



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**GEANDESON TEIXEIRA DOS SANTOS**

**DESSALINIZAÇÃO POR CAMPO MAGNÉTICO: UMA NOVA  
PERSPECTIVA NO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS SALGADAS**

**CAMPINA GRANDE  
2025**

**GEANDESON TEIXEIRA DOS SANTOS**

**DESSALINIZAÇÃO POR CAMPO MAGNÉTICO: UMA NOVA  
PERSPECTIVA NO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS SALGADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) apresentado à Coordenação do Departamento do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

**Área de concentração: Física**

**Orientador: Prof. Dr. Everton Cavalcante.**

**CAMPINA GRANDE**

**2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S237d Santos, Geandeson Teixeira dos.

Dessalinização por campo magnético [manuscrito] : uma nova perspectiva no aproveitamento de águas salgadas / Geandeson Teixeira dos Santos. - 2025.  
52 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. Everton Cavalcante, Departamento de Física - CCT".

1. Dessalinização. 2. Magnetohidrodinâmica. 3. Sustentabilidade. I. Título

21. ed. CDD 530

GEANDESON TEIXEIRA DOS SANTOS

DESSALINIZAÇÃO POR CAMPO MAGNÉTICO: UMA NOVA PERSPECTIVA NO  
APROVEITAMENTO DE ÁGUAS SALGADAS.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Física da Universidade Estadual da  
Paraíba, como requisito parcial à  
obtenção do título de Licenciado em  
Física

Aprovada em: 10/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Everton Cavalcante** (\*\*\*.699.765-\*\*), em **20/06/2025 10:01:45** com chave **b81e8bdc4dd611f0b5481a1c3150b54b**.
- **Jean Paulo Spinelly da Silva** (\*\*\*.685.684-\*\*), em **20/06/2025 10:45:51** com chave **e17ce7f24ddc11f09e6706adb0a3afce**.
- **Ruth Brito de Figueiredo Melo** (\*\*\*.934.704-\*\*), em **25/06/2025 11:26:06** com chave **54bc8f8251d011f0894906adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Folha de Aprovação do Projeto Final

**Data da Emissão:** 25/06/2025

**Código de Autenticação:** a81ddb



Dedico este trabalho ao meu irmão, Jefferson Teixeira, por ser uma inspiração constante e por sonhar junto comigo na idealização deste projeto. Sua presença em cada etapa da minha jornada acadêmica foi indispensável, assim como seu apoio nos momentos mais desafiadores e nos mais gratificantes. Deixo registrada aqui minha imensurável gratidão.

## Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização desta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Este trabalho não teria sido possível sem o apoio, a orientação e o incentivo de pessoas fundamentais em minha jornada acadêmica.

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, saúde e sabedoria para enfrentar os desafios ao longo deste percurso. A ele dedico toda a minha gratidão e reconhecimento.

Aos meus pais, pela base e pelo apoio incondicional em todos os momentos, especialmente nas horas de maior dificuldade. Seu amor e dedicação sempre foram o alicerce que me sustentou.

À minha família e amigos, pelo carinho, compreensão e incentivo constante, que me motivaram a persistir e acreditar em meu potencial.

Ao meu irmão, Jefferson Teixeira, pela parceria, incentivo e contribuição valiosa ao longo do desenvolvimento deste projeto. Sua presença foi fundamental em momentos decisivos e sempre trouxe confiança e clareza à minha caminhada acadêmica.

Ao meu orientador, Everton Cavalcante, pela paciência, dedicação e conhecimento compartilhado. Suas orientações foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso, que contribuíram para minha formação acadêmica, compartilhando seus conhecimentos e experiências de maneira inspiradora.

Aos colegas de curso, pela troca de ideias, apoio e amizade construída ao longo desta trajetória. Vocês tornaram este caminho mais leve e enriquecedor.

A todos os profissionais e instituições que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

Por fim, agradeço àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a minha jornada, seja com palavras de apoio, gestos de incentivo ou mesmo com sua presença. A todos, deixo registrado meu mais profundo agradecimento.

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir.”

**Albert Einstein**

## RESUMO

A escassez de água potável em regiões semiáridas, como o Nordeste do Brasil, impulsiona a busca por novas tecnologias de dessalinização. Este trabalho investiga a viabilidade técnica de um sistema de dessalinização baseado na separação de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  utilizando campos magnéticos. O princípio físico que fundamenta o estudo é a força de Lorentz, que atua sobre partículas carregadas em movimento imersas em um campo magnético. Um protótipo experimental foi projetado com o objetivo de verificar, em condições controladas, se os íons presentes em solução salina podem ser desviados ou manipulados de forma significativa. São discutidas as vantagens, limitações, resultados preliminares e potenciais aplicações da tecnologia proposta. O trabalho compara este método com técnicas consagradas como a osmose reversa, eletrodialise e destilação. Apesar das limitações experimentais atuais, a proposta apresenta potencial para tornar-se uma opção alternativa e complementar na purificação de água salobra em ambientes com recursos escassos.

**Palavras-Chave:** dessalinização; magnetohidrodinâmica; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The scarcity of potable water in semi-arid regions, such as Northeastern Brazil, drives the search for new desalination technologies. This work investigates the technical feasibility of a desalination system based on the separation of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  ions using magnetic fields. The physical principle underlying the study is the Lorentz force, which acts on charged particles in motion within a magnetic field. An experimental prototype was designed to verify, under controlled conditions, whether ions in a saline solution can be significantly deflected or manipulated. The advantages, limitations, preliminary results, and potential applications of the proposed technology are discussed. The study compares this method with established techniques such as reverse osmosis, electrodialysis, and distillation. Despite current experimental limitations, the proposal shows potential as an alternative and complementary option for purifying brackish water in resource-limited environments.

**Keywords:** desalination; magnetohydrodynamics; sustainability.

## Lista de ilustrações

Figura 01 - Esquemática da força de Lorentz sobre uma partícula .....	20
Figura 02 - Gradientes de concentração .....	23
Figura 03 - Gradientes de concentração com tensão Hall .....	25
Figura 04 - Bobinas .....	28
Figura 05 - Base giratória motorizada .....	29
Figura 06 - Montagem com o eletroímã instalado .....	29
Figura 07 - Construção do Sistema de Rotação Central .....	31
Figura 08 - Motor Brushless .....	31
Figura 09 - Bateria para Alimentação do Motor .....	32
Figura 10 - Rádio Controle Flysky FSi6 .....	32
Figura 11 - Bobinas Eletromagnéticas .....	33
Figura 12 - Estrutura Principal .....	33
Figura 13 - Amperímetro .....	34
Figura 14 - Pontas de prova .....	34
Figura 15 - Ligação das Pontas de Prova ao Multímetro Digital .....	35
Figura 16 - Sistema Completo .....	35
Figura 17 - Adição de sal na água .....	36
Figura 18 - Primeira medição .....	36
Figura 19 - Primeiro valor estabilizado com o Sistema estático .....	37
Figura 20 - Segunda Leitura com o Sistema Ligado .....	37
Figura 21 - Primeira medição na escala de voltímetro .....	38
Figura 22 - Segunda medição na escala de voltímetro .....	38
Figura 23 - Pontas de prova paralelas (sistema desligado) .....	40
Figura 24 - Pontas de prova paralelas (sistema ligado) .....	40
Figura 25 - Pontas de prova reposicionadas (sistema desligado) .....	41
Figura 26 - Pontas de prova reposicionadas (sistema ligado) .....	41
Figura 27 - Sistema de extração lateral de fluidos .....	43
Figura 28 - Planta de dessalinização por campo magnético .....	44
Figura 29 - Modelo ideal .....	45
Figura 30 - Sistema principal .....	47

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Efeitos atuantes no sistema .....	27
--	----

## Lista de abreviaturas e siglas

<b>A</b>	Amper
<b>DMM</b>	Multímetro Digital
<b>ISEs</b>	Sensores Seletivos de Íons
<b>kΩ</b>	Quilo-ohm
<b>MHD</b>	Magnetohidrodinâmica
<b>MOTs</b>	Microwave Oven Transformers
<b>mAh</b>	Miliampere-hora
<b>mV</b>	Milivolts
<b>RPM</b>	Rotação por minuto
<b>UNESCO</b>	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
<b>V</b>	Volts

## Lista de fórmulas

$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$	Força de Lorentz
$\vec{E} = -(\vec{v} \times \vec{B})$	Campo elétrico induzido devido ao movimento de uma carga
$\mathcal{E} = vBL$	Tensão de Faraday
$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B})$	Força magnética sobre uma carga elétrica
$\vec{F}_e = q\vec{E}$	Força elétrica sobre íons

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica</b>	<b>15</b>
2.1	Dissociação iônica e propriedades das soluções salinas . . . . .	16
2.2	Magnetohidrodinâmica (MHD): Uma perspectiva teórica para soluções iônicas . . . . .	16
2.3	Eletromagnetismo aplicado: A Força de Lorentz na manipulação de íons em solução salina . . . . .	18
2.4	Efeitos de um campo magnético em solução salina rotativa . . . . .	20
2.5	A geração da Tensão de Faraday em eletrólitos sob campo magnético . . .	21
2.6	Gradientes de concentração induzidos por campos magnéticos . . . . .	22
2.7	Fundamentos e implicações do Efeito Hall na separação iônica . . . . .	24
2.8	Limitações e desafios da aplicação de campos magnéticos em sistemas de separação iônica . . . . .	25
2.9	Todos fenômenos envolvidos no sistema . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>28</b>
3.1	Geração do campo magnético . . . . .	28
3.2	Base Giratória Acoplada . . . . .	29
3.3	Obtenção dos dados . . . . .	30
3.4	Processo de montagem e teste experimental . . . . .	31
3.5	Resultados e insights durante análises . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Novas abordagens e aprimoramentos do sistema</b>	<b>42</b>
4.1	O Cilindro rotativo . . . . .	42
4.2	Planta completa . . . . .	44
4.3	Modelo final idealizado . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>49</b>
	<b>Referências</b>	<b>51</b>

# 1 Introdução

A crise hídrica global é um dos principais desafios enfrentados pela humanidade neste século. O crescimento populacional, a urbanização desordenada e as mudanças climáticas têm agravado o problema da escassez de água potável. Segundo a UNESCO (2021), aproximadamente 40% da população mundial já enfrenta escassez de água, podendo esse número alcançar 60% até 2050.

No Brasil, embora exista abundância hídrica em muitas regiões, o semiárido nordestino apresenta características geográficas e climáticas que dificultam o acesso à água doce. Em muitos locais, a água disponível possui alta salinidade, tornando-a imprópria para o consumo humano e para a agricultura.

A dessalinização surge como uma solução promissora para esse problema. Métodos tradicionais como a osmose reversa, a destilação térmica e a eletrodialise têm sido amplamente utilizados, mas enfrentam limitações relacionadas ao custo energético, manutenção e impacto ambiental. Esse trabalho aborda a interação dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  com campos magnéticos e o uso dos efeitos para possível dessalinização da água por efeito Hall. Essa proposta visa explorar o efeito da força de Lorentz sobre partículas carregadas em movimento, com o intuito de induzir sua separação física e, assim, reduzir a salinidade da água.

Além de seu potencial inovador, a proposta também apresenta valor acadêmico ao aproximar os conceitos de eletromagnetismo da prática experimental, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e acessíveis.

Entendendo que o sal em contato com a água se comporta de maneira diferente do que em sua estrutura natural, podemos usar isso a nosso favor. Pelo processo de ionização na dissolução do sal, as ligações iônicas entre os íons sódio ( $\text{Na}^+$ ) e cloro ( $\text{Cl}^-$ ) são quebradas, liberando íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  na água. Esses íons ficam rodeados por moléculas de água, formando uma solução aquosa. Desse modo, há uma possibilidade de haver uma interação entre os íons e um campo magnético.

Uma vez ocorrendo essas interações, é possível que haja uma alternativa para manipular o campo magnético, orientando-o para que forme um fluxo uniforme. Para que haja diretamente uma interação entre o campo magnético e os íons, devemos considerar que a força resultante dependerá também da velocidade relativa entre o eletroímã e as moléculas de sódio e cloro. Isso implica pensar em aplicações onde seja possível realizar essa força de interação. Pensando inicialmente em um modelo que possamos chegar a algum resultado, mesmo que mínimo, tornaria esperançoso pensar que um dia isso possa vir a se tornar viável sua utilização em aplicações do cotidiano. Foi desenvolvido um modelo no qual pudéssemos colocar eletroímãs em proximidade a um aparato cilíndrico (recipiente com água) capaz de conter a substância em repouso assim

como em rotação, para que pudéssemos analisar em tempo real alguma variação em sua capacidade de condutividade elétrica uma vez que essa capacidade está diretamente ligada à sua densidade salina dos íons de sódio e cloro. Em seu perfil de estrutura, foi pensado alguns modelos hipotéticos até que chegássemos a algo praticável dentro das limitações orçamentárias e disponibilidade tecnológica.

## 2 Fundamentação teórica

A dessalinização é uma necessidade crítica para enfrentar a crescente demanda por água potável em regiões com escassez de recursos hídricos. Métodos tradicionais, como osmose reversa e destilação térmica, são amplamente utilizados, mas possuem limitações significativas, como alto consumo energético, complexidade operacional e elevado custo de implantação e manutenção. Diante dessas dificuldades, abordagens inovadoras têm sido exploradas, incluindo métodos baseados em princípios físicos menos convencionais, como a aplicação de campos magnéticos.

No centro deste estudo está a interação entre íons dissolvidos em solventes como a água e campos magnéticos. Estudos sobre efeitos e comportamentos de campos magnéticos em solventes não são novidades no ramo da física, no entanto, a complexidade em entender determinadas características no eletromagnetismo torna muito amplas as possibilidades do que ainda pode ser descoberto sobre esse fenômeno. Alguns estudos, como o de Sarimov (2021), demonstraram que o aumento da intensidade do campo magnético provoca alterações no potencial redox — isto é, a medida da tendência que uma substância tem de ganhar ou perder elétrons em uma reação de oxirredução — de soluções aquosas de NaCl, sendo essa variação mais significativa quanto maior a concentração iônica da solução. Isso nos mostra que, de fato, o campo consegue interagir em moléculas como as do cloro e sódio, mesmo que indiretamente.

Baseando-se na análise de alguns trabalhos que envolvem o conceito, entendemos que, de fato, a atuação da força de Lorentz em uma solução eletrolítica submetida a um campo magnético resulta em forças distintas sobre os íons de cargas opostas, levando ao acúmulo desses íons em diferentes regiões do sistema (De Luca, 2009).

Então, quando uma solução de NaCl é submetida a um movimento rotacional dentro de um campo magnético uniforme, os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  experimentam forças opostas devido à força de Lorentz. Este fenômeno pode levar à redistribuição iônica ao longo do eixo do cilindro, criando gradientes de concentração iônica — ou seja, regiões com diferentes densidades de íons — que podem ser exploradas para fins de dessalinização.

O campo da magnetohidrodinâmica (MHD), que investiga o comportamento de fluidos condutores em campos magnéticos, oferece a base teórica para este trabalho. Embora os gradientes de concentração induzidos sejam tipicamente pequenos em condições normais, a configuração experimental proposta busca maximizar esses efeitos, utilizando a rotação do fluido como um mecanismo de amplificação. Ao combinar esses fenômenos com técnicas de remoção seletiva de fluido, espera-se avaliar a viabilidade de um sistema de dessalinização funcional.

## 2.1 Dissociação iônica e propriedades das soluções salinas

Ao ser dissolvido em água, o sal de cozinha (NaCl) sofre um processo de dissociação eletrolítica, conforme a equação:



Essa reação torna a água uma solução condutiva devido à presença de íons livres. A condutividade elétrica da solução depende diretamente da concentração e mobilidade dos íons. A mobilidade iônica em água é influenciada por fatores como temperatura, viscosidade do meio e interação entre os íons. Em 25°C, as mobilidades molares dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  em solução aquosa são de aproximadamente  $5.19 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  e  $7.91 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , respectivamente. Além disso, a estrutura do solvente (água) e suas interações eletrostáticas com os íons causam a formação de camadas de solvatação, que são conjuntos de moléculas de água organizadas ao redor dos íons. Essas camadas atuam como uma “capa” que aumenta o volume efetivo da partícula e, conseqüentemente, reduzem sua mobilidade efetiva. O movimento térmico aleatório dos íons (difusão browniana) também interfere na trajetória dos mesmos, exigindo forças externas significativas para causar separação efetiva.

Algo ligeiramente preocupante nessas considerações é que as próprias camadas de solvatação podem interferir diretamente na tentativa de medição da variação iônica. Uma vez que as moléculas de água naturalmente formam ligações iônicas com as moléculas de sódio e cloro, o processo da força eletromagnética em efetuar essa separação em regiões de saturação pode demonstrar um caráter de permanência de curta duração. Desse modo, foi pensado um sistema de aferição que pudesse ocorrer simultaneamente com o processo de ‘separação eletromagnética’. Para isso, foi de extrema importância entender quais as regiões da solução aquosa seriam ideais para o aferimento.

## 2.2 Magnetohidrodinâmica (MHD): Uma perspectiva teórica para soluções iônicas

A Magnetohidrodinâmica (MHD) oferece o arcabouço teórico para compreender como um fluido eletricamente condutor, como a água salgada, responde à presença de campos magnéticos. Essencialmente, a MHD descreve a interação complexa entre o movimento do fluido e os campos eletromagnéticos, onde cada um influencia o outro de maneira intrínseca.

No contexto de uma solução iônica como a água salgada, a condutividade elétrica

é proporcionada pelos íons dissolvidos (sódio e cloreto). Quando essa solução se move através de um campo magnético, esses íons carregados experimentam a força de Lorentz. A relevância da MHD para esta pesquisa reside no fato de que essa força não apenas afeta o movimento dos íons individualmente, mas, em escala macroscópica, influencia o próprio fluxo do fluido como um todo.

Consideremos a água salgada escoando dentro de um campo magnético. Os íons positivos (sódio) sentirão uma força em uma direção, enquanto os íons negativos (cloreto) sentirão uma força na direção oposta (devido às suas cargas de sinais contrários). Essa separação de forças atuando nas diferentes espécies iônicas é um ponto crucial para a proposta de descobrir as interações que investigamos. Controlar e intensificar essa separação através do design do campo magnético e do fluxo da solução pode, teoricamente, criar regiões com diferentes concentrações de cloro e sódio.

Ademais, o escoamento da água salgada em presença de um campo magnético externo induz a formação de correntes elétricas no interior do fluido condutor. Essas correntes, por sua vez, geram campos magnéticos secundários que interagem com o campo inicialmente aplicado. Essa dinâmica de realimentação mútua — em que o movimento do fluido influencia os campos eletromagnéticos, e estes, por sua vez, afetam o movimento — caracteriza a natureza autoconsistente dos sistemas magnetohidrodinâmicos (MHD). Tal propriedade confere à MHD um elevado potencial para aplicações em diversas áreas, incluindo a proposta investigada neste trabalho.

Nesta pesquisa sobre interações iônicas em campos eletromagnéticos, a aplicação de um campo magnético (seja ele estático ou variável, e considerando também a possibilidade de rotação) é pensada para manipular o transporte dos íons de sal. A força de Lorentz poderia ser utilizada para “empurrar” os íons em direções específicas, potencialmente separando-os da água.

A MHD também ressalta a importância de parâmetros como a condutividade da solução e a intensidade do campo magnético. Uma maior condutividade (mais íons presentes) e um campo magnético mais forte resultariam em forças de Lorentz mais intensas. Similarmente, a velocidade do fluxo da solução é um fator determinante na magnitude dessa força.

Em suma, a MHD fornece a base teórica para entender como campos magnéticos podem interagir com soluções eletrolíticas através da força de Lorentz, induzindo correntes e alterando o movimento do fluido e a distribuição dos íons. Para o objetivo de dessalinização, o ponto central é como configurar o campo magnético e o fluxo da água salgada de maneira a otimizar a separação dos íons de sal da água, explorando os princípios da MHD.

### 2.3 Eletromagnetismo aplicado: A Força de Lorentz na manipulação de íons em solução salina

A força de Lorentz constitui um princípio fundamental do eletromagnetismo e é central para a compreensão da interação entre campos magnéticos e partículas carregadas em movimento. Em nosso estudo, essa força desempenha um papel primordial na análise teórica da manipulação de íons presentes em soluções aquosas sob a influência de um campo magnético.

Matematicamente, a força de Lorentz  $\vec{\mathbf{F}}_L$  que atua sobre uma partícula com carga  $q$  movendo-se com velocidade  $\vec{\mathbf{v}}$  em um campo magnético  $\vec{\mathbf{B}}$  é dada por:

$$\vec{\mathbf{F}}_L = q (\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}) \quad (2)$$

onde:

- $\vec{\mathbf{F}}_L$  é a força de Lorentz (em Newtons);
- $q$  é a carga do íon (em Coulombs);
- $\vec{\mathbf{v}}$  é a velocidade do íon (em metros por segundo);
- $\vec{\mathbf{B}}$  é a intensidade do campo magnético (em Teslas).

Esta equação vetorial revela que a força de Lorentz possui as seguintes características cruciais:

1. **Direção:** A direção da força  $\vec{\mathbf{F}}_L$  é determinada pelo produto vetorial  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , sendo sempre perpendicular ao plano formado por  $\vec{\mathbf{v}}$  e  $\vec{\mathbf{B}}$ . Essa direção pode ser visualizada através da regra da mão direita, apontando os dedos da mão direita na direção da velocidade  $\vec{\mathbf{v}}$ , e então curvando-os na direção do campo magnético  $\vec{\mathbf{B}}$ . O polegar estendido indicará a direção da força  $\vec{\mathbf{F}}_L$  para uma carga positiva. Para uma carga negativa, a direção da força será oposta á indicada pelo polegar.
2. **Magnitude:** A magnitude da força é dada por  $F_L = |q||\vec{\mathbf{v}}||\vec{\mathbf{B}}| \sin(\theta)$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre os vetores velocidade e campo magnético. A força é máxima quando a velocidade é perpendicular ao campo ( $\theta = 90^\circ$ ) e zero quando a velocidade é paralela ou antiparalela ao campo ( $\theta = 0^\circ$  ou  $180^\circ$ ).

No contexto de uma solução iônica, como a água salgada contendo íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , a aplicação de um campo magnético induzirá uma força de Lorentz sobre esses íons sempre

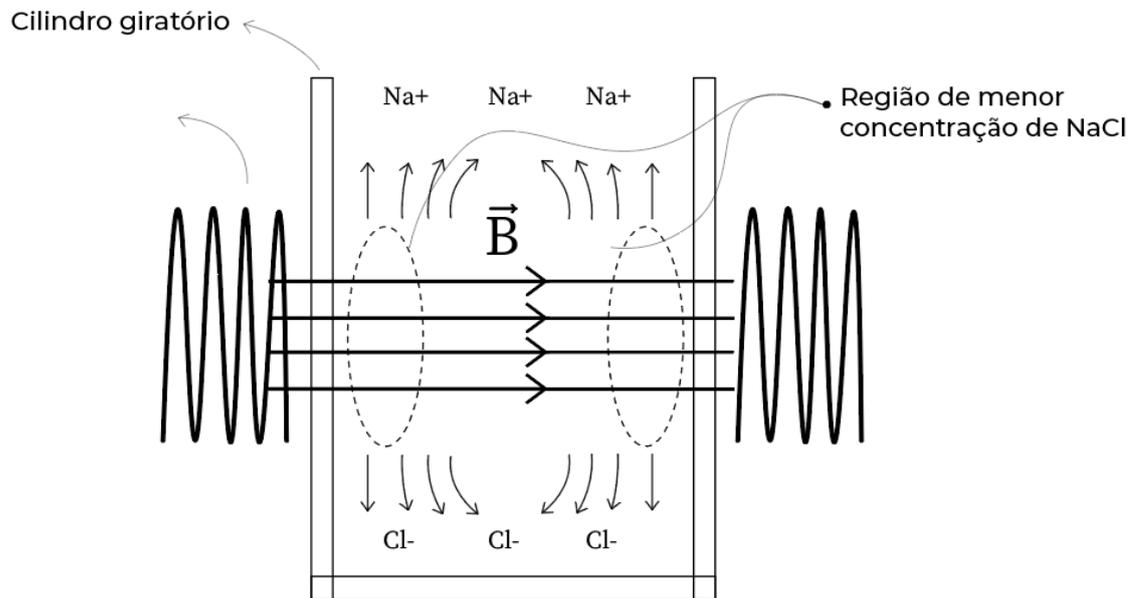
que eles possuem uma componente de velocidade perpendicular ao campo. É crucial notar que, devido à regra da mão direita e aos sinais opostos de suas cargas, os íons positivos (sódio) e negativos (cloreto) experimentarão forças em direções opostas para a mesma direção de velocidade e campo magnético.

Essa característica da força de Lorentz é fundamental para a possibilidade de manipulação iônica. Se a solução estiver em movimento (seja por um fluxo imposto ou induzido), o campo magnético exercerá forças seletivas sobre os diferentes íons, potencialmente levando a trajetórias distintas e, conseqüentemente, a uma redistribuição espacial das espécies iônicas dentro do sistema.

Em sistemas onde há um fluxo da solução através de um campo magnético, a força de Lorentz atua continuamente sobre os íons em movimento. Essa força pode gerar uma força volumétrica no fluido (como discutido no contexto da MHD), influenciando o próprio escoamento e também a distribuição das concentrações iônicas.

Para o objetivo de compreender a interação iônica, a manipulação das trajetórias iônicas através da força de Lorentz oferece um caminho potencial para separar e analisar o comportamento dos íons em solução. A configuração do campo magnético (sua intensidade, direção e geometria espacial) e o regime de fluxo da solução são parâmetros críticos para otimizar essa interação iônica controlada.

Figura 1: Esquemática da força de Lorentz sobre uma partícula



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como observado na figura 1, espera-se que a interação direta do campo com o fluxo iônico central forneça interação entre as moléculas de cloro e sódio, formando separação axial das duas moléculas por meio da intensidade da força de Lorentz.

## 2.4 Efeitos de um campo magnético em solução salina rotativa

A água salgada em rotação dentro de um campo magnético uniforme pode experimentar forças de Lorentz atuando sobre suas partículas carregadas. No entanto, como não há um circuito elétrico externo, não se estabelece uma corrente contínua.

Isso tende a provocar a separação radial das cargas, induzindo uma tensão eletromotriz — conhecida como tensão de Faraday — entre a parede central e a periferia do tubo.

Contudo, na ausência de eletrodos conectados ao sistema, não há caminho condutor para que a corrente elétrica flua. Como resultado, forma-se rapidamente um campo elétrico interno que neutraliza a separação de cargas, impedindo o estabelecimento de uma corrente sustentada.

Do ponto de vista prático, estudos clássicos indicam que, em um canal contendo eletrólito em escoamento sob um campo magnético transversal, surge uma tensão de Faraday entre os eletrodos. Quando existe um circuito externo, podem ocorrer reações eletroquímicas — como a liberação de hidrogênio ( $H_2$ ) no cátodo e cloro ( $Cl_2$ ) no ânodo.

Por outro lado, sem a presença de eletrodos, observa-se apenas o acúmulo momentâneo de cargas, caracterizando o chamado efeito Hall líquido, que rapidamente entra em equilíbrio.

## 2.5 A geração da Tensão de Faraday em eletrólitos sob campo magnético

A interação entre um eletrólito em movimento e um campo magnético transversal resulta no surgimento de uma tensão de Faraday. Esse fenômeno é uma manifestação direta da lei da indução de Faraday, aplicada a condutores em movimento.

Quando íons presentes em uma solução eletrolítica (como  $Na^+$  e  $Cl^-$  na água salgada) se movem com uma velocidade  $\vec{v}$  através de um campo magnético  $\vec{B}$ , eles experimentam uma força de Lorentz.

Consideremos um canal onde a solução eletrolítica escoia com uma velocidade  $\vec{v}$  e um campo magnético  $\vec{B}$  é aplicado transversalmente ao fluxo. Os íons positivos serão desviados em uma direção perpendicular tanto à velocidade quanto ao campo, enquanto os íons negativos serão desviados na direção oposta.

Essa separação de cargas continua até que a força elétrica  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  sobre os íons equilibre a força magnética:

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Em estado de equilíbrio, para cada tipo de íon, temos:

$$\vec{E} = -(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

A magnitude dessa tensão de Faraday depende da velocidade do fluxo, da intensidade do campo magnético e da geometria do sistema. Matematicamente, para um condutor de

comprimento  $L$  movendo-se com velocidade  $v$ , perpendicular a um campo magnético  $B$ , a força eletromotriz (fem) induzida é dada por:

$$\mathcal{E} = vBL \quad (5)$$

De forma análoga, no caso do eletrólito em escoamento, a tensão de Faraday surge devido ao movimento dos íons através do campo magnético.

Quando um circuito externo é conectado aos eletrodos onde a tensão de Faraday é gerada, uma corrente elétrica pode fluir. Essa corrente, por sua vez, pode dar origem a reações eletroquímicas nos eletrodos, como as mencionadas: a eletrólise da água, resultando na liberação de hidrogênio no cátodo (polo negativo) e cloro no ânodo (polo positivo), no caso de uma solução de cloreto de sódio.

Portanto, a tensão de Faraday é uma consequência direta do movimento de cargas em um campo magnético, levando à possibilidade de geração de corrente elétrica e reações eletroquímicas quando um circuito externo é fornecido.

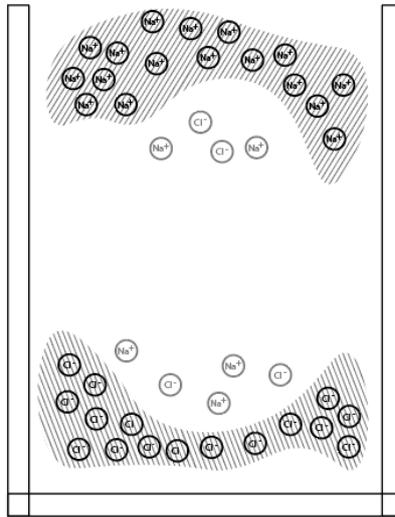
## 2.6 Gradientes de concentração induzidos por campos magnéticos

A aplicação de um campo magnético a uma solução eletrolítica em movimento pode induzir o surgimento de regiões com maior concentração de íons, chamaremos essas regiões de “gradientes” de concentração para facilitar a comunicação. Este fenômeno decorre diretamente da atuação da força de Lorentz sobre os íons, que, como discutido anteriormente, exerce forças com direções dependentes do sinal da carga e da orientação da velocidade e do campo magnético.

Em um sistema onde uma solução salina escoar através de um campo magnético, os íons positivos e negativos são submetidos a forças laterais em sentidos opostos. Essa ação seletiva de forças pode levar ao acúmulo de íons de um determinado sinal em certas regiões do espaço, enquanto os íons de sinal oposto tendem a se concentrar em outras. Com o tempo, essa redistribuição iônica pode resultar no estabelecimento de gradientes de concentração ao longo do volume da solução.

A magnitude e a distribuição desses gradientes de concentração são influenciadas por diversos fatores, incluindo a intensidade do campo magnético, a velocidade do fluxo da solução, a condutividade elétrica do eletrólito e a geometria do sistema. Em sistemas com escoamento, a interação contínua da força de Lorentz com os íons em movimento pode manter ou intensificar esses gradientes.

Figura 2: Gradientes de concentração



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como observado na figura 2, no contexto de uma solução em rotação sob um campo magnético, a trajetória circular dos íons combinada com a força de Lorentz radial pode levar a uma separação de cargas e, conseqüentemente, a um gradiente de concentração radial. Íons com diferentes mobilidades e sinais de carga responderão de maneira distinta à combinação do movimento rotacional e do campo magnético, intensificando a possibilidade de separação espacial.

A formação desses gradientes de concentração representa um aspecto fundamental a ser explorado. Se for possível controlar e otimizar a criação desses gradientes, poderíamos conceber sistemas onde regiões com menor concentração de sal sejam geradas seletivamente. A compreensão dos mecanismos que governam a formação e a manutenção desses gradientes é, portanto, essencial para avaliar a viabilidade de processos de separação baseados na interação de campos magnéticos com soluções iônicas.

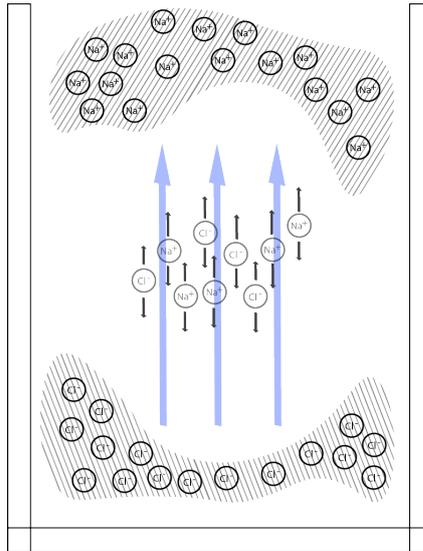
A análise teórica deve, portanto, considerar como diferentes configurações de campos magnéticos (uniformes, não uniformes, rotativos) e regimes de fluxo (laminar, turbulento, rotacional) afetam a magnitude e a distribuição dos gradientes de concentração das espécies iônicas na solução.

## 2.7 Fundamentos e implicações do Efeito Hall na separação iônica

O Efeito Hall, um fenômeno físico descoberto em 1879 por Edwin Herbert Hall, foi crucial para compreendermos o comportamento de correntes elétricas sob a influência de campos magnéticos. Hall observou que, ao aplicar um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente em uma lâmina metálica, surgia uma diferença de potencial entre os lados opostos da lâmina, gerando uma tensão transversal. Esse efeito ocorre devido à ação da Força de Lorentz sobre as cargas móveis presentes no material. Quando uma corrente elétrica flui através de um condutor e um campo magnético é aplicado perpendicularmente à direção da corrente, as partículas carregadas (como elétrons ou íons) são desviadas lateralmente. Esse desvio faz com que cargas positivas e negativas se acumulem em lados opostos do condutor, criando uma separação de cargas e, conseqüentemente, um campo elétrico interno que se manifesta como uma diferença de potencial transversal, que chamamos de tensão Hall.

No contexto do meu experimento, o Efeito Hall acontece de forma semelhante, mas dentro de uma solução líquida, que atua como um condutor iônico em vez de metálico. A corrente nesse caso é uma corrente iônica, formada pelo movimento dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  presentes na solução salina. Essa movimentação de íons pode ser causada por um campo elétrico que eu aplico externamente, pela movimentação forçada do próprio líquido ou por efeitos indiretos como a indução de campos elétricos internos. Ao aplicar um campo magnético transversal por meio dos eletroímãs posicionados frente a frente, os íons que se movem através da solução sofrem a ação da Força de Lorentz e são desviados axialmente. Íons positivos são empurrados para um sentido e íons negativos para o outro, criando um acúmulo de cargas em regiões opostas da célula, como ilustrado na figura 3.

Figura 3: Gradientes de concentração com tensão Hall



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa separação de cargas cria, dentro da solução, uma diferença de potencial transversal, ou seja, um pequeno campo elétrico interno que se opõe ao movimento contínuo dos íons e tende a estabilizar o sistema após certo tempo. Esse potencial gerado lateralmente, mesmo sem fios ou contato direto com eletrodos de medição, caracteriza o Efeito Hall iônico. No meu experimento, esse efeito atua simultaneamente com a Força de Lorentz, com fenômenos magneto-hidrodinâmicos (que movimentam o fluido) e com possíveis efeitos de indução pela Lei de Faraday. O Efeito Hall, nesse caso, não apenas confirma que existe um desvio real de íons por efeito magnético, como também pode ser explorado como uma forma de monitorar ou até auxiliar na separação lateral das espécies iônicas que desejo extrair da solução salina.

## 2.8 Limitações e desafios da aplicação de campos magnéticos em sistemas de separação iônica

Embora a aplicação de campos magnéticos para manipular e separar íons em solução apresente um potencial interessante para esta investigação, é crucial reconhecer as limitações e os desafios inerentes a esta abordagem. A viabilidade e a eficiência de sistemas de separação iônica baseados em campos magnéticos são influenciadas por diversos fatores que merecem uma análise aprofundada.

Um dos principais desafios reside na intensidade do campo magnético necessário. Para exercer uma força de Lorentz significativa sobre os íons, especialmente em soluções com

baixa condutividade elétrica, são necessários campos magnéticos fortes e uniformes. A geração de tais campos, em volumes consideráveis, pode ser tecnologicamente complexa e exigir um consumo energético elevado. Além disso, a intensidade do campo magnético pode ser limitada pelas propriedades dos materiais utilizados nos sistemas.

A energia consumida para gerar e manter os campos magnéticos representa outro aspecto crítico desta investigação. Em aplicações práticas, é fundamental avaliar cuidadosamente o balanço energético do processo, comparando a energia gasta na geração do campo com a energia recuperada na separação dos íons. A eficiência energética do sistema é um fator determinante para a sua viabilidade econômica.

A turbulência do fluxo da solução pode comprometer a eficácia da separação iônica que se pretende estudar. Em regimes turbulentos, o movimento caótico dos íons pode sobrepor-se à ação da força de Lorentz, dificultando o controle e a manipulação dos íons. O design do sistema deve, portanto, minimizar a turbulência e promover um fluxo laminar sempre que possível.

A polarização dos eletrodos, em sistemas que utilizam campos elétricos em conjunto com campos magnéticos, pode introduzir complicações na análise. A acumulação de carga nos eletrodos pode gerar campos elétricos adicionais, que interferem com o campo aplicado e afetam suas medições. O controle da polarização dos eletrodos é essencial para garantir a estabilidade e a eficiência do processo investigado.

A eficiência do processo de separação iônica é um parâmetro crucial desta pesquisa. É importante avaliar a pureza dos íons separados, a quantidade de íons recuperados e a velocidade do processo. A otimização desses parâmetros requer um controle preciso dos campos magnéticos e elétricos, bem como um design adequado do sistema.

Além dos desafios mencionados, outros fatores podem influenciar a aplicação de campos magnéticos em sistemas de separação iônica, incluindo a corrosão dos materiais em contato com a solução, a geometria do sistema e a concentração da solução.

## 2.9 Todos fenômenos envolvidos no sistema

Tabela 1: Efeitos atuantes no sistema

<b>Fenômeno</b>	<b>Atua sobre</b>	<b>Condição necessária</b>	<b>Resultado direto</b>
<b>Força de Lorentz</b>	Íons em movimento	Campo magnético + movimento dos íons	Desvia os íons (axialmente)
<b>Efeito Hall</b>	Conjunto de íons	Corrente iônica + campo magnético transversal	Gera acúmulo de íons + diferença de potencial
<b>MHD</b>	Solução como fluido	Corrente + campo magnético + campo elétrico	Cria correntes dinâmicas no fluido
<b>Lei de Faraday</b>	Meio condutor (solução)	Campo magnético variável (ou movimento relativo)	Induz uma corrente elétrica

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

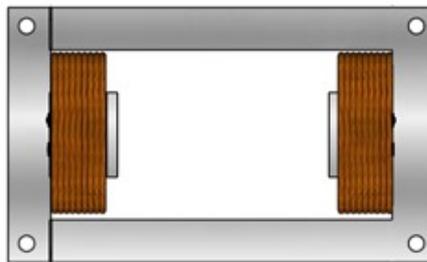
### 3 Metodologia

Criar um campo magnético uniforme suficientemente intenso capaz de interagir com os íons na solução é só um dos diversos desafios que tivemos que enfrentar. A intenção sempre foi a de obter algum sucesso minimamente mensurável para entender a viabilidade técnica e encorajar novos estudos de aprimoramento e um posterior uso da tecnologia conforme a viabilidade técnica se comprovar.

#### 3.1 Geração do campo magnético

Utilizamos duas bobinas montadas sobre um eixo horizontal voltadas para o centro separadas por aproximadamente 60 mm. Foram utilizados transformadores de fornos de micro-ondas, comumente chamados de MOTs (Microwave Oven Transformers), devidamente modificados para se comportarem como eletroímãs potentes. Inicialmente, os dois núcleos em forma de E sofreram acréscimos do mesmo material (ferrosilício) nas laterais, formando um retângulo, conforme a figura 4. Essa modificação melhorou perceptivelmente a intensidade do campo magnético entre as bobinas pelo efeito da concentração das linhas de campo.

Figura 4: Bobinas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

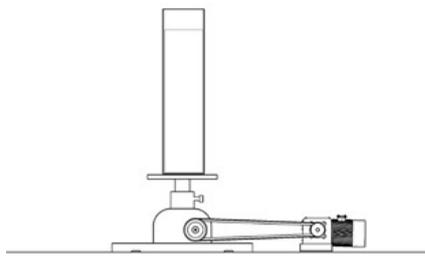
As bobinas foram ligadas de modo que o sentido da corrente em cada bobina gere linhas de campo que nascem em um dos eletroímãs e entram no outro, formando um campo magnético  $B$  praticamente uniforme no espaço que as separa.

Foi usada uma fonte de 12V com capacidade de corrente de 15 A. As bobinas foram ligadas em paralelo, consumindo uma corrente de 6,5 A aproximadamente. Cada bobina é composta por 240 espiras.

### 3.2 Base Giratória Acoplada

Foi construída uma base rotativa semelhante à representação da figura 5, onde um cilindro de 50 mm de diâmetro e 200 mm de altura foi colocado sobre a plataforma rotativa. O motor utilizado foi aproveitado de um aeromodelo, tipo que possui controle de rotação preciso. Ele se acopla à base giratória por um sistema simples de polias que reduz a rotação e aumenta o torque. A rotação foi mantida entre 300 e 500 RPM durante os testes.

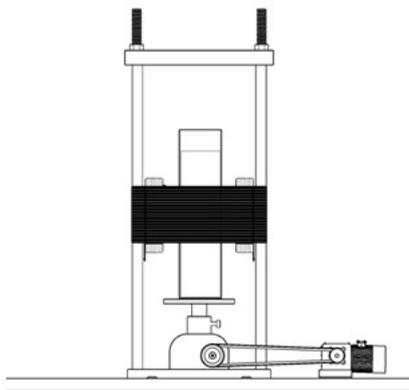
Figura 5: Base giratória motorizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os eletroímãs foram instalados em cilindro centralizado em relação ao eixo horizontal (figura 6).

Figura 6: Montagem com o eletroímã instalado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nessa configuração, o cilindro gira entre os eletroímãs em forma de E onde o campo magnético uniforme atravessa-o na região central, ponto onde o efeito Lorentz ocorrerá.

### 3.3 Obtenção dos dados

Nessa parte crucial do estudo foi escolhido o método da condutometria para verificar a separação de regiões com diferentes concentrações salinas. Esse método se mostrou o mais acessível dentre as diversas possibilidades de aferições como a refratometria, titulação, Sensores Seletivos de Íons (ISEs), etc. Contamos com um multímetro digital de boa precisão ligado a eletrodos de aço inox com 10 mm de comprimento espaçados por 2 mm. Durante todas as medições foram usados o mesmo par de eletrodos para mantermos um padrão nas tomadas de medidas.

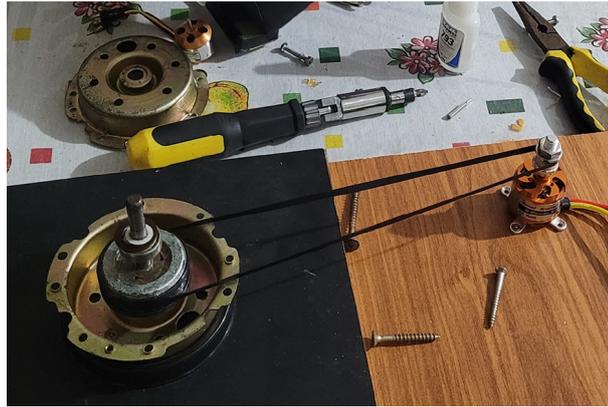
Os eletrodos foram inseridos bem no centro do volume da solução. Esse ponto, embora sofra muito pouco os efeitos da força de Lorentz que cresce à medida que se afasta do centro em direção às paredes do cilindro, foi escolhido por apresentar velocidade tangencial muito pequena do líquido, evitando assim o surgimento de outras correntes hidrodinâmicas no fluido e turbulências que prejudicariam os resultados.

Foram tomadas medidas de resistência elétrica da solução ainda em repouso. Após o início da rotação, monitoramos constantemente os valores da resistência elétrica à medida que a velocidade de rotação variava. Os dados foram devidamente anotados para análises posteriores.

### 3.4 Processo de montagem e teste experimental

Nesta figura 7, vemos a montagem do sistema de rotação central do protótipo, utilizando um motor elétrico brushless conectado por uma correia de borracha a um disco metálico, onde a solução salina será contida. A imagem ilustra os componentes sendo preparados para permitir a rotação controlada da amostra durante a aplicação do campo magnético.

Figura 7: Construção do sistema de rotação central



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O sistema de aceleração é conduzido por um motor especial sem escovas, que tinha suas velocidades variáveis controladas por um sistema denominado de ESC (Electronic Speed Controller) conectado a um rádio controlador que, por sua vez, podíamos ajustar com precisão cada uma das velocidades adotadas para o experimento (figura 8).

Figura 8: Motor brushless



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na figura 9 temos a bateria de polímero de lítio (LiPo) utilizada para alimentar o motor do sistema de rotação. A bateria possui especificações de 3S (11.1V) e 2250 mAh, fornecendo a energia necessária para o movimento controlado da solução salina durante os experimentos.

Figura 9: Bateria para alimentação do motor



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Rádio controle modelo Flysky FSi6, utilizado para controlar remotamente a velocidade de rotação do motor elétrico, permitindo ajustar o movimento da solução salina durante a experimentação (figura 10).

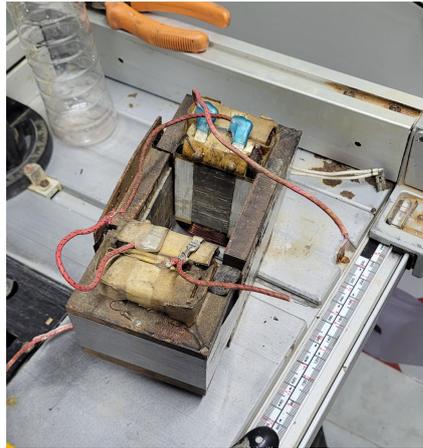
Figura 10: Rádio controle Flysky FSi6



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Processo de montagem das bobinas eletromagnéticas que seriam utilizadas para gerar o campo magnético aplicado à solução salina rotativa. A base de criação desse sistema de bobinas foi extraída a partir da reciclagem de equipamentos de micro-ondas. A imagem mostra as bobinas sendo preparadas para serem posicionadas ao redor do recipiente (figura 11).

Figura 11: Bobinas eletromagnéticas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na figura 12, temos a estrutura principal do protótipo finalizada, integrando o sistema de rotação inferior (onde o recipiente com a solução salina é posicionado) com o conjunto de bobinas eletromagnéticas superiores, responsáveis pela geração do campo magnético.

Figura 12: Estrutura principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Amperímetro analógico registrando uma corrente de aproximadamente 6 Amperes no circuito das bobinas eletromagnéticas, indicando a intensidade da corrente utilizada para gerar o campo magnético aplicado à solução salina durante o experimento (figura 13).

Figura 13: Amperímetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para a construção do sistema de aferimento da resistência elétrica da solução salina, utilizando pontas de prova confeccionadas com finos fios de aço envoltos por um material não condutivo, como mostra a figura 14. A imagem detalha a medição da parte condutora exposta de cada ponta (10 mm) e da distância entre elas, que foi definida em 2 mm para uma medição padronizada.

Figura 14: Pontas de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Conexão do sistema de aferimento ao multímetro digital, utilizando cabos e conectores tipo plugs (figura 15). As pontas de prova construídas com os finos fios de aço foram conectadas aos terminais do multímetro, permitindo a medição da resistência elétrica da solução salina sob diferentes condições experimentais (rotação e campo magnético).

Figura 15: Ligação das Pontas de prova ao multímetro Digital



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Visão geral do protótipo experimental montado, integrando o sistema de rotação na parte inferior, o conjunto de bobinas eletromagnéticas para a aplicação do campo magnético na parte superior e as pontas de prova conectadas ao multímetro (não visível em detalhe nesta perspectiva) para a aferição da resistência elétrica da solução salina contida no interior do sistema rotacional (figura 16). Esta configuração permite a análise da influência combinada da rotação e do campo magnético nas propriedades elétricas da solução.

Figura 16: Sistema completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Início da etapa experimental, demonstrando a adição de cloreto de sódio (sal) ao solvente (água) no interior do recipiente posicionado no sistema de rotação. Esta etapa marca a preparação da solução salina que foi submetida à ação combinada da rotação e do campo magnético gerado pelas bobinas eletromagnéticas (figura 17).

Figura 17: Adição de sal na água



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Primeira medição de resistência elétrica da solução salina com o multímetro, realizada imediatamente após a inserção dos eletrodos, demonstrando instabilidade e flutuação nos valores (figura 18).

Figura 18: Primeira Medição



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Primeira leitura da resistência elétrica da solução salina, obtida com o sistema em repouso (sem rotação e sem campo magnético aplicado), após um período de aproximadamente 15 minutos de espera para a estabilização do valor no multímetro digital (figura 19). O valor registrado foi de 114.5 k $\Omega$ , servindo como referência para as medições subsequentes com o sistema em funcionamento.

Figura 19: Primeiro Valor Estabilizado Com o Sistema Estático



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Segunda leitura da resistência elétrica da solução salina, obtida com o sistema em funcionamento, aplicando simultaneamente a rotação e o campo magnético gerado pelas bobinas eletromagnéticas (figura 20). O valor de resistência aferido foi de 70.2 k $\Omega$ , o que representa uma variação bem considerável de quase a metade da capacidade resistiva em comparação com a leitura inicial.

Figura 20: Segunda Leitura com o Sistema Ligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com a obtenção desses resultados indesejados, foi pensada uma maneira alternativa de coleta de dados que pudesse apresentar um resultado dentro do esperado. Para isso, foi analisado que, se de fato estivesse ocorrendo uma separação iônica dentro da solução salina, essa, por definição do efeito Hall, forneceria uma diferença de potencial (DDP), que poderia ser medida através de um voltímetro. E assim foi feita uma nova análise, onde obtivemos um primeiro resultado satisfatório de 00,10 mV, como visto na figura 21 e 22.

Figura 21: Primeira medição na escala de voltímetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na figura 22 conseguimos ver a segunda leitura feita com o sistema ligado, o qual apresenta uma diferença significativa em relação à primeira medição com o sistema desligado, obtendo uma medida de 41,20 mV.

Figura 22: Segunda medição na escala de voltímetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 3.5 Resultados e insights durante análises

Durante a prática experimental, o procedimento foi conduzido em etapas bem definidas, porém com limitações significativas. Inicialmente, o protótipo consistiu apenas em mapear uma região de saturação salina. Então, reforço que as etapas do processo ministrado não tinham como objetivo imediato obter uma real diminuição da salinidade da água como um todo, mas sim detectar a existência de regiões de maior e menor concentração. Com isso, foi adicionada água a um recipiente, seguida da dissolução de 20 gramas de cloreto de sódio (sal de cozinha), até que a solução atingisse uma homogeneidade visual.

Em seguida, duas pontas de prova ligadas a um multímetro digital (DMM) foram inseridas na solução com o objetivo de aferir sua resistência elétrica. Com o sistema ainda desligado (sem rotação nem campo magnético), foi feita uma primeira observação. Nesse momento, notou-se uma variação imediata nos valores medidos assim que os eletrodos entraram em contato com a solução, o que indicava instabilidade. Essa medição inicial, por sua flutuação e falta de consistência, não foi considerada como parâmetro de base.

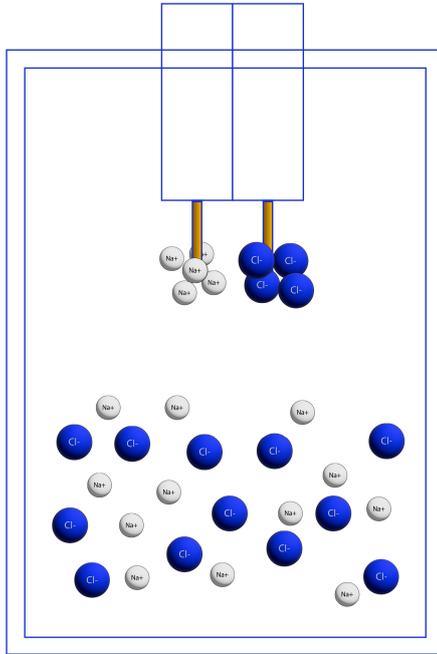
Após alguns minutos, com a estabilização dos valores e da temperatura da solução, foi adotado como resistência inicial o valor de 114.5 k $\Omega$ .

A partir daí, o sistema foi ativado com a aplicação de rotação e de um campo magnético externo. Após essa intervenção, uma nova medição de resistência indicou um valor significativamente menor: 70.2 k $\Omega$ . Esse resultado contrariou a expectativa inicial, uma vez que se esperava que a movimentação da solução e a presença do campo magnético promovesse um aumento da resistência, ou ao menos sua manutenção. A queda acentuada sugeria que havia algum fator externo ou de medição interferindo no experimento.

Frente a esse desvio nos resultados, iniciou-se uma análise técnica do sistema como um todo. A primeira hipótese foi de que o próprio instrumento de medição – o multímetro digital – pudesse estar operando de forma imprecisa ou até mesmo introduzindo algum tipo de perturbação na solução. Para verificar essa possibilidade, buscou-se compreender melhor o princípio de funcionamento do multímetro em modo de medição de resistência. Compreendeu-se, então, que ao medir resistência, o multímetro aplica uma pequena tensão contínua entre as pontas de prova e mede a corrente que atravessa o meio condutor – nesse caso, a solução salina. O valor da resistência é então calculado por meio da Lei de Ohm, como a razão entre essa tensão aplicada e a corrente medida. No entanto, esse processo não é neutro: por aplicar uma corrente contínua, o multímetro pode causar a polarização dos eletrodos, ou seja, o acúmulo de íons ao redor das pontas de prova, o que altera localmente a condutividade da solução, como a figura 23 exemplifica esse efeito. Além disso, a intensidade da corrente aplicada pelo multímetro costuma ser muito baixa, o

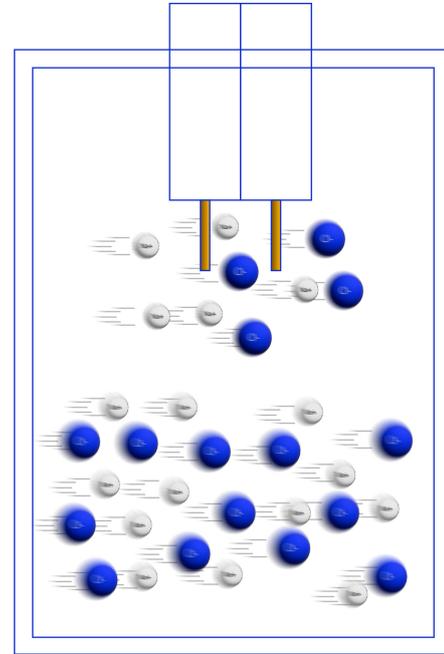
que pode torná-lo sensível a flutuações mínimas de concentração iônica e temperatura. Também não há compensação automática para variáveis geométricas da célula de medição, como a distância entre os eletrodos e a área de contato com a solução.

Figura 23: Sistema desligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 24: Sistema ligado

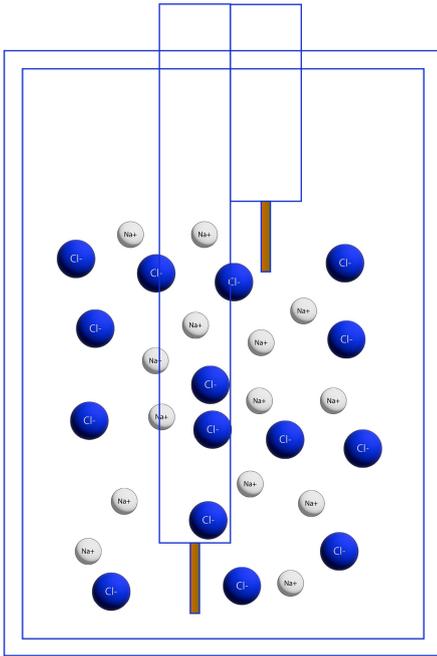


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Portanto, é plausível afirmarmos que a queda na resistência observada tenha decorrido pelo fato de que, quando o sistema está ligado, a própria aceleração do líquido fornece uma força de afastamento dos íons que estavam presos aos eletrodos do multímetro, como demonstra a figura 23. Isso não invalida o dado obtido, mas indica que ele deve ser analisado com cautela e, se possível, complementado com outros instrumentos mais apropriados para esse tipo de medição, como um condutivímetro, que opera com corrente alternada e possui célula calibrada para avaliar a condutividade de soluções iônicas com maior precisão.

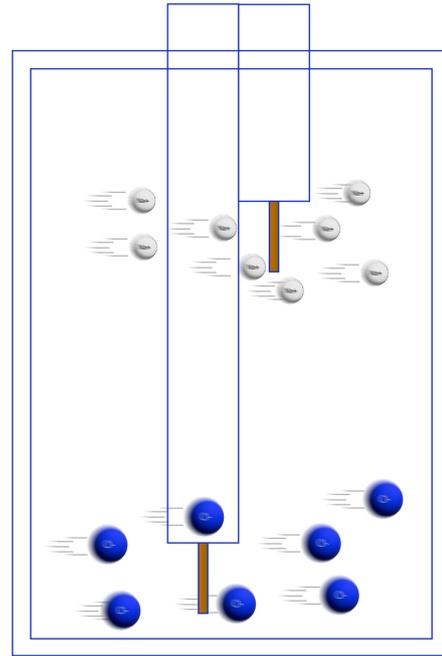
Mesmo sem equipamentos mais adequados, foi realizada uma nova análise utilizando a escala de voltímetro do mesmo instrumento de medida, uma vez que o mesmo oferecia essa possibilidade. Com essa nova abordagem, foi feita mais uma modificação no instrumento de medição, que consistiu em alterar as regiões de medição das pontas de prova, tentando direcioná-las nas regiões que deveriam surgir os gradientes de concentração, como exemplificado pelas figuras 25 e 26. Foi realizado também o mesmo procedimento de medição inicial com o sistema desligado e, em seguida, com o sistema ligado.

Figura 25: Sistema desligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 26: Sistema ligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Outras análises foram realizadas, nas quais se observou o mesmo padrão de comportamento. Contudo, um fenômeno particularmente interessante foi identificado ao se deslocarem as pontas de prova para diferentes regiões da solução. Verificou-se que, quanto maior a proximidade das extremidades do recipiente e maior a distância axial (eixo  $z$ ), maior era a condutividade elétrica aferida. Tal comportamento indicou que, apesar das limitações do multímetro em fornecer medições absolutamente precisas nesse tipo de sistema, havia variações regionais na condutividade, sugerindo que certas áreas da solução respondiam de maneira diferenciada.

Essa observação revelou-se relevante para a compreensão de que existia, de fato, um movimento minimamente ordenado dos íons na solução, induzido possivelmente pelo campo eletromagnético em conjunto com a rotação do fluido. Ainda assim, os resultados obtidos não foram suficientemente robustos para confirmar a hipótese inicial de forma conclusiva. Diante disso, tornou-se necessário aprofundar a pesquisa sobre as dinâmicas envolvidas em soluções salinas rotativas sob a influência de campos eletromagnéticos uniformes, visando elucidar melhor os mecanismos responsáveis pelas alterações observadas na condutividade elétrica.

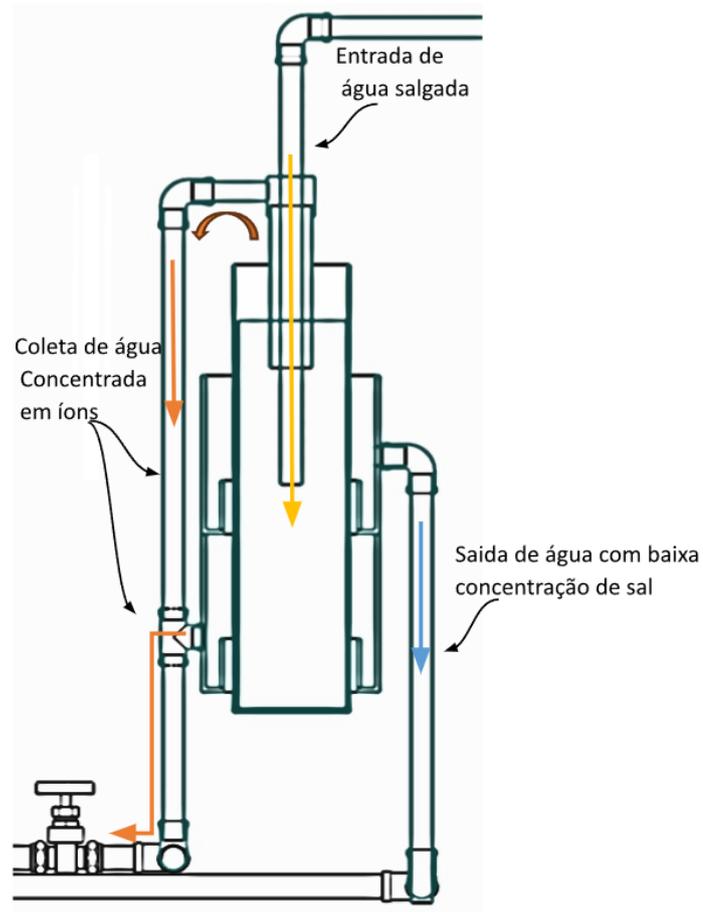
## 4 Novas abordagens e aprimoramentos do sistema

Diante das limitações encontradas nesse primeiro protótipo, foi surgindo a necessidade de pensar em novas alternativas que pudessem otimizar o sistema. Para isso, foram pensadas algumas modificações que podem ser adicionadas ao primeiro protótipo ou, se necessário, criar uma nova estrutura.

### 4.1 O Cilindro rotativo

Embora tenhamos utilizado um cilindro simples em acrílico com 50 mm de diâmetro e 200 mm de altura, essa é uma peça fundamental para o nível de sucesso que se deseja experimentar. O surgimento de um campo elétrico entre a base e a parte superior do volume da solução faz surgir uma força elétrica sobre os íons que se opõe à força de Lorentz, criando um equilíbrio. Para que esse equilíbrio seja rompido, é fundamental que haja constante extração lateral em três pontos: na base e no topo, onde teremos mais concentração de íons de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ , e no centro, onde teremos água com menor concentração de sal. Isso acrescenta uma certa complexidade ao protótipo experimental, mas aproxima-nos de resultados mais relevantes. Uma sugestão desse modelo é apresentada na figura 27.

Figura 27: Sistema de extração lateral de fluidos



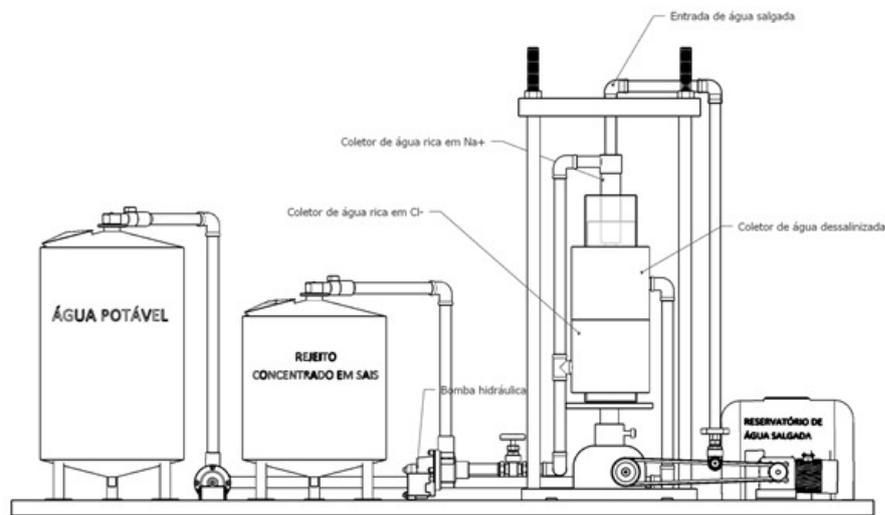
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

## 4.2 Planta completa

Mesmo não sendo o objetivo principal deste trabalho a aplicação final dos fenômenos investigados, fez parte do processo a idealização de uma planta básica de dessalinização por campo magnético.

O sistema deve contar com bombeamento de água salgada para o interior do cilindro e um mecanismo de extração de águas residuais, conforme a figura 28.

Figura 28: Planta de dessalinização por campo magnético (o eletroímã não foi representado na ilustração)

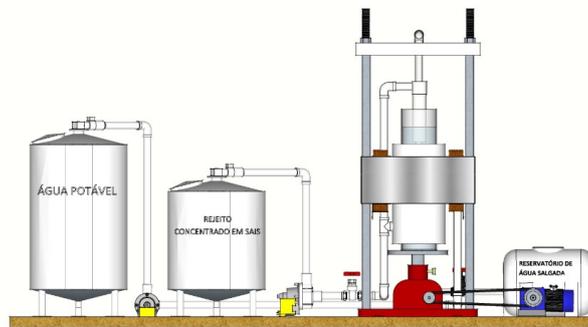


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 4.3 Modelo final idealizado

Na Figura 29, apresentamos um sistema projetado para dessalinização de água com base em princípios de aceleração iônica. O sistema é estruturado em torno de uma base central giratória, similar a uma centrífuga, cuja função principal é acelerar íons de sódio e cloro para separá-los da solução aquosa. Essa base é acionada por um mecanismo de aceleração controlável, conectado por meio de um sistema de correia a um motor elétrico. Esse design permite o estudo de diferentes velocidades de rotação, avaliando o impacto dessas variações na eficiência do processo de dessalinização.

Figura 29: Modelo ideal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O sistema inclui três reservatórios principais:

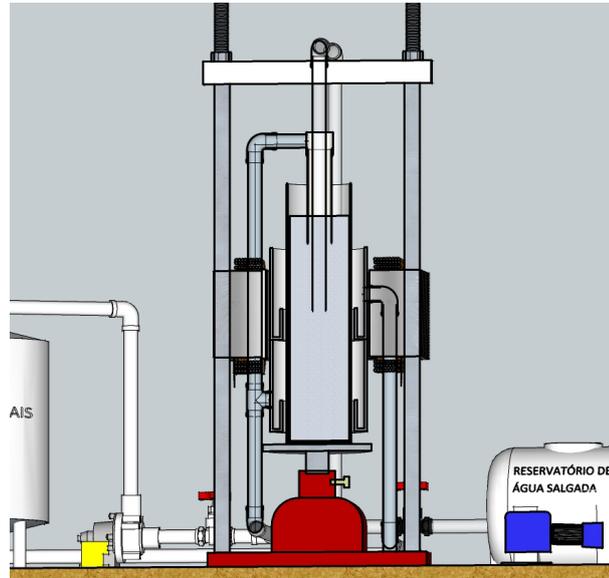
1. **Reservatório de água salgada:** É o ponto inicial onde a água bruta é armazenada antes do processamento. Este reservatório está conectado ao sistema por meio de bombas que controlam a entrada do fluxo de água para o mecanismo central.
2. **Reservatório de rejeito concentrado em sais:** Após a separação dos sais, os resíduos altamente concentrados são direcionados para este tanque. Ele é equipado com válvulas e bombas para descarte controlado, evitando a contaminação ambiental.
3. **Reservatório de água potável:** Recebe a água tratada, agora dessalinizada, pronta para consumo ou uso em processos industriais. O controle do fluxo de saída é gerido por uma bomba compressora, garantindo eficiência no transporte do produto final.

O funcionamento integrado do sistema é baseado em um circuito fechado de fluxo de água, regulado por bombas compressoras. Essas bombas asseguram que o fluxo seja constante e ajudam no controle do processo de separação uniforme.

O sistema é projetado para experimentação, com a possibilidade de ajustar variáveis como a velocidade de rotação, volume de água processada e tempo de retenção. Isso permite uma análise detalhada do desempenho em diferentes condições, contribuindo para a validação do conceito de dessalinização por campo eletromagnético.

Na Figura 30, é apresentada uma visão detalhada do sistema principal de funcionamento do dessalinizador. O núcleo do sistema consiste em uma estrutura cilíndrica envolvida por dois eletroímãs de campo magnético intenso e uniforme, projetados para atuar diretamente na solução aquosa saturada de íons.

Figura 30: Sistema principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A estrutura possui duas tubulações centrais, responsáveis pela retirada e recirculação da solução aquosa saturada. O cilindro central é equipado com perfurações laterais de dimensões precisas, calculadas para permitir apenas o respingo de pequenas gotículas de água provenientes das regiões de menor concentração iônica. Essa separação ocorre devido à ação do campo eletromagnético aplicado, cujos detalhes de funcionamento são melhor explorados na Figura 27.

Os respingos da solução aquosa tratada, após atravessar o campo magnético, são direcionados para calhas coletoras acopladas a um segundo cilindro externo. Esse cilindro secundário está conectado a bombas hidráulicas, responsáveis por transportar a água tratada para o reservatório apropriado de água potável.

O design do sistema é otimizado para:

- Garantir a eficiência da separação de íons na solução aquosa.
- Minimizar perdas durante o processo de coleta das gotículas de água tratada.

- Facilitar o transporte e armazenamento dos diferentes produtos do sistema (água potável e rejeitos).

Esse arranjo possibilita estudos mais detalhados do comportamento da solução aquosa sob a influência de campos eletromagnéticos intensos.

Configuração Experimental e Montagem do Protótipo:

- O sistema experimental consiste em um tubo de acrílico, cilíndrico com 50 mm de diâmetro interno e 200 mm de comprimento.
- Solução aquosa adicionada de 20 gramas de Cloreto de sódio (sal de cozinha).
- O tubo será preenchido com solução de NaCl em concentração controlada e conectado a um motor capaz de gerar rotações controláveis entre 100 e 1500 RPM.
- Um campo magnético uniforme será aplicado perpendicularmente ao eixo de rotação, gerado por um par de eletroímãs com intensidade mensurada entre 0,5 e 1 Tesla.

Instrumentação:

- Sensores de condutividade (multímetro) elétrica serão posicionados ao longo do tubo para medir as variações de concentração iônica.
- Termomanômetro digital para aferir variações de temperatura no sistema.

Sistema de Remoção Seletiva:

- Bombas peristálticas instaladas nas extremidades do tubo para extrair continuamente água das regiões de maior concentração iônica.
- Um mecanismo de reposição automática manterá o volume constante no sistema, utilizando água de baixa salinidade para compensar a remoção.

Coleta de Dados e Parâmetros Monitorados:

- Gradientes de concentração ao longo do eixo do tubo.
- Taxa de remoção iônica e eficiência na redução da salinidade.
- Diferenças de potencial elétrico e correlação com os gradientes iônicos.

Análises Químicas:

- Amostras de água são coletadas das regiões central e extremas para análise de concentração de NaCl por métodos como titulação ou condutivimetria.

## 5 Conclusão

A presente monografia explorou a interação entre campos eletromagnéticos e soluções salinas, com o objetivo de investigar a possibilidade de manipulação iônica através da aplicação da força de Lorentz. A fundamentação teórica abordou conceitos essenciais como a dissociação iônica, os princípios da Magnetohidrodinâmica (MHD), a atuação da força de Lorentz sobre íons em solução, os efeitos de campos magnéticos em soluções rotativas e a geração da tensão de Faraday. Adicionalmente, discutiu-se a potencial formação de gradientes de concentração induzidos por campos magnéticos e as limitações inerentes à aplicação desta abordagem.

A análise experimental inicial se mostrou mais complexa do que o esperado. Entretanto, resultou em um aprendizado substancial, trazendo a necessidade de aprofundamento significativo para a compreensão dos fenômenos investigados. A queda inesperada na resistência elétrica após a ativação do sistema apontou para a significativa influência do método de medição utilizado, o multímetro digital, que pode ter introduzido polarização nos eletrodos e ser sensível a flutuações locais na condutividade. A compreensão do princípio de funcionamento do multímetro em modo de resistência elucidou as possíveis fontes de interferência nos resultados.

Apesar das limitações do instrumento de medição em fornecer dados quantitativos precisos sobre a concentração de sal, a observação de diferentes valores de resistência em distintas regiões da solução sugere a existência de variações espaciais na condutividade elétrica. O aumento da condutividade nas proximidades das extremidades do recipiente e ao longo do eixo axial indica a ocorrência de um movimento minimamente ordenado dos íons, possivelmente induzido pela interação entre o campo eletromagnético e a rotação do fluido.

Essas observações preliminares, embora não conclusivas quanto à hipótese inicial de uma separação significativa de sal, corroboram a ideia de que campos eletromagnéticos podem influenciar a distribuição iônica em soluções. A identificação de variações regionais na condutividade estimula a necessidade de investigações futuras utilizando métodos de medição mais adequados, como a condutimetria, para quantificar com maior precisão os gradientes de concentração.

Em suma, esta etapa da pesquisa, embora tenha enfrentado desafios metodológicos, demonstra o potencial da interação entre campos eletromagnéticos e soluções iônicas para induzir efeitos observáveis na distribuição de cargas. O aprofundamento da compreensão teórica, aliado a metodologias experimentais mais refinadas, será crucial para avançar na exploração da manipulação iônica e na avaliação da sua viabilidade para aplicações como a dessalinização.

Embora a análise experimental inicial tenha fornecido insights qualitativos sobre a influência da combinação de rotação e campo magnético em uma solução salina, conclusões quantificáveis sobre a separação de íons e a alteração da salinidade como um todo não foram obtidas nesta etapa, principalmente devido às limitações do método de medição da resistência com um multímetro. A variação da resistência observada em diferentes regiões sugere uma redistribuição iônica, mas não permite quantificar os gradientes de concentração de forma precisa.

Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de metodologias experimentais mais adequadas para a medição da condutividade e da concentração iônica em soluções. A utilização de um condutivímetro com uma célula de condutividade calibrada permitiria obter dados mais precisos e quantitativos sobre as variações na condutividade da solução em diferentes pontos sob a influência do campo magnético e da rotação. Adicionalmente, técnicas como a espectroscopia de absorção atômica ou a cromatografia iônica poderiam ser empregadas para quantificar as concentrações de sódio e cloreto em amostras coletadas de diferentes regiões do recipiente, fornecendo evidências diretas da separação iônica.

Com o objetivo de obter conclusões quantificáveis em estudos futuros, sugere-se:

- Medição da condutividade local: Utilizar um condutivímetro para mapear a condutividade em diferentes pontos da solução sob a ação do campo magnético e da rotação, buscando quantificar os gradientes de condutividade estabelecidos.
- Análise da concentração iônica regional: Coletar amostras de diferentes regiões da solução e analisar a concentração de íons sódio e cloreto por meio de técnicas espectroscópicas ou cromatográficas, visando quantificar a separação iônica.
- Variação dos parâmetros do sistema: Explorar diferentes intensidades de campo magnético, velocidades de rotação e concentrações iniciais da solução para determinar como esses parâmetros afetam a magnitude dos gradientes de concentração e a eficiência da separação iônica.
- Otimização da geometria do sistema: Investigar diferentes formatos de recipientes e configurações de eletrodos (caso se explore a tensão de Faraday simultaneamente) para otimizar a formação dos gradientes de concentração e a coleta de água com menor salinidade.

Esses procedimentos futuros permitiriam uma análise mais robusta e quantitativa do potencial da utilização de campos eletromagnéticos e rotação para a manipulação iônica em soluções salinas.

## Referências

AMIRI, M. C.; DADKHAH, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids and Surfaces A*, v. 278, p. 252–255, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>. Acesso em: 19 dez. 2024.

DE LUCA, Roberto. Electromotive force generation with hydrogen release by salt water flow under a transverse magnetic field. *Journal of Modern Physics*, v. 2, p. 1115–1119, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jmp.2011.210138>. Acesso em: 18 fev. 2025.

EUROPEAN PATENT OFFICE. Apparatus and method employing magnetic fluid for separating particles. Inventor: E. R. Blatchley. *Patente europeia EP0108808B1*, 1984. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP0108808B1>. Acesso em: 02 out. 2024.

HAKOBYAN, S. N.; AYRAPETYAN, S. N. The effect of extremely low frequency magnetic field on Na<sup>+</sup>-dependent transport in cell membranes. *Biofizika*, [S.l.], v. 50, n. 2, p. 265–270, 2005.

MOURA, A. A. O.; ROCHA, N. R. A. F.; FRANCO JR, M. R. Efeito do campo magnético no processo de coagulação para tratamento de água contaminada com LAS. *Journal of Chemical Engineering and Chemistry – JCEC / Revista de Engenharia Química e Química – REQ<sup>2</sup>*, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 1–8, 2015. ISSN 2446-9416.

PAO, Hsien-Ping. Magnetohydrodynamic flows over a rotating disk. Washington, D.C.: NASA – National Aeronautics and Space Administration; *Catholic University of America*, 1968. (NASA Technical Note D-4438). Disponível em: <https://linkdireto.com/ntrs/nasgov/picitation>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SARIMOV, Ruslan M. et al. Influence of magnetic fields with induction of 7 T on physical and chemical properties of aqueous NaCl solutions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Amsterdam, v. 459, p. 268–274, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11466>. Acesso em: 09 fev. 2025.

SCHLÜTER, Helga Elisabeth Pinheiro. Utilização de campo magnético no controle de formação de incrustações inorgânicas em membranas de osmose inversa no tratamento de águas com altas concentrações de sais. 2014. 103 f. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.*

UNESCO. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: valorizar a água*. Paris: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, 2021. Disponível em: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/reports>. Acesso em: 17 fev. 2025.