silva, mos@ufpa.br²

¹Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) - Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá- Av. Perimetral, 2651- Guamá, Belém-PA- 66077-830

²Instituto de Tecnologia (ITEC) - Universidade Federal do Pará - Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá Belém-PA - 66075-110

Abstract. *The phenomenon of magnetohydrodynamics (MHD) consists of studying the behavior of a conducting fluid in the presence of an external magnetic field. This phenomenon began to gain more visibility during the first half of the 20th century, with the publication of works by Hartmann and Alfvén. Nowadays, it has been used in many studies to predict fluid flow, gaining great visibility in the industrial sector, with research carried out in various industries, such as the oil industry, or in the study of SF6 transformers. However, despite its many applications, the analysis of this phenomenon is still complex, because it is based on the Navier-Stokes equations coupled to Maxwell's equations, due to the influence of the electromagnetic effect, so the MHD phenomenon has no analytical solution. The aim of this work is therefore to demonstrate more effectively how the MHD phenomenon occurs and how the properties of the fluid can interfere with it, using both computer simulations with OpenFOAM software, using the finite volume method (FVM), as well as experimental data measured on an experimental bench using sensors connected to an ESP-32. To achieve this goal, two different fluids were chosen for comparison: Sodium Chloride (NaCl) and Sodium Acetate (CH3COONa). Simulations were carried out, as well as tests with both fluids where flow and magnetic field values were measured, thus observing how these values can be related. The simulations were carried out using OpenFoam, an open-source software that uses the Finite Volume Method (FVM) to simplify the Maxwell and Navier-Stokes equations, making it possible to perform the calculations by computer. Experimental data was obtained using Hall effect and flow sensors connected to an ESP-32 to measure the flow and magnetic field, which served to validate the results obtained in the computer simulation. The results show that due to its properties, sodium acetate was more susceptible to the MDH effect than sodium chloride, showing a lower fluid flow velocity.*

Keywords: MHD, CFD, Esp-32, Computer Simulation, OpenFOAM

7. Conclusão

Com base nos trabalhos realizados foi possível demonstrar o funcionamento da bancada de MHD, e como seu sensoriamento pode ser utilizado para medir as alterações dos campos de velocidade e de densidade de fluxo magnéticos, demonstrando assim o comportamento do escoamento. De maneira similar, a utilização do *dashboard* auxilia na visualização dos dados coletados pela ESP-32, demonstrando desta forma a capacidade da bancada de apresentar o efeito de MHD de forma lúdica para ser utilizado no ensino do fenômeno.

Assim como a utilização de simulações computacionais utilizando o Método de Volumes Finitos, para a realização do estudo do comportamento de fluidos de diferentes propriedades com o software *OpenFoam*, e os dados adquiridos pelos sensores para os mesmos fluidos simulados, colaboram para demonstrar como o projeto pode ser utilizado para perceber como a presença do campo magnético dos ímãs pode alterar o escoamento dos fluidos de maneiras diferentes, ampliando a inda mais a sua utilização didática. Vale ressaltar ainda que, a concessão de pedido de depósito de patente e o prêmio concedido para o projeto, ajudam a demonstrar a sua eficiência e versatilidade para utilização como um elemento facilitador do ensino desse importante fenômeno tanto para o meio acadêmico quanto para o meio industrial, ajudando na capacitação para ambos os meios públicos.

8. Proposta de Trabalhos Futuros

Com o desenvolvimento dos estudos de MHD, novos desafios foram encontrados em relação ao estudo do comportamento dos diferentes fluidos e como os diferentes tipos de escoamentos podem se comportar devido ao campo magnético, tornando necessário o desenvolvimento de novas ferramentas, tanto experimentais quanto computacionais, para esse estudo. Desta forma, como continuidade desta pesquisa, objetiva-se o desenvolvimento de uma nova bancada para o estudo do escoamento bifásico utilizando emulsões, formadas entre água e óleo, para o estudo do comportamento do fluido sob iteração do campo magnético. Em caráter de simulação também desenvolvido almeja-se o desenvolvimento de modelos de *solvers* no *software* OpenFoam para simulação de modelos multifásicos com acoplamento de magneto hidrodinâmica para modelos laminares e turbulentos.

9. Referências

- [1] Hartmann J., “Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field,” *Matematisk-Fysiske Med- delelser*, vol. 15, pp. 3–28, 1937.
- [2] Alfvén H., “Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves,” *Nature*, vol. 150, pp. 405–406, 1942.
- [3] Bin-Mohsin B., “Buoyancy effects on mhd transport of nanofluid over a stretching surface with variable viscosity,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 75398–75406, 2019.
- [4] Shah, Z.; Dawar, A. ; Alzahrani, E. O.; Kumam, P.; Khan, A. J.; Islam, S. “Hall effect on couple stress 3d nanofluid flow over an exponentially stretched surface with cattaneo christov heat flux model,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 64844–64855, 2019.
- [5] O. Homae and A. Gholami, “Prestrike modeling in sf6 circuit breakers,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 114, p. 105385, 2020.
- [6] Islam, S.; Zubair, M.; Tassaddiq, A.; Shah, Z.; Alrabaiah, H.; Kumam, P.; Khan, W. “Unsteady ferrofluid slip flow in the presence of magnetic dipole with convective boundary conditions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 138551–138562, 2020.
- [7] Martins, A.; Ferreira, M.; Neto, J.; Vianna, A.; Ressel, F.; Santos, R.; Rosa, K. “Aplicação de dispositivos magnéticos no combate `a incrustações inorgânicas,” in VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2012), (São Luís, Brasil), 2012.
- [8] Jiang, C.; Guo, L.; Li, Y.; Li, S.; Tian, Y.; Ma, L.; Luo, J. “Magnetic field effect on apparent viscosity reducing of different crude oils at low temperature,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineer-ing Aspects*, vol. 629, p. 127372, 2021.
- [9] Moriconi, L. “Magnetic dissipation of near-wall turbulent coherent structures in magnetohydrodynamic pipe flows,” *arXiv*, 2020.
- [10] Kalyuzhnaya, D. A.; Sokolov, E. A.; Vasilyeva, A. O.; Trepachev, A. V.; Sutarina, I. Y.; Ryapolov, P. A. “Dynamic behavior of gas bubbles and droplets in magnetic fluids in microfluidic chips of various config- uration in inhomogeneous magnetic field,” in 2023 Seminar on Digital Medical and Environmental Systems and Tools (DMEST), 2023.
- [11] MELO JUNIOR, M. A. ; CAMPOS, M. L. ; R. M. R. MORAIS, IAGO ; RODRIGUES, I. C. ; SOUSA, A. R. M. ; FONSECA, W. S. . Desenvolvimento de Projeto de um Motor Elétrico BLDC para Eletrificação de Barcos de Pequeno Porte para a Região Amazônica. In: XII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2024, Natal. CONEM, 2024.
- [12] Silva, E. D.; Santos, L. H. B.; Lima Júnior, D. A.; Silva, A. O. C.; Morais, I. R. M. R.; Fonseca, W. S. Computational Simulation of Coronary Blood Flow Using Real Physiological Data. 2025 16th International Conferance os Industry Application (Induscon), São Sebastião, Brasil. doi: 10.1109/INDUSCON66435.2025.11241919.

- [13] Vencels, J.; Rback, P.; V. Geřza, “Eof-library: Open-source elmer fem and openfoam coupler for electromagnetics and fluid dynamics,” *SoftwareX*, vol. 9, pp. 68–72, 2019.
- [14] Lima Júnior, D. A.; Rodrigues, I. C. S.; Sousa, A. R. M.; Fonseca, W. S. “Análise da eficiência energética em plataformas fotovoltaicas flutuantes através de simulação computacional,” in *51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)*, (Rio de Janeiro, Brasil), 2023.
- [15] Fonseca, W. S.; Araújo, R. C. F.; Silva, M. O.; Cruz, D. O. A. “Analysis of the magnetohydrodynamic behavior of the fully developed flow of conducting fluid,” *Energies*, vol. 14, p. 2463, 2021.
- [16] Exposito, D. E.; Marical, J. C.; Gil, P. C. “Using game-based learning and quantum computing to enhance steam competencies in k-16 education,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 67, no. 6, 2024.
- [17] Wang, Z.; Liu, Y.; Wang, L.; Fu, L. “A mars exploration control virtual simulation experiment platform for engineering practice in control engineering education,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 67, no. 4, 2024.
- [18] Chen, X.; Xing, Z.; Karki, B.; Li, Y.; Chen, Z. “Blockchain simulation: A web application for it education,” in *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, (Nevada, USA), 2021.

ANEXOS



Certificamos que

Damasio Alves de Lima Júnior

Foi agraciado com o Prêmio "ABENGE/MÚTUA Talentos na Engenharia", na categoria I: Educação em Engenharia, pelo trabalho "**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DO FENÔMENO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA**".

O Prêmio foi entregue no 52º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2024 e VII Simpósio Internacional de Educação em Engenharia, organizado pela Associação Brasileira de Educação em Engenharia - ABENGE e pela Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, realizado de 16 a 19 de setembro de 2024, na cidade de Vitória-ES.

Adriana Maria Tonini
Presidente da ABENGE

Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi
Diretor do Centro Tecnológico da UFES

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2024 023267 4

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 34621748000123

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Av. Augusto Correa n. 1 Cidade Universitaria José da Silveira Netto,
Guamá

Cidade: Belém

Estado: PA

CEP: 66075-110

País: Brasil

Telefone: (91) 3201-8314

Fax: (91) 3201-8022

Email: spi@ufpa.br

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE

Utilidade (54): MAGNETOHIDRODINÂMICA

Resumo: BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE
MAGNETOHIDRODINÂMICA

O fenômeno de Magnetohidrodinâmica (MHD), consiste em um fenômeno em que o escoamento de um fluido condutor interage com um campo magnético externo ao fluido, proporcionando desta forma um acoplamento entre fenômenos eletromagnéticos e fluidos, combinando desta forma as equações de Maxwell, com a equação de Navier-Stokes, o que vem se mostrando de grande uso nos ramos

da engenharia. Contudo, devido ao fato de seu comportamento se basear na equação de Navier-Stokes, este fenômeno não possui uma solução analítica, dificultando desta forma a sua análise e, conseqüentemente, compreensão. Desta forma, como uma tentativa de tornar mais simples a compreensão deste fenômeno, foi desenvolvida uma bancada experimental, utilizando equipamentos eletrônicos de monitoramento para assim medir os valores de velocidade do fluido e da densidade de fluxo magnético que irão atuar no escoamento de um fluido condutor. Para o desenvolvimento deste equipamento, foram feitas duas estruturas diferentes, sendo uma a estrutura hidráulica e a outra a estrutura eletrônica. Para o desenvolvimento da estrutura hidráulica, foi utilizado um cano de acrílico de 1pol de diâmetro e 1m de comprimento, onde o fluido irá passar, foram também utilizadas duas válvulas circulares para controlar a vazão, assim como uma bomba d'água, e dois ímãs de neodímio de 1,4T, para gerar o efeito eletromagnético. Já para a parte eletrônica, foram utilizados dois sensores de efeito hall para detecção da densidade de fluxo magnético, assim como dois sensores de vazão para medir a velocidade de escoamento do fluido no cano. Estes sensores foram conectados a um microcontrolador ESP-32, que por sua vez utiliza da antena Wi-Fi embutida a placa, para transmitir os dados dos sensores por meio de um código em html, que irá apresentá-los em forma gráfica para o usuário, tornando assim o processo de identificação de MHD mais didático e de simples compreensão.

Figura a publicar: 1

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 5

Nome: WELLINGTON DA SILVA FONSECA

CPF: 74709160244

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Conjunto Júlia Seffer, Rua 8, Nº 42

Cidade: Ananindeua

Estado: PA

CEP: 67020-460

País: BRASIL

Telefone: (91) 991 403645

Fax:

Email: fonseca@ufpa.br

Inventor 2 de 5

Nome: DAMÁSIO ALVES DE LIMA JUNIOR

CPF: 05038003257

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Graduação

Endereço: Avenida Nossa Senhora de Nazaré, 901

Cidade: Belém

Estado: PA

CEP: 66035-145

País: BRASIL

Telefone: (91) 999 435182

Fax:

Email: damasio.junior@itec.ufpa.br

Inventor 3 de 5

Nome: LUCAS HENRIQUE BRITO SANTOS

CPF: 02700168216

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Graduação

Endereço: AV. ALMIRANTE BARROSO, 1404

Cidade: BELÉM

Estado: PA

CEP: 66093-020

País: BRASIL

Telefone: (91) 989 442000

Fax:

Email: lucas.brito.santos@itec.ufpa.br

Inventor 4 de 5

Nome: ANTONIO RONIEL MARQUES DE SOUSA

CPF: 01299437206

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Doutorando

Endereço: RUA VITOR, Nº 18, CENTRO

Cidade: SANTA MARIA DO PARÁ

Estado: PA

CEP: 68738-000

País: BRASIL

Telefone: (91) 998 161709

Fax:

Email: roniel@ufpa.br

Inventor 5 de 5

Nome: MARCELO DE OLIVEIRA E SILVA

CPF: 61014834287

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: AV. 16 DE NOVEMBRO, Nº 698

Cidade: BELÉM

Estado: PA

CEP: 66023-220

País: BRASIL

Telefone: (91) 989 505456

Fax:

Email: mos@ufpa.br

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	GRU OF 122_2024 - 29409162322757205 - Deposito de pedido de Patente.pdf
Relatório Descritivo	RELATORIO DESCRITIVO.pdf
Reivindicação	REIVINDICAÇÕES.pdf
Desenho	DESENHOS .pdf
Resumo	RESUMO.pdf
Portaria	PORTARIA Nº 3320 2014 001.pdf
Decreto Reitor	Decreto de Recondução reitor 28 de junho 2013.pdf
Decreto	Decreto-Presidencial.-Nomeacao.-GILMAR- PEREIRA-DA-SILVA - DOU (1).pdf
Resolução	Resolução 662 UFPA.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em
07/11/2024 às 16:39, Petição 870240095641

SIAFI2024-DOCUMENTO-CONSULTA-CONDOC (CONSULTA DOCUMENTO)

17/07/24 14:56

USUARIO : JOÃO BARBOSA

DATA EMISSAO : 11Jul24

TIPO : 1 - PAGAMENTO

NUMERO : 2024GR800159

UG/GESTAO EMITENTE : 153063 / 15230 - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA

UG/GESTAO FAVORECIDA : 183038 / 18801 - INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDU

RECOLHEDOR : 153063 GESTAO : 15230

CODIGO RECOLHIMENTO : 72200 - 6 COMPETENCIA: JUL24 VENCIMENTO: 10Jul24

DOC. ORIGEM: 153063 / 15230 / 2024RP001390 PROCESSO : 040845/2024

RECURSO : 2

(=) VALOR DOCUMENTO : 70,00

(-) DESCONTO/ABATIMENTO:

(-) OUTRAS DEDUCOES :

(+) MORA/MULTA :

(+) JUROS/ENCARGOS :

(+) OUTROS ACRESCIMOS :

(=) VALOR TOTAL : 70,00

NOSSE NUMERO/NUMERO REFERENCIA : 00029409162322757205

CODIGO DE BARRAS : 8961000000 0 70000001010 3 95523127220 9 00360640000 4

OBSERVACAO

APROPRIACAO REF. OFÍCIO Nº 126 / 2024 - UNIVERSITEC (11.02). PARA ATENDER AS D

EMANDAS DE MARCAS E PATENTES DA AGÊNCIA DE INOVAÇÃO. CONF. SERVIÇO 200. TAXA D

LANCADO POR : 85199613200 - MARCO ANTONIO UG : 153063 11Jul2024 12:19

PF1=AJUDA PF3=SAI PF2=DADOS ORC/FIN PF4=ESPELHO PF12=RETORNA

Recibo do Pagador



001-9

00190.00009 02940.916238 22757.205178 1 97950000007000

Nome do Pagador/CPF/CNPJ/Endereço

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA CPF/CNPJ: 34621748000123

AV AUGUSTO CORREA N 1 CIDADE UNIVERSITARIA JOSE DA SILVEIRA NETTO GUAMA, BELEM -PA CEP:66075110

Sacador/Avalista

Nosso-Número
29409162322757205

Nr. Documento
29409162322757205

Data de Vencimento
01/08/2024

Valor do Documento
70,00

(=) Valor Pago

Nome do Beneficiário/CPF/CNPJ/Endereço

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUST CPF/CNPJ: 42.521.088/0001-37

RUA MAYRINK VEIGA 9 24 ANDAR ED WHITE MARTINS , RIO DE JANEIRO - RJ CEP: 20090910

Agência/Código do Beneficiário
2234-9 / 333028-1

Autenticação Mecânica



001-9

00190.00009 02940.916238 22757.205178 1 97950000007000

Local de Pagamento

PAGÁVEL EM QUALQUER BANCO ATÉ O VENCIMENTO

Data de Vencimento

01/08/2024

Nome do Beneficiário/CPF/CNPJ

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUST CPF/CNPJ: 42.521.088/0001-37

Agência/Código do Beneficiário

2234-9 / 333028-1

Data do Documento
03/07/2024

Nr. Documento
29409162322757205

Espécie DOC
DS

Aceite
N

Data do Processamento
03/07/2024

Nosso-Número
29409162322757205

Uso do Banco
29409162322757205

Carteira
17

Espécie
R\$

Quantidade

xValor

(=) Valor do Documento
70,00

Informações de Responsabilidade do Beneficiário

A data de vencimento não prevalece sobre o prazo legal.

O pagamento deve ser efetuado antes do protocolo.

Órgãos públicos que utilizam o sistema SIAFI devem utilizar o número da GRU n o campo Número de Referência na emissão do pagamento.

Serviço: 200-Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

(-) Desconto/Abatimento

(+) Juros/Multa

(=) Valor Cobrado

Nome do Pagador/CPF/CNPJ/Endereço

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA CPF/CNPJ: 34621748000123

AV AUGUSTO CORREA N 1 CIDADE UNIVERSITARIA JOSE DA SILVEIRA NETTO GUAMA, BELEM-PA CEP:66075110

Código de Baixa

Sacador/Avalista

Autenticação Mecânica

Ficha de Compensação



BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA

Campo da invenção

[001] Magnetohidrodinâmica, Educação em Engenharia, Sistemas de medições, Monitoramento.

Fundamentos da invenção

[002] O fenômeno de magneto hidrodinâmica (MHD), pode ser definido como o comportamento apresentado por um fluido condutor, quando este escoar na presença de um campo magnético. Esse fenômeno começou a ser observado no final da segunda metade do século XX, e desde então vem sendo de grande interesse tanto para o ramo industrial, quanto para o meio acadêmico, devido às suas diversas possibilidades de aplicações, podendo ser no estudo de nanofluidos, na polarização de gases, ou no comportamento de ferrofluidos e até na exploração de petróleo.

[003] Apesar da importância crescente que o estudo de MHD vem mostrando, vários fatores dificultam seu ensino, dentre eles se destaca o fato de ser um ramo com poucas ferramentas didáticas desenvolvidas de forma acessível. Outro fator importante para a dificuldade de ensino do mesmo, é o fato de o fenômeno de MHD ser baseado na equação de Navier-Stokes, em conjunto com as equações de Maxwell, não possuindo desta forma uma solução analítica, tornando complexa a sua análise.

[004] 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, utilizando para isso um microcontrolador. Haja vista que a utilização de microcontroladores para o ensino de engenharia vem se mostrando uma estratégia já consolidada no meio acadêmico, devido a versatilidade e praticidade que proporciona, o projeto acopla a utilização de uma ESP WROOM-32, em conjunto com sensores de efeito hall, para detecção da densidade de fluxo magnético, e de sensores de vazão para aferição da velocidade

do fluido. Desta forma objetiva-se uma melhor exemplificação do fenômeno de MHD para a simplicidade de seu ensino.

Breve descrição dos desenhos

A Figura 1 demonstra o esquema geral da bancada desenvolvida, com as dimensões do equipamento, sendo 150 cm de comprimento, 25 cm de largura e 12 cm de altura.

A Figura 2 mostra o posicionamento dos componentes utilizados para a montagem e sensoriamento da bancada, destacando (1) o reservatório de água com a bomba, (2) os registros esféricos para controle de vazão do fluido, (3) os sensores de fluxo para aferição da velocidade do fluido, (4) os sensores de efeito hall para aferição da densidade de fluxo magnético e (5) os ímãs de neodímio.

A Figura 3 mostra os equipamentos utilizados para a montagem do sistema de medições, sendo (a) ESP-32, (b) sensor de efeito hall, (c) sensor de vazão e (d) bomba d'água utilizada.

A Figura 4 ilustra o esquema eletrônico utilizado para a montagem da placa, para monitoramento e aquisição de dados.

A Figura 5 demonstra o esquema de funcionamento das válvulas esféricas para controle do escoamento do fluido. Onde são utilizadas duas válvulas para regular o volume de fluido injetado no tubo de acrílico.

A Figura 6 demonstra o modelo e o posicionamento dos ímãs de neodímio utilizados para obter o campo magnético externo que irá interagir com o fluido. Os dois ímãs estão fixados na bancada de forma que o tubo de acrílico fique exatamente entre eles.

A Figura 7 exemplifica como o esquema de comunicação da bancada e do site html foram desenvolvidos dentro do Jupyter Lab, para assim ter acesso aos dados medidos pelos sensores instalados na própria bancada.

A Figura 8 se refere aos dados que foram obtidos pelos sensores de vazão com os testes realizados com o escoamento de água no equipamento.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos pelos sensores de efeito hall para a variação da densidade de fluxo magnético com os testes feitos com o escoamento de uma solução de água com NaCl na bancada.

Descrição da invenção

[005] O desenvolvimento da bancada de ensaio de MHD consiste em dois sistemas: um sistema hidráulico, responsável pelo escoamento do fluido condutor que está sendo analisado e um sistema eletrônico, para a leitura dos sensores de vazão do fluido e dos sensores de densidade de fluxo magnético. Ambos os sistemas são montados sobre uma estrutura de madeira com 150 cm de comprimento, 25 cm de largura e 12 cm de altura, assim como pode ser observado na Figura 1.

[006] O sistema eletrônico é composto por dois sensores de fluxos modelo SEN-HZ2IWA, que são utilizados para medir a vazão de entrada e saída de um tubo de acrílico, e dois sensores de efeito Hall modelo KY-024, que medem a densidade de fluxo magnético. Todos os sensores são utilizados simultaneamente para análise da perturbação de um fluido condutor sobre um campo magnético gerado a partir de dois ímãs posicionados próximo ao tubo onde irá escoar o fluido. Além disso, foi escolhido o microcontrolador ESP-32 para realizar o gerenciamento dos dados dos sensores, devido a sua antena Wi-Fi embutida, a qual pode se conectar via internet e atualizar os valores em um banco de dados de forma online. Os equipamentos utilizados podem ser vistos na Figura 3, e a disposição dos mesmos na bancada pode ser observado na Figura 2.

[007] A construção do circuito eletrônico foi feita com o intuito de otimizar o espaço da bancada, assim como reaproveitar as conexões entre sensores, dessa forma contribuindo para a eficiência da instalação e a manutenção do dispositivo, como é mostrado no esquema da Figura 4. Além disso, vale ressaltar que, os sensores de detecção de densidade de fluxo magnético são alimentados com uma tensão de

3,3V enquanto que os sensores de vazão são alimentados com uma tensão de 5V, para não ocorrer interferências nas medições, a alimentação da boba d'água de modelo EL-P310 que foi utilizada para movimentar o fluido ficou externa ao circuito de monitoramento.

[008] O sistema hidráulico foi construído a partir de um tubo de acrílico transparente de 1 pol de diâmetro e 1m de comprimento, além de vários conectores para a montagem de um sistema fechado, pelo qual o fluido condutor circula até o tanque de água onde está localizada a bomba de água submersa. Além disso, duas válvulas esféricas foram instaladas para controlar o fluxo de retorno do fluido que passa pelos ímãs, assim como é mostrado na Figura 5, possibilitando desta forma controlar o regime de escoamento que será analisado e medido pelos sensores.

[009] A vazão fornecida 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. Para a montagem do campo magnético do sistema foram utilizados 2 ímãs de neodímio revestido com níquel, medindo 50x50x25mm, como mostrado na Figura 6, que segundo o fabricante suporta até 280Kg e apresenta aproximadamente 14.800 Gauss, que fornecem uma densidade de fluxo magnético externa de aproximadamente 1,4T a ser captado pelos sensores e que irá interagir com o fluido estudado na bancada.

[0010] Por último, desenvolveu-se um dashboard a partir de um documento HTML programado na plataforma Jupyter Lab para plotar os gráficos dos valores medidos pelos sensores no mesmo período de tempo, a qual melhora a percepção da perturbação magnética através da vazão do fluido condutor, facilitando a percepção do efeito de MHD. O acesso é feito pela própria rede gerada no IP da ESP-32, onde os gráficos são atualizados em tempo real, tornando assim prática a sua visualização, o esquema de comunicação da bancada e do site html feito dentro do Jupyter Lab pode ser visualizado na Figura 7, e os gráficos de medição da vazão e da densidade de fluxo magnético podem ser observados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Exemplos de concretização da invenção

[0011] Para observar a funcionalidade da bancada foram realizados testes com e sem a presença de fluidos condutores, assim como testes padrões com água. No primeiro teste foi feita uma análise com os valores de escoamento nulos, onde foi possível perceber os sinais captados pelo sensor de efeito hall sem a perturbação do fluido, assim como visto na Figura 9.

[0012] O segundo teste foi realizado com o escoamento de água destilada, para assim observar se o acionamento da bomba d'água afetaria o sistema de medição, assim como se o escoamento de um fluido não condutor afetaria a densidade de fluxo magnético medido, haja vista que a condução da água destilada é baixa. Durante o experimento, pode-se observar que ao iniciar a análise os sensores já registram a densidade de fluxo magnético dos ímãs, logo após ligar a vazão de água no duto os valores medidos pelos sensores sofrem um aumento que foi registrado pelos sensores, mostrando assim que o fluxo de água exerce influência sobre a densidade de fluxo magnético, como pode ser visto na Figura 9.

[0013] No terceiro teste, foi analisado o escoamento com a presença de um fluido condutor, sendo este uma solução de água com cloreto de sódio. Com base nos dados extraídos dos testes foi possível perceber a variação tanto da vazão de entrada quanto da densidade de fluxo magnético captadas pelos sensores. Com os testes realizados foi perceptível um aumento na densidade de fluxo magnético pelos sensores, demonstrando que a presença do fluido condutor influencia no valor da densidade de fluxo magnético medido pelos sensores, mostrando desta forma como funciona o efeito de MHD, de uma maneira mais lúdica.

REIVINDICAÇÕES

1. BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA, **caracterizado por** um sistema eletrônico de monitoramento de velocidade de fluido e de densidade de fluxo magnético, composto por dois sensores de efeito hall e dois sensores de fluxo que são conectados a uma ESP-32, que por sua vez se utiliza do módulo Wi-Fi acoplado a placa para enviar os dados medidos para uma página em html, que por sua vez possibilita ao usuário ter uma melhor visualização das variações dos valores de velocidade e densidade de fluxo magnético.
2. EQUIPAMENTO, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** um sistema hidráulico, que possui um cano de acrílico de 1pol de diâmetro e 1m de comprimento, uma bomba d'água para o fluxo do fluido, duas válvulas esféricas para controlar a velocidade de escoamento e dois ímãs de neodímio com 1,4T.
3. EQUIPAMENTO, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** um sistema embarcado composto por circuito com microcontrolador de baixo custo, dois sensores de efeito hall, dois sensores de vazão de água e um módulo de alimentação 240-100 V (AC) para 5V (DC) para o monitoramento dos parâmetros aferidos.
4. MONITORAMENTO, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** um sistema embarcado que envia os valores de densidade de fluxo magnético em distâncias determinadas e a vazão do fluido do início e do final do cano de acrílico para um microcontrolador, o qual tem conexão com a internet em que os dados monitorados podem ser visualizados de maneira remota.

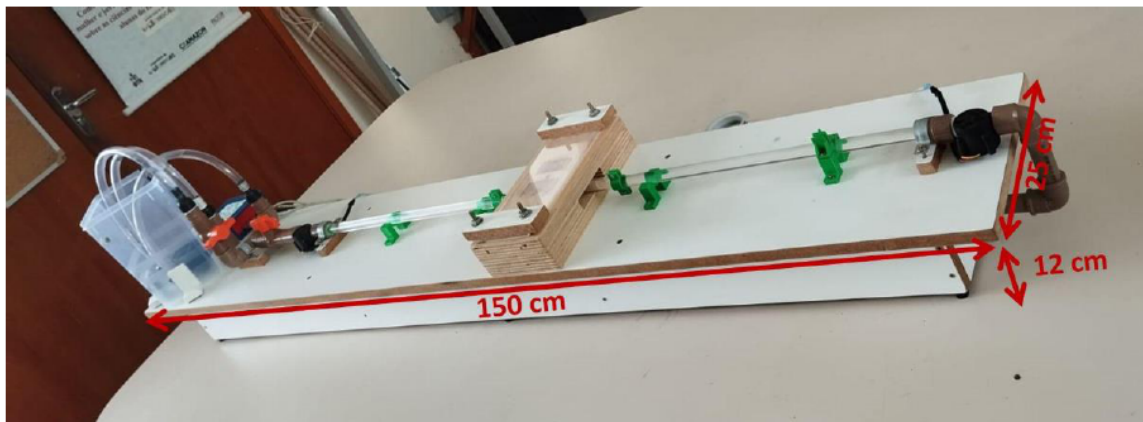


Figura 1

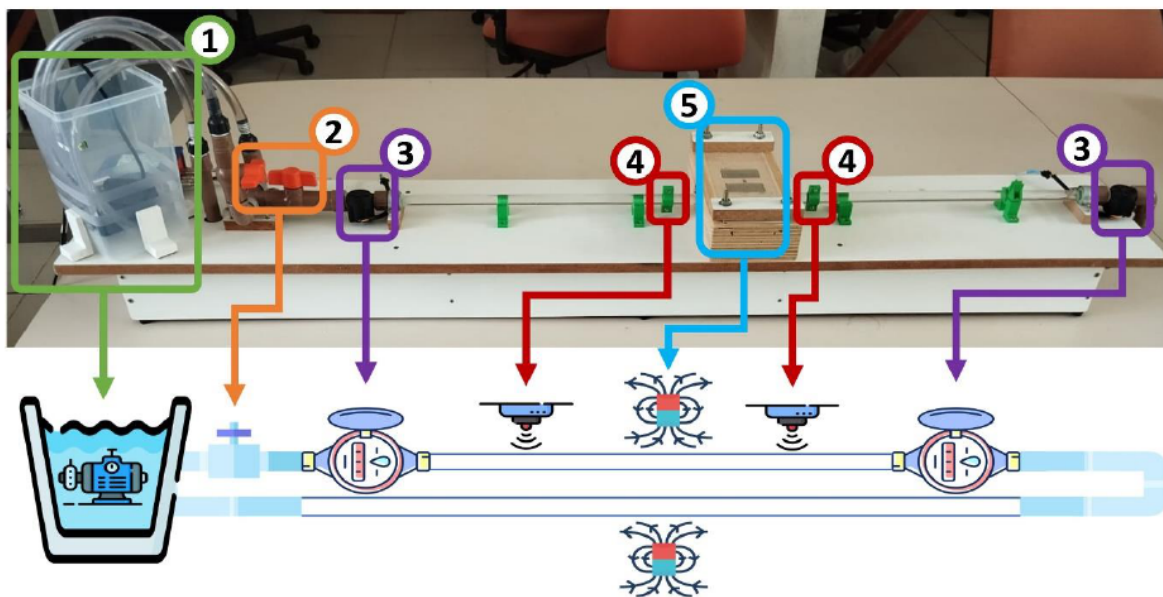


Figura 2

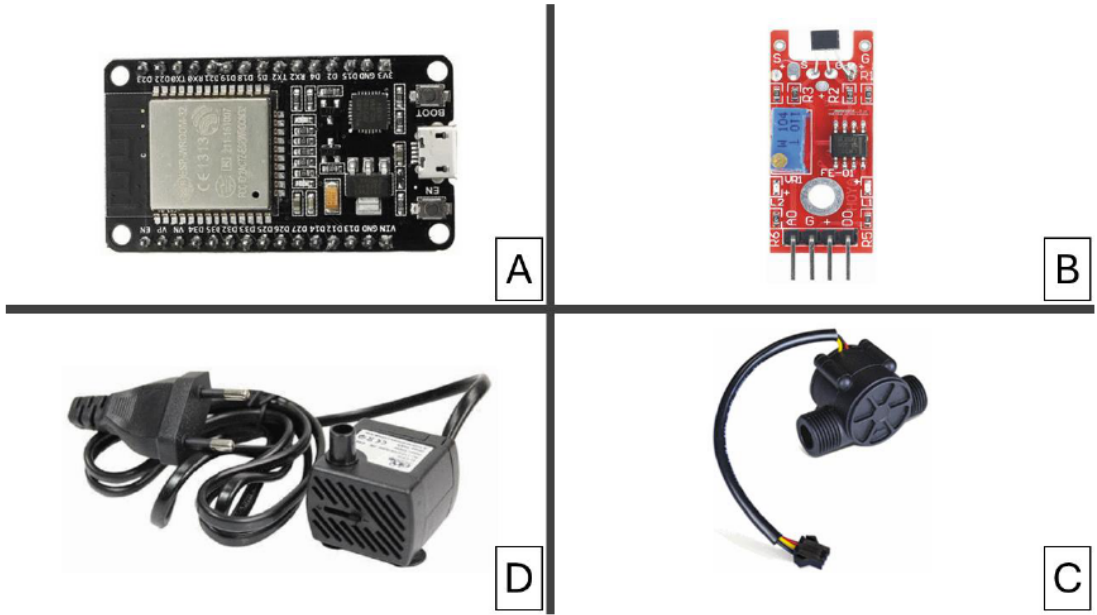


Figura 3

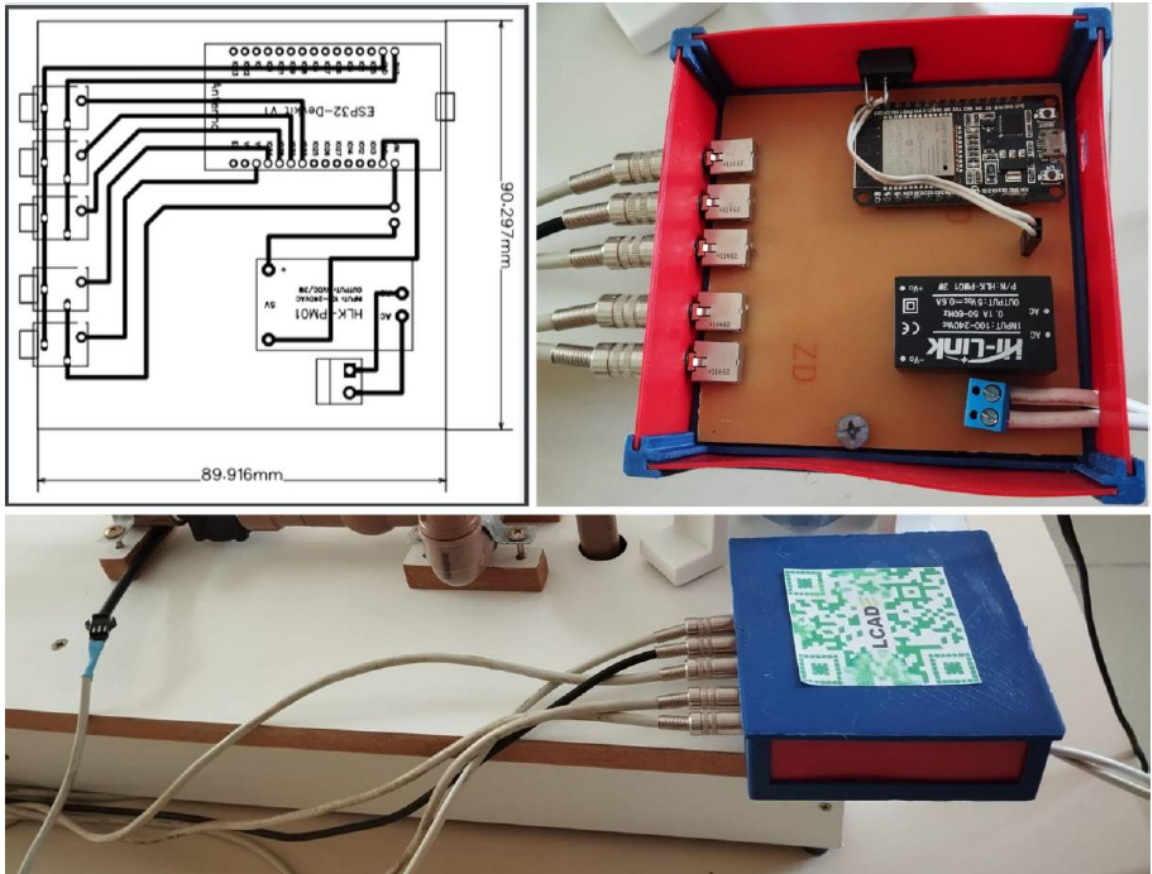


Figura 4

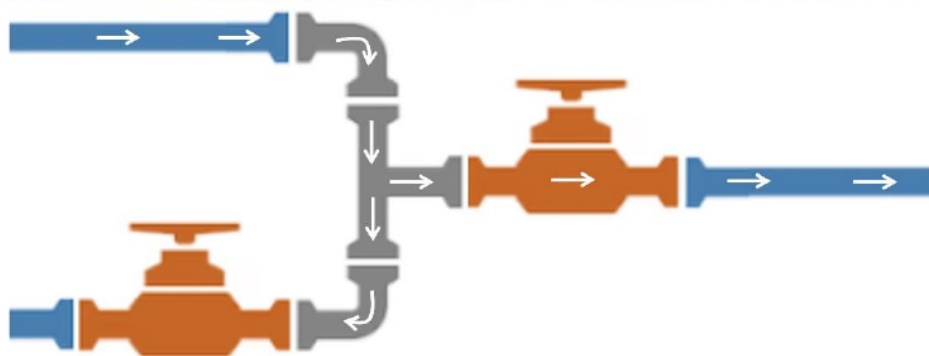
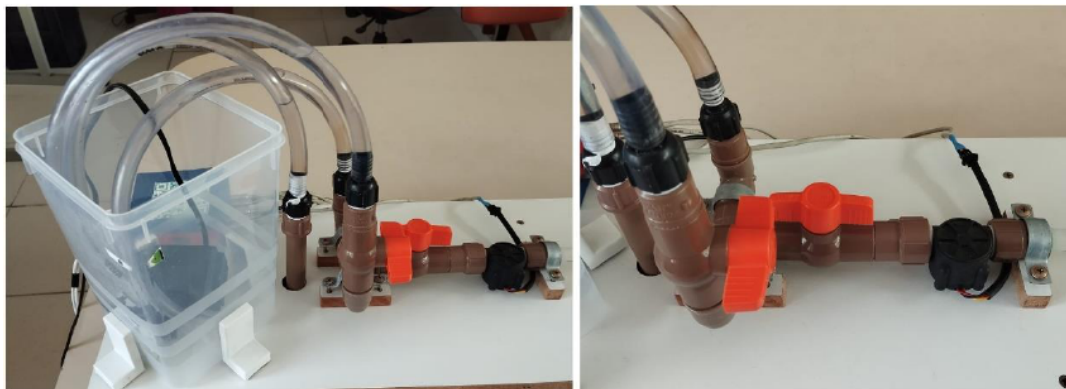


Figura 5

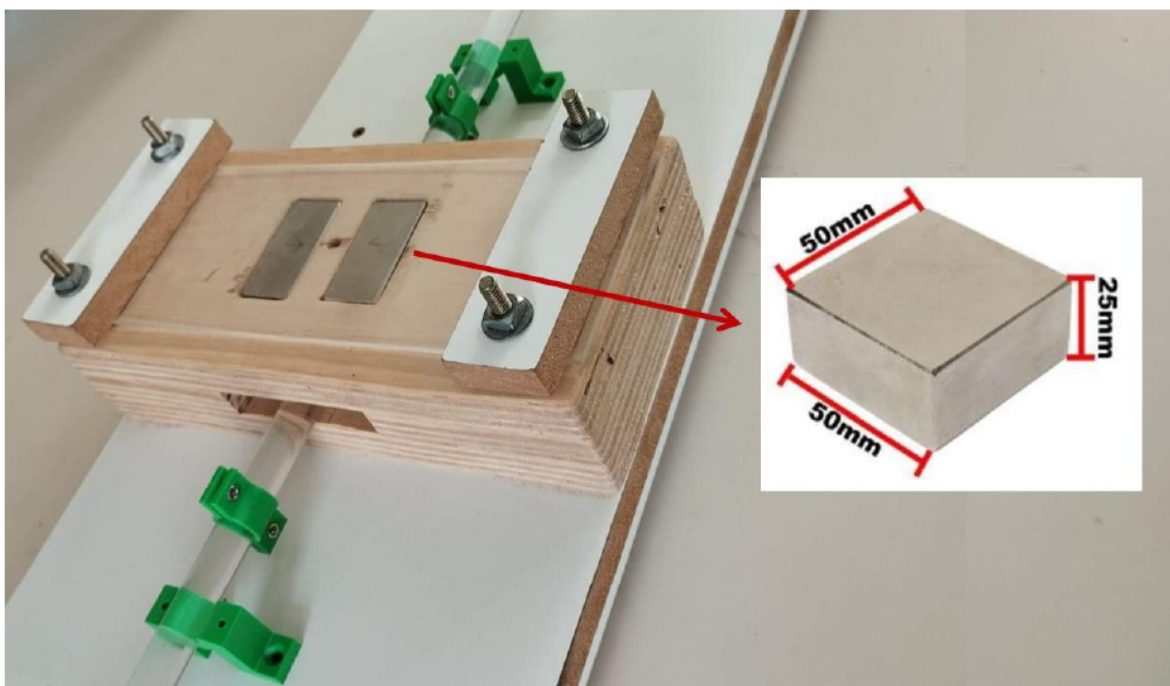


Figura 6



Figura 7

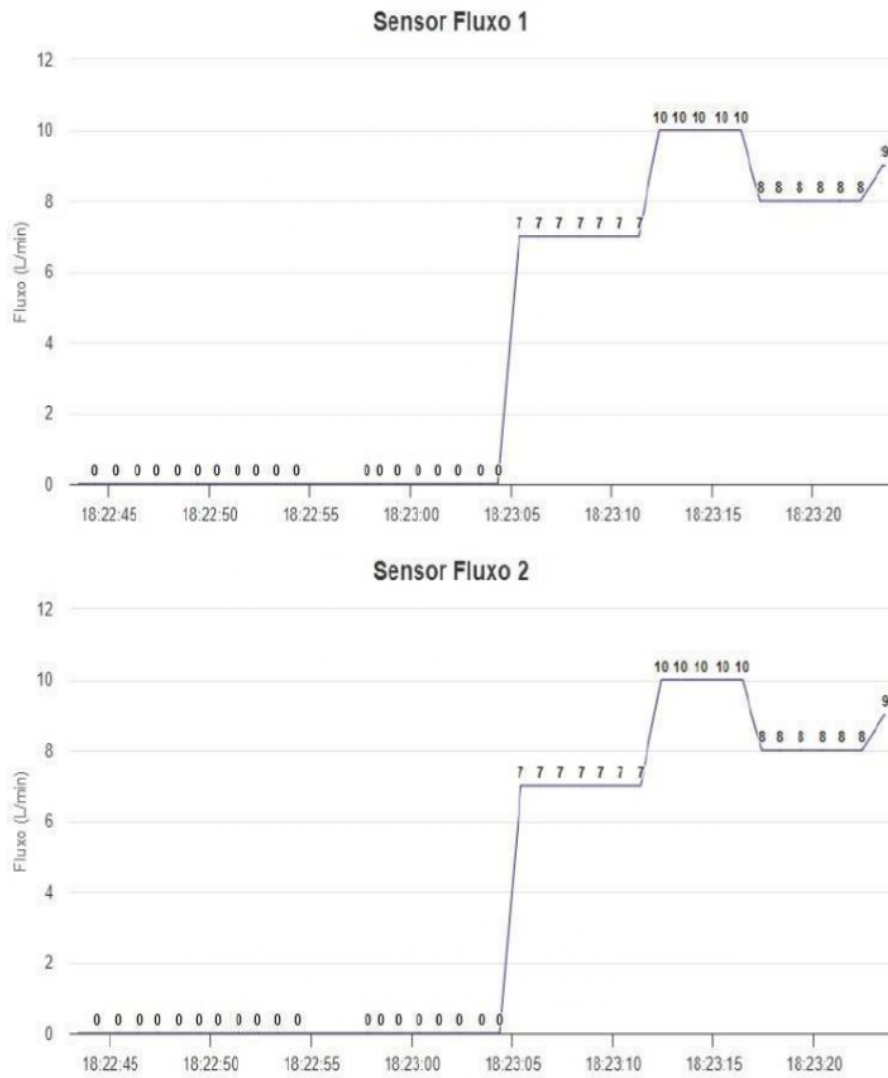


Figura 8

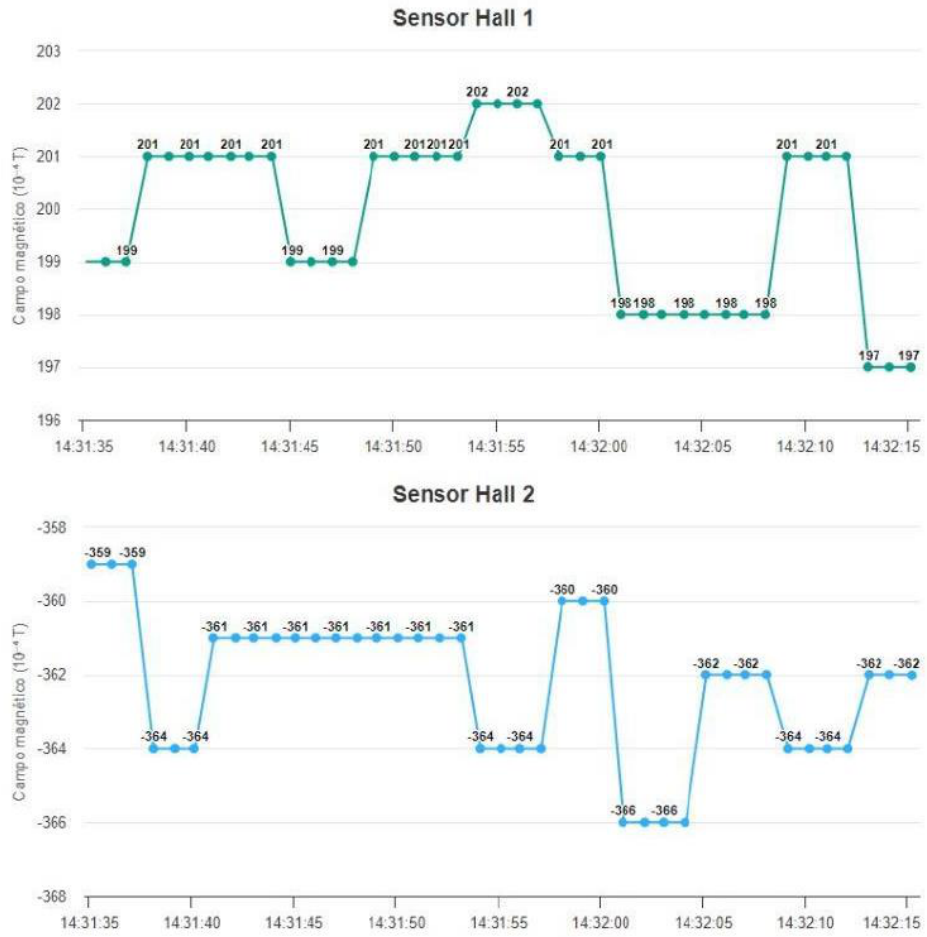


Figura 9

RESUMO

BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE MAGNETOHIDRODINÂMICA

O fenômeno de Magnetohidrodinâmica (MHD), consiste em um fenômeno em que o escoamento de um fluido condutor interage com um campo magnético externo ao fluido, proporcionando desta forma um acoplamento entre fenômenos eletromagnéticos e fluídos, combinando desta forma as equações de Maxwell, com a equação de Navier-Stokes, o que vem se mostrando de grande uso nos ramos da engenharia. Contudo, devido ao fato de seu comportamento se basear na equação de Navier-Stokes, este fenômeno não possui uma solução analítica, dificultando desta forma a sua análise e, conseqüentemente, compreensão. Desta forma, como uma tentativa de tornar mais simples a compreensão deste fenômeno, foi desenvolvida uma bancada experimental, utilizando equipamentos eletrônicos de monitoramento para assim medir os valores de velocidade do fluido e da densidade de fluxo magnético que irão atuar no escoamento de um fluido condutor. Para o desenvolvimento deste equipamento, foram feitas duas estruturas diferentes, sendo uma a estrutura hidráulica e a outra a estrutura eletrônica. Para o desenvolvimento da estrutura hidráulica, foi utilizado um cano de acrílico de 1pol de diâmetro e 1m de comprimento, onde o fluido irá passar, foram também utilizadas duas válvulas circulares para controlar a vazão, assim como uma bomba d'água, e dois ímãs de neodímio de 1,4T, para gerar o efeito eletromagnético. Já para a parte eletrônica, foram utilizados dois sensores de efeito hall para detecção da densidade de fluxo magnético, assim como dois sensores de vazão para medir a velocidade de escoamento do fluido no cano. Estes sensores foram conectados a um microcontrolador ESP-32, que por sua vez utiliza da antena Wi-Fi embutida a placa, para transmitir os dados dos sensores por meio de um código em html, que irá apresentá-los em forma gráfica para o usuário, tornando assim o processo de identificação de MHD mais didático e de simples compreensão.