



Uema

UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO MARANHÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

QUEZZIA THAYONARA SOUSA SILVA

**ELETRODEPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE Ni-Co
OBTIDOS A PARTIR DE SOLVENTE EUTÉTICO PROFUNDO APLICADOS PARA
ELETROCATÁLISE DE REAÇÕES DE EVOLUÇÃO DE HIDROGÊNIO**

CAXIAS-MA

2025

QUEZZIA THAYONARA SOUSA SILVA

**ELETRODEPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE Ni-Co
OBTIDOS A PARTIR DE SOLVENTE EUTÉTICO PROFUNDO APLICADOS PARA
ELETROCATÁLISE DE REAÇÕES DE EVOLUÇÃO DE HIDROGÊNIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Matemática e Física da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA Campus Caxias, como requisito para obtenção de grau em Licenciatura plena em Física.

Orientador: Prof. Dr. Juliermes Carvalho Pereira

CAXIAS-MA

2025

S586e Silva, Quezzia Thayonara Sousa

Eletrodeposição e caracterização de revestimentos de Ni-Co obtidos a partir de solvente eutético profundo aplicados para eletrocatalise de reações de evolução de hidrogênio / Quezzia Thayoinara Sousa Silva. __Caxias: Campus Caxias, 2025.

52f.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão – Campus Caxias, Curso de Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Juliermes Carvalho Pereira.

1. Eletrodeposição. 2. Níquel-cobalto. 3. Solventes eutéticos. 4. Hidrogênio verde. 1. Título.

CDU 621.357.7


QUEZZIA THAYONARA SOUSA SILVA

**ELETRODEPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE Ni-Co
OBTIDOS A PARTIR DE SOLVENTE EUTÉTICO PROFUNDO APLICADOS PARA
ELETROCATÁLISE DE REAÇÕES DE EVOLUÇÃO DE HIDROGÊNIO**


Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Departamento de Matemática e Física da
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA
Campus Caxias, como requisito para obtenção
de grau em Licenciatura plena em Física.

Aprovado em: 15 /07 /2025


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JULIERMES CARVALHO PEREIRA**
Data: 05/08/2025 19:01:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juliermes Carvalho Pereira (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente
 **IURE DA SILVA CARVALHO**
Data: 05/08/2025 19:30:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Iure da Silva Carvalho (Avaliador interno)
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO HENRIQUE MACEDO BARROS**
Data: 05/08/2025 19:48:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Pedro Henrique Macedo Barros (Avaliador interno)
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Com muita honra dedico esse trabalho a Deus, ao meu pai Francisco Oliveira da Silva e minha mãe Maria Benedita da Conceição Sousa Silva.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela força, consolo e por nunca permitir que eu desistisse

Aos meus pais, Francisco Oliveira e Maria Benedita, pelo amor, apoio e presença constante;

Aos meus irmãos Lucas Ismael, Matheus Nathan, Queren Thayorrane e Esdras Miqueias e às minhas cunhadas, Vanessa Magalhães e Vanusa Chaves pelo carinho;

Ao meu orientador Prof. Dr. Juliermes Carvalho, pelas orientações, apoio e amizade ao longo da minha trajetória;

Aos professores João Alberto Porto, Iure da Silva Carvalho, Pedro Henrique, Ricardo Gomes pelo apoio acadêmico, pelo incentivo pessoal e pela valiosa amizade;

Ao diretor do curso Ediomar Costa Serra pelos conselhos e amizade;

Ao meu namorado, Sandro Gaspar, pelo amor, companheirismo e apoio diário;

Aos grandes amigos Ana Carolina, João Emanuel, João Pedro e Leandro Augusto, pela amizade e leveza nos dias difíceis;

Aos amigos e companheiros de laboratório, Júlio Cesar, Pedro Henrique, Flávio Henrique e Marcos Vinícius, pela parceria nos experimentos;

Ao laboratório LFAER, onde realizei os experimentos, e à FAPEMA, pelo apoio financeiro pelo qual sou bastante grata

À UFSCar, pelo acesso aos equipamentos que me possibilitou realizar as caracterizações via MEV e EDS;

Sou grata à Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) pela oportunidade de me dedicar aos estudos e particularmente ao Departamento de Matemática e Física do Centro de Estudos Superiores de Caxias (CESC) pelo suporte oferecido a este projeto;

Ao Prof. Paulo Afonso Amorim, pela oportunidade;

Aos professores e colegas do curso de Física Licenciatura/CESC-UEMA, pela contribuição à minha formação;

“A ciência não é apenas uma ferramenta para descobrir os segredos da natureza, mas também uma forma de compreender o pensamento de Deus”.

Nikola Tesla

RESUMO

Dada a crescente demanda por fontes de energia sustentáveis, o hidrogênio verde surge como uma alternativa promissora. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho electrocatalítico de revestimentos de Níquel (Ni) e ligas de Níquel-Cobalto (Ni-Co), obtidos por electrodeposição a partir de Solventes Eutéticos Profundos (DES) compostos por cloreto de colina e ureia, aplicados à Reação de Evolução de Hidrogênio (HER). Os revestimentos foram depositados sobre substratos de cobre e caracterizados por voltametria cíclica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS). Os resultados evidenciaram que a adição de cobalto alterou significativamente a morfologia, a composição química e a eficiência catalítica dos revestimentos. A amostra Ni₇₉Co₂₁ se destacou, apresentando o menor sobrepotencial (η_{10}) de $45 \pm 8,7$ mV, superando até mesmo os valores encontrados na literatura para condições similares. Em conclusão, a combinação de DES com uma deposição controlada proporcionou electrocatalisadores eficientes, estáveis e de baixo custo, tornando-os viáveis para a produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: electrodeposição; electrocatálise; níquel-cobalto; solvente eutético; hidrogênio verde.

ABSTRACT

Given the growing demand for sustainable energy sources, green hydrogen emerges as a promising alternative. This study aimed to evaluate the electrocatalytic performance of Nickel (Ni) coatings and Nickel-Cobalt (Ni-Co) alloys, obtained by electrodeposition from Deep Eutectic Solvents (DES) composed of choline chloride and urea, applied to the Hydrogen Evolution Reaction (HER). The coatings were deposited on copper substrates and characterized by cyclic voltammetry, Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The results highlighted that the addition of cobalt significantly altered the morphology, chemical composition, and catalytic efficiency of the coatings. The Ni₇₉Co₂₁ sample stood out, presenting the lowest overpotential (η_{10}) of 45 ± 8.7 mV, even surpassing the values found in the literature for similar conditions. In conclusion, the combination of DES with controlled deposition provided efficient, stable, and low-cost electrocatalysts, making them viable for green hydrogen production.

Keywords: electrodeposition; electrocatalysis; nickel-cobalt; deep eutectic solvent; green hydrogen.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Distribuição das fontes de energia na Matriz Energética Mundial.	15
FIGURA 2 – Abundância relativa de elementos químicos no universo, sol e terra.	17
FIGURA 3 – Esquema de cores e processos de obtenção do hidrogênio combustível.	18
FIGURA 4 – Esquema de uma célula eletrolítica simples para produção de hidrogênio.....	19
FIGURA 5 – Representação esquemática de um ponto eutético em um diagrama de fases de dois componentes.	22
FIGURA 6 – Voltametria Cíclica mostrando os potenciais e densidades de corrente anódico (E_{PA}) e catódico (E_{PC}).	24
FIGURA 7 – Curvas ilustrativas de polarização para HER em eletrocatalisadores diferentes e seus respectivos valores de sobrepotenciais (a) e Classificação dos catalisadores de HER com base no seu valor de sobre potencial (b).....	26
FIGURA 8 – Visão geral dos mecanismos de HER Volmer, Heyrovsky e Tafel com suas etapas de determinação.....	27
FIGURA 9 – Resumo Gráfico da metodologia seguida durante o processo de eletrodeposição e caracterização dos revestimentos.....	32
FIGURA 10 – Ilustração do eletrodo de cobre para o experimento de voltametria cíclica (a) e para o processo de eletrodeposição (b).....	33
FIGURA 11 – Ilustração do preparo das soluções eletrolíticas: (a) solvente sintético profundo (DES) à base de cloreto de colina e ureia, (b) DES com $NiCl_2$ dissolvido e (c) DES com $CoCl_2$ e $NiCl_2$ dissolvidos	34
FIGURA 12 – Esquema representativo da disposição dos eletrodos em uma célula eletroquímica.	35
FIGURA 13 – Esquema representativo da disposição dos eletrodos em uma célula eletroquímica.	36
FIGURA 14 – Voltamogramas cíclicos relativo ao substrato de cobre em meio de 1ChCl:2U na temperatura de 60 °C (a), do eletrólito contendo 1ChCl:2U + 0,20 mol L ⁻¹ de $NiCl_2$ (azul claro) e 1ChCl:2U + 0,04 $CoCl_2$ (rosa), (b) e Eletrólito contendo 1ChCl:2U + 0,20 mol L ⁻¹ + [0,01;0,02;0,04 e 0,08] mol L ⁻¹ (c).	38
FIGURA 15 – Imagem MEV com ampliação 1.000X dos revestimentos de Ni eletrodepositados a partir do banho I (a) e espectro de energia dispersiva (EDS) da superfície do revestimento Ni_{100} eletrodepositado sobre eletrodos de cobre (Cu) em 60 °C (b).....	40

FIGURA 16 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000X, referente aos revestimentos de Ni-Co eletrodepositados a partir dos banhos III, IV, V e VI à 60°C.	41
FIGURA 17 – Espectros de energia dispersiva (EDS) dos revestimentos obtidos a partir dos banhos III, IV, V e VI, indicando a incorporação crescente de cobalto nas amostras Ni ₉₃ Co ₇ , Ni ₈₆ -Co ₁₄ , Ni ₇₈ Co ₂₂ e Ni ₆₂ Co ₃₈	42
FIGURA 18 – Comportamento eletroquímico do substrato de cobre em relina: curva de polarização linear (a) e curva de Tafel (b).	43
FIGURA 19 – Curvas de Polarização Linear dos revestimentos de Ni (linha verde) e Ni-Co nas diferentes concentrações (a), Gráficos de Tafel das curvas de eletrocatalise (b).	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição química das soluções de eletrodeposição, relação entre as espécies de $[\text{Ni}^{2+} / \text{Co}^{2+}]$, potencial de eletrodeposição, a carga aplicada para ambos e nomenclatura de cada banho.	35
TABELA 2 – Média dos Parâmetros eletrocatalíticos do substrato de Cu, revestimentos Ni_{100} , $\text{Ni}_{93} \text{Co}_7$, $\text{Ni}_{86} \text{Co}_{14}$, $\text{Ni}_{79} \text{Co}_{21}$ e $\text{Ni}_{62} \text{Co}_{38}$ em solução aquosa de KOH 1M.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HER	Reação de Evolução de Hidrogênio (Hydrogen Evolution Reaction)
OER	Reação de Evolução de Oxigênio (Oxygen Evolution Reaction)
DES	Solvente Eutético Profundo (Deep Eutectic Solvent)
VC	Voltametria Cíclica
ChCl	Cloreto de Colina
EG	Etilenoglicol
E_{eq}	Potencial de equilíbrio
Ni	Níquel
Ni^{2+}	Íons de Níquel
$NiCl_2$	Cloreto de Níquel
Co	Cobalto
Co^{2+}	Íons de Cobalto
$CoCl_2$	Cloreto de Cobalto
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
Cu	Cobre
AgCl	Cloreto de Prata
Pt	Platina
O_2	Oxigênio
H_2	Hidrogênio
OH^-	Íon Hidroxila
REDOX	Reação de Oxidação e Redução (Reduction-Oxidation Reactions).
U	Ureia
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
KOH	Hidróxido de potássio
HBD	Doador de Ligação de Hidrogênio (Hydrogen Bond Donor)
WE	Eletrodo de Trabalho (Working Electrode)

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Sobrepotencial em milivolt (mV)
η_{10}	Sobrepotencial a 10 mA/cm ²
°C	Graus Celsius
cm ²	Unidade de área
Q	Unidade de carga em coulomb (C)
mol L ⁻¹	Concentração Molar
%	Porcentagem
mL	Mililitros
mV.s ⁻¹	Velocidade de varredura
i	Densidade de corrente em ampere (A)
T	Temperatura
F	Constante de Faraday
J	Medida de energia em joule

SUMÁRIO

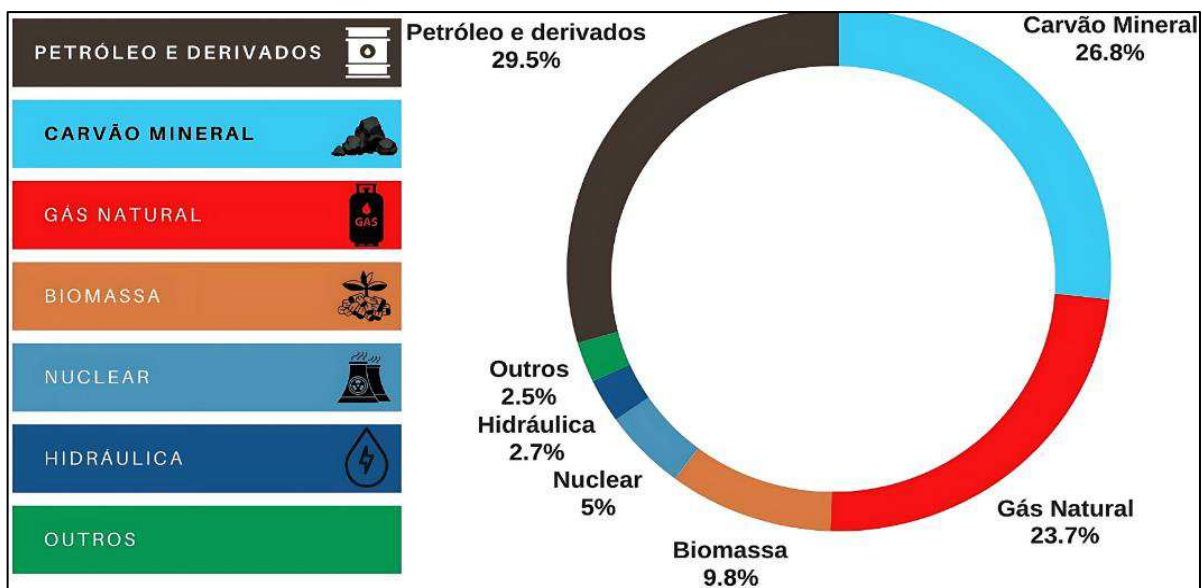
1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Fontes de energia e o Hidrogênio Combustível	17
2.1.1	<i>Eletrólise da água</i>	19
2.1.2	<i>Materiais Eletrocatalíticos</i>	20
2.2	Eletrodeposição de revestimentos metálicos	21
2.2.1	<i>Solventes aquosos</i>	21
2.2.2	<i>Solventes eutéticos profundos</i>	22
2.3	Técnicas de Caracterização Eletroquímica	23
2.3.1	<i>Voltametria cíclica</i>	23
2.3.2	<i>Curva de Polarização Linear</i>	25
2.4	Estado da Arte	27
2.4.1	<i>Revestimentos de Ni aplicados à eletrólise da água</i>	27
2.4.2	<i>Revestimentos de Ni-Co aprimorados para produção de Hidrogênio</i>	29
3	OBJETIVOS	31
3.1	Objetivo Geral	31
3.2	Objetivos Específicos	31
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
4.1	Preparação de eletrodos e soluções	33
4.2	Caracterizações eletroquímica dos revestimentos de Ni e Ni-Co	34
4.3	Eletrodeposição e Caracterização morfológica e Química dos revestimentos	35
4.4	Testes de Eletrocatalise	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Caracterização eletroquímica e eletrodeposição dos revestimentos	38
5.2	Caracterização morfológica, química e física	39
5.3	Testes de Eletrocatalise	43
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIA	48

1 INTRODUÇÃO

A crise energética tem evoluído rapidamente nas últimas décadas, principalmente devido ao esgotamento das fontes tradicionais de energia e à crescente poluição atmosférica. Atualmente, a matriz energética mundial é composta majoritariamente (80%) por combustíveis fósseis, conforme ilustrado na Fig. 1. Essa dependência contribui significativamente para as emissões crescentes de monóxido de carbono (CO) na atmosfera, que, por sua vez, é apontado como um dos principais causadores do efeito estufa (Sampaio, 2021).

Diante desse cenário, a demanda pela substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia mais sustentáveis e renováveis tem aumentado, uma vez que os impactos das mudanças climáticas já são perceptíveis em escala global. Entre os principais efeitos, destacam-se a elevação da temperatura média do planeta e o agravamento da poluição do ar, o que tem gerado diversos problemas ambientais, como a elevação do nível dos mares e períodos de seca prolongada, entre outros (Emissions Gap Report, 2022)

FIGURA 1– Distribuição das fontes de energia na Matriz Energética Mundial.



Fonte: Adaptado de (Sampaio, 2021)

Portanto, o hidrogênio surge como um combustível promissor devido à sua capacidade de gerar energia limpa, emitindo apenas água como subproduto. Em especial, o hidrogênio verde, produzido por meio de processos sustentáveis, como a eletrólise da água, é considerado uma alternativa viável para a substituição de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas (Al-Enazi et al., 2021).

Um dos principais desafios na produção de hidrogênio verde é o alto consumo de energia necessário para realizar a eletrólise da água. Esse processo, que consiste na separação da molécula de água em oxigênio e hidrogênio, demanda uma quantidade significativa de energia elétrica, o que pode tornar o hidrogênio verde economicamente inviável em comparação com outras fontes de energia. Assim, encontrar maneiras de reduzir o consumo energético durante a eletrólise é essencial para que o hidrogênio verde se torne uma alternativa competitiva (Chen; Wei; Ni, 2021).

Neste contexto, a eletrocatalise surge como uma abordagem promissora para reduzir o consumo de energia na eletrólise da água. A aplicação de revestimentos de níquel e cobalto (Ni-Co) nos eletrodos pode aumentar a eficiência do processo eletroquímico, diminuindo a energia necessária para a produção de hidrogênio. A hipótese central deste estudo é que os revestimentos de Ni-Co, devido às suas propriedades catalíticas, podem proporcionar uma eletrocatalise eficaz, resultando em uma redução significativa do consumo energético na eletrólise da água.

A busca por soluções eficientes para a produção de hidrogênio verde é fundamental para a mitigação das mudanças climáticas e o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono. Tecnologias sustentáveis, como a eletrocatalise com revestimentos de Ni-Co, têm potencial para tornar esse processo mais viável. Este trabalho tem como objetivo investigar revestimentos de níquel-cobalto obtidos por eletrodeposição em solvente eutético como catalisadores na reação de desprendimento de hidrogênio (HER), visando a redução do consumo energético na eletrólise da água. A originalidade da pesquisa está no uso de um meio alternativo, menos tóxico e mais sustentável, além da caracterização detalhada dos revestimentos quanto à morfologia, composição e desempenho eletrocatalítico. A proposta contribui com alternativas viáveis ao uso de metais nobres e está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9 e 13.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fontes de energia e o Hidrogênio Combustível

O hidrogênio (H₂) é um dos elementos químicos mais abundantes do universo, representando cerca de 92% dos átomos presentes, como ilustra a Fig.2. Ele está presente em inúmeras moléculas que compõem diversas substâncias, como a água, compostos inorgânicos (ácidos e bases) e compostos orgânicos (hidrocarbonetos, álcoois, hidratos, entre outros). Do ponto de vista energético, o hidrogênio é considerado uma alternativa promissora devido à sua elevada densidade de energia por unidade de massa. Como o elemento mais leve da tabela periódica, ele pode fornecer de duas a três vezes mais energia que os combustíveis fósseis convencionais (Borges, 2022).

FIGURA 2 – Abundância relativa de elementos químicos no universo, sol e terra.

Z	Simbolo	Elementos	Universo	Sol	Terra
1	H	Hidrogênio	92 %	94 %	0.2 %
2	He	Hélio	7.1 %	6 %	
8	O	Oxigênio	0.1 %	0.06 %	48.8 %
6	C	Carbono	0.06 %	0.04 %	0.02 %
10	Ne	Neônio	0.012 %	0.004 %	
7	N	Nitrogênio	0.015 %	0.007 %	0.004 %
14	Si	Sílicio	0.005 %	0.005 %	13.8 %
12	Mg	Magnésio	0.005 %	0.004 %	16.5 %
26	Fe	Ferro	0.004 %	0.003 %	14.3 %

Fonte: Adaptado de (Astronoo, 2013)

Por outro lado, o hidrogênio não é encontrado de forma livre na atmosfera terrestre. Ele é classificado como um vetor energético, ou seja, uma fonte secundária de energia que precisa ser produzida, transportada e armazenada antes de sua utilização (Fernandes Borges, 2022). A produção de hidrogênio a partir de fontes sustentáveis, em sua forma molecular (H₂), sem emissão de CO₂ na atmosfera, é frequentemente classificada por cores. Essa classificação indica o método de produção, as fontes de energia utilizadas e as emissões geradas, como ilustra a Fig. 3.

FIGURA 3 – Esquema de cores e processos de obtenção do hidrogênio combustível.



Fonte: Adaptado de: (Santos; Ohara, 2020)

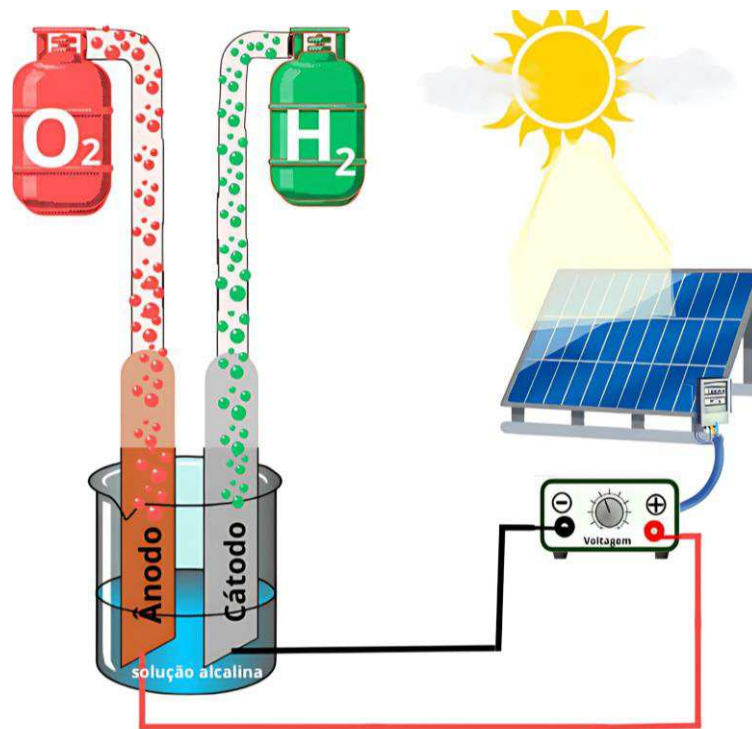
O hidrogênio verde é atualmente uma das maiores apostas para um futuro sustentável. Produzido por meio da eletrólise da água, esse processo utiliza eletricidade gerada exclusivamente por fontes renováveis, como solar, eólica, hidráulica e geotérmica. Durante a eletrólise, as moléculas de água são separadas em hidrogênio e oxigênio, sem a emissão de subprodutos ou gases nocivos à atmosfera, destacando-se como uma tecnologia limpa e ambientalmente responsável (Rafaela; Silva, 2023). Além de ser uma alternativa sustentável, o hidrogênio verde tem o potencial de impulsionar a recuperação econômica global, ao mesmo tempo em que acelera a transição energética. Sua aplicação é especialmente promissora em setores de difícil descarbonização, como o transporte pesado e a indústria, proporcionando uma solução viável e eficiente para alcançar metas climáticas globais (Ferreira, 2021).

Apesar de suas vantagens, o hidrogênio verde enfrenta desafios significativos. Atualmente, ele não é economicamente competitivo devido aos altos custos de produção e à baixa eficiência dos processos de eletrólise. Para superar essas barreiras, são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento, principalmente em tecnologias que reduzam os custos dos eletrocatalisadores e aumentem a eficiência do processo (Paiva, 2022; Knob, 2014). Além disso, o hidrogênio possui características físico-químicas importantes, como ser incolor, inodoro, altamente reativo e inflamável. Ele é amplamente utilizado em células de combustível para veículos elétricos, no armazenamento de energia e em aplicações industriais, como na produção de amônia e metanol. Portanto, o hidrogênio, especialmente o verde, desempenha um papel estratégico na busca por soluções energéticas sustentáveis, contribuindo para a descarbonização e para a mitigação das mudanças climáticas (Silva; Yamashita; Santos, 2024).

2.1.1 Eletrólise da água

A divisão eletroquímica da água se tornou uma das abordagens sustentáveis mais promissoras e livres de poluição para a produção de hidrogênio e oxigênio, visto que é capaz de produzir o combustível de forma simples e com alta pureza (Tahir, Pan, Idrees, Zhang, Wang, Zou, Lin, 2017). O processo de eletrólise da água é exemplificado na Fig. 4 em que mostra uma célula eletrolítica simples que consiste em um recipiente parcialmente cheio com uma solução alcalina na qual estão submersos dois eletrodos conectados em uma fonte de tensão.

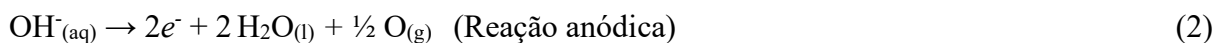
FIGURA 4 – Esquema de uma célula eletrolítica simples para produção de hidrogênio.



Fonte: O Próprio Autor, 2025

Ao aplicar um potencial elétrico, será gerada uma passagem de corrente elétrica entre os eletrodos que provocará uma dissociação nas moléculas de água em gás hidrogênio no lado do cátodo e em gás oxigênio no lado do ânodo (Holladay et al., 2009). Portanto, a eletrólise da água ocorre por meio de duas semi-reações, a reação de desprendimento de hidrogênio (HER) no cátodo a partir da redução dos prótons que ganham elétrons formando as moléculas de H_2 e a reação de desprendimento de oxigênio (OER) no ânodo onde são migradas as moléculas de

OH⁻ ocorrendo a oxidação e formando assim as moléculas de O₂. As etapas do processo podem ser vistas através das formulas 1 e 2 e resumido pela equação 3 (Wang et al., 2014).



Os processos de eletrólise da água envolvem a aplicação de uma tensão mínima calculada, que na teoria é de $-1,23\text{V}$ em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, no qual esse valor é determinado termodinamicamente a partir da variação de energia livre padrão ΔG° , equivalente a $234,2\text{ kJ mol}^{-1}$ à temperatura ambiente de $25\text{ }^\circ\text{C}$ e a 1 atm (Tahir et al., 2017). Tal valor é o mínimo necessário para que ocorra a quebra das moléculas bem como a transferência de elétrons, todavia na prática é necessária a aplicação de potenciais maiores que o termodinâmico (Zhu et al., 2020). Desta forma, para haver a eletrólise da água na sua forma pura é necessária uma quantidade excessiva de energia na forma de sobrepotencial (η), que corresponde ao valor adicional de tensão aplicada na célula eletroquímica para se obter a energia elétrica suficiente para a produção da taxa de H₂ que se deseja produzir (Theerthagiri et al., 2020).

2.1.2 Materiais Eletrocatalíticos

A eletrólise da água tem se destacado como uma das técnicas mais importantes para a produção de hidrogênio verde, sendo capaz de separar a molécula da água em duas partes individuais, o hidrogênio (H₂) renovável e o oxigênio (O) puro como subproduto utilizando a energia elétrica (Shiva Kumar & Himabindu, 2019).

No entanto, a eficiência eletroquímica desse método é restrita pela OER que é cineticamente mais lenta no processo e exige um grande sobrepotencial que supera a barreira de ativação e requer uma quantidade de energia elétrica maior (Frentiu et al., 2007). Desta maneira, materiais eletrocatalisadores com alta eficiência precisa ser estudados para diminuir o custo de energia do processo de eletrólise da água.

Vários materiais tem sido investigados como eletrodos para eletrocatalisadores, uma vez que cada elemento possui características distintas de atividade catalítica, resistência

elétrica, resistividade a corrosão e vida útil. A platina (Pt) por exemplo é conhecida por ser um dos materiais mais eficientes para esse processo, mas seu alto custo a torna inadequada para aplicações industriais em larga escala (Santos, et al., 2013). Portanto, é necessário desenvolver materiais mais baratos e com bom desempenho eletrocatalítico, capazes de substituir os eletrodos feitos a partir de metais do grupo da platina.

Neste contexto, as pesquisas focadas em materiais eletrocatalíticos em soluções alcalinas têm se concentrado em eletrodos com alta densidade de corrente de troca e uma área eletroquimicamente ativa. A literatura mostra que o revestimento de níquel e cobalto (Ni-Co) são amplamente utilizados como materiais ativos para a evolução de hidrogênio e oxigênio na eletrólise da água (Zhu, Katayam, Miura, 2010). Além disso, esses revestimentos, em especial, têm sido frequentemente preparados por meio do processo de eletrodeposição, uma técnica vantajosa devido ao seu baixo custo e alta viabilidade para aplicações em larga escala (Radadi, 2020).

2.2 Eletrodeposição de revestimentos metálicos

2.2.1 Solventes aquosos

Uma das opções para a criação de revestimentos metálicos é eletrodeposição em soluções aquosas devido ao seu baixo custo e à capacidade de dissolver diversos sais metálicos. (Pereira, 2021). No entanto, suas limitações técnicas continuam sendo um desafio considerável para a produção de revestimentos de alta qualidade, desempenho, e boa aderência.

Apesar das vantagens, a utilização de solventes aquosos na eletrodeposição enfrenta desafios técnicos significativos. Um dos principais obstáculos é a dificuldade em depositar determinados metais, devido à instabilidade química de seus íons metálicos, além de comportamentos redox desfavoráveis em meio aquoso. Esse fator pode comprometer a formação de depósitos homogêneos e aderentes. Outro problema recorrente é a competição com a reação de evolução do hidrogênio (HER), que ocorre simultaneamente à deposição metálica. A HER gera bolhas na superfície do eletrodo, o que pode resultar em defeitos estruturais, como porosidade, prejudicando a eficiência e a qualidade dos revestimentos obtidos (Sakita, 2018).

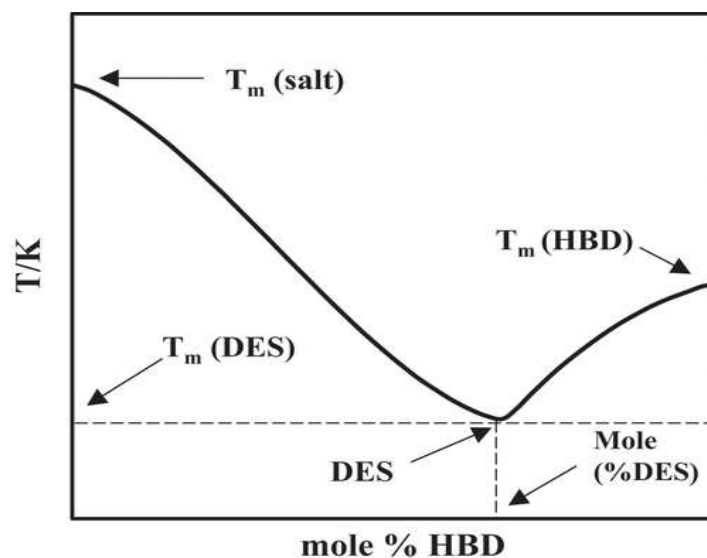
Adicionalmente, alterações no pH próximo ao eletrodo impactam diretamente as propriedades mecânicas e químicas dos revestimentos metálicos, exigindo o uso de estratégias corretivas. O emprego de aditivos complexantes, como citratos e cloretos, tem sido amplamente investigado como forma de minimizar esses efeitos, promovendo maior controle sobre a

uniformidade e aderência dos revestimentos (Popov et al., 2016). Em contraste, DESs oferecem uma alternativa promissora, com vantagens como alta estabilidade térmica, maior janela de estabilidade eletroquímica e baixa volatilidade. Essas características tornam os DESs particularmente adequados para processos de eletrodeposição, permitindo a obtenção de revestimentos mais densos, homogêneos e aderentes, mesmo em condições extremas (Bernasconi et al., 2017).

2.2.2 Solventes eutéticos profundos

Os DES (do inglês - Deep Eutectic Solvents) são soluções líquidas que são formados pela mistura de dois ou três componentes que podem ser viáveis economicamente e ambientalmente seguros. Os DES são formados por um composto receptor de ligação de hidrogênio (salt), com um composto doador de ligação de hidrogênio (HBD) originando uma mistura que apresenta características de sistemas eutéticos. Esses sistemas possuem um ponto de fusão baixo, inferior ao dos componentes individuais, permitindo aplicações diversas em processos químicos (Santana et al., 2021).

FIGURA 5 – Representação esquemática de um ponto eutético em um diagrama de fases de dois componentes.



Fonte: (Torkzadeh et al., 2024).

A Fig. 5 ilustra o comportamento do equilíbrio sólido-líquido em um sistema eutético binário. O diagrama mostra as diferentes regiões de estabilidade de fases para duas substâncias

“a” e “b” em função da temperatura e da composição da mistura. Em altas temperaturas a fase líquida predomina, enquanto em temperaturas mais baixas ocorre a solidificação dos componentes "a" e "b". A menor temperatura em que a mistura ainda se encontra no estado líquido é chamada de ponto eutético, caracterizado por um equilíbrio entre os sólidos "a" e "b" e a fase líquida. Esse ponto apresenta um valor de temperatura inferior aos pontos de fusão dos componentes puros, tornando-se essencial para compreender o comportamento e as aplicações de sistemas eutéticos, como síntese química, separação de compostos, e formulações sustentáveis (Koretsky, 2007; Santana et al., 2021).

Os DESs como cloreto de colina e etilenoglicol (ChCl:EG) e cloreto de colina e ureia (ChCl:U) têm demonstrado um potencial significativo na eletrodeposição de metais, especialmente na produção de revestimentos metálicos. Suas características como baixa toxicidade, biodegradabilidade e capacidade de dissolver compostos metálicos complexos, oferecem vantagens notáveis em relação aos solventes convencionais (Ferreira, 2024). Estudos indicam que os DESs permitem um controle aprimorado das propriedades dos materiais depositados, incluindo morfologia, aderência e uniformidade, o que é crucial para a fabricação de revestimentos metálicos de alta qualidade. Por exemplo, a utilização de DES na eletrodeposição de metais nobres, como a prata, resulta em filmes homogêneos e bem aderidos (Patelli longatto, 2024).

Além disso, a aplicação de DES na eletrodeposição está alinhada aos princípios da química verde, promovendo processos industriais mais sustentáveis e menos agressivos ao meio ambiente. Sua capacidade de atuar como solventes verdes com baixa toxicidade tem se tornado uma questão importante para a química, destacando-se como alternativa sustentável para aplicação em processos de extração e síntese (Gérios et al., 2024).

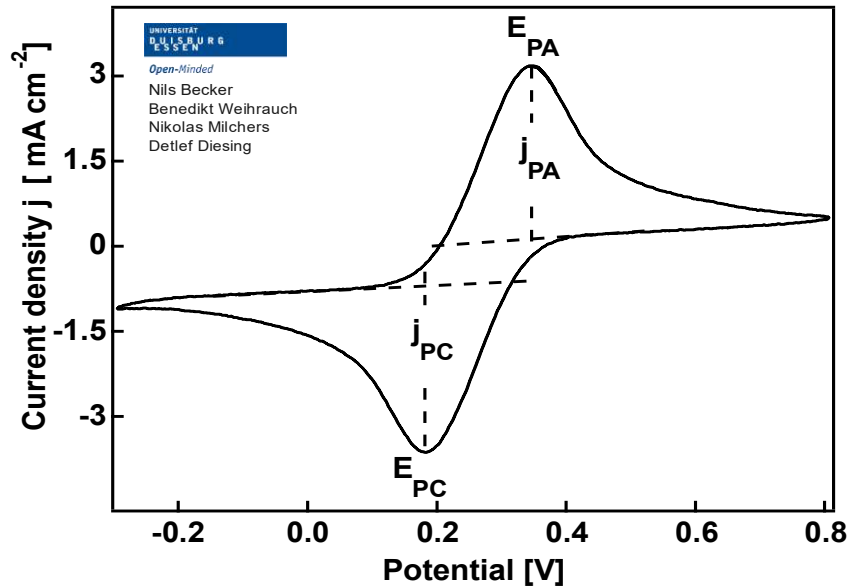
2.3 Técnicas de Caracterização Eletroquímica

2.3.1 Voltametria cíclica

A voltametria cíclica (VC) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de processos eletroquímicos, permitindo a análise qualitativa e quantitativa de reações redox. Essa técnica envolve a varredura do potencial de um eletrodo em uma solução eletrolítica e o registro da corrente elétrica gerada, produzindo gráficos conhecidos como voltamogramas como mostra a Fig. 6. Por meio da VC, é possível obter informações fundamentais sobre a cinética de transferência de elétrons, reversibilidade das reações e propriedades termodinâmicas. De

acordo com Bard e Faulkner (Bard; Faulkner, 2001), a versatilidade da VC a torna essencial em pesquisas sobre sistemas complexos, como os utilizados na eletrolise da água e na eletrodeposição.

FIGURA 6 – Voltametria Cíclica mostrando os potenciais e densidades de corrente anódico (E_{PA}) e catódico (E_{PC}).



Fonte: (Wikipedia, 2025)

Na eletrólise da água, a voltametria cíclica desempenha um papel crucial na avaliação de catalisadores eletroquímicos para a HER e oxigênio OER. A técnica permite identificar os potenciais de início das reações e avaliar a eficiência catalítica de materiais, como óxidos metálicos e metais de transição. Mccrory e colaboradores (Mccrory et al., 2013) destacam a importância da VC para a otimização de catalisadores, possibilitando avanços significativos na eficiência energética do processo, um fator essencial para a produção sustentável de hidrogênio verde.

No campo da eletrodeposição, a VC é amplamente empregada para monitorar o comportamento eletroquímico de íons metálicos durante o crescimento de filmes e revestimentos. Essa técnica possibilita determinar as condições ótimas de deposição, bem como avaliar a estabilidade e a uniformidade do material depositado. Ademais, Popov (Popov, 2015) mostra que a análise detalhada fornecida pela voltametria cíclica contribui para o desenvolvimento de processos industriais mais precisos e econômicos, fundamentais em

aplicações tecnológicas que exigem controle rigoroso sobre a composição e a morfologia de revestimentos metálicos.

Além disso, a voltametria cíclica é indispensável para o desenvolvimento e a implementação de tecnologias voltadas à produção de hidrogênio verde. A caracterização de materiais utilizados em eletrodos e membranas para células eletroquímicas baseia-se fortemente na VC, que fornece dados sobre a eficiência e a durabilidade desses componentes. De acordo com algumas pesquisas, A integração de VC em protocolos de pesquisa acelera a inovação em tecnologias de energia limpa, promovendo soluções sustentáveis para a crise energética global (Bard; Faulkner; Wiley, 1983).

2.3.2 Curva de Polarização Linear

A técnica da curva de polarização linear consiste na aplicação de um potencial capaz de deslocar o potencial de equilíbrio (E_{eq}), que corresponde ao ponto onde as correntes anódica e catódica se igualam. Esta abordagem, possibilita a ocorrência das reações eletroquímicas, uma vez que a evolução do hidrogênio não acontece espontaneamente no potencial de equilíbrio (Shi; Zhang, 2016). A diferença entre o potencial aplicado (E) e o potencial de equilíbrio (E_{eq}) é definida como sobrepotencial (η) (Appel; Helm, 2014), como mostra na Eq. 4:

$$\eta = E - E_{eq} \quad (4)$$

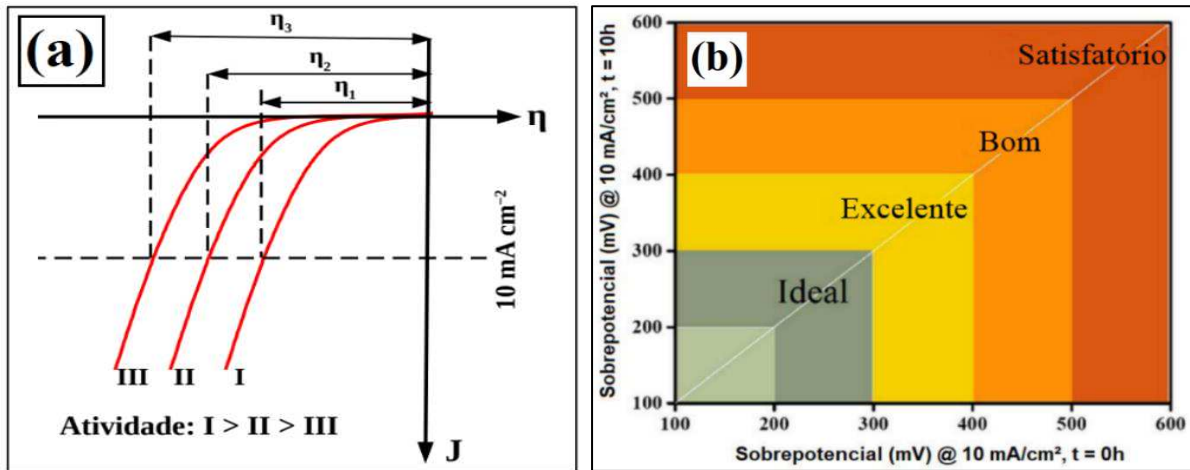
Este método é essencial para a análise do comportamento eletroquímico de sistemas, especialmente em processos de eletrólise e eletrodeposição. A produção de hidrogênio está diretamente relacionada à corrente elétrica gerada pelo eletrolisador. Entretanto, os fenômenos de polarização provocam um aumento na tensão de operacional conforme a corrente aumenta, ocasionando um consumo energético não linear, que se torna mais expressivo em altas densidades de corrente (Esposito et al., 2021).

O sobrepotencial necessário para atingir uma densidade de corrente de $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ durante pelo menos 10 horas de operação é o critério mais utilizado para classificar os desempenhos dos eletrocatalisadores (Khan et al., 2023). Tahir e colaboradores (Tahir et al., 2017) classificam os materiais eletrocatalisadores com base nos valores do sobrepotencial para a corrente fixada de $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, nas seguintes escalas:

- **Ideais:** 200 a 300 mV
- **Excelentes:** 300 a 400 mV
- **Bons:** 400 a 500 mV
- **Satisfatórios:** acima de 500 mV

Conforme representado na Fig. 7, quanto menor o valor do sobrepotencial, maior será a atividade eletrocatalítica do material.

FIGURA 7 – Curvas ilustrativas de polarização para HER em eletrocatalisadores diferentes e seus respectivos valores de sobrepotenciais (a) e Classificação dos catalisadores de HER com base no seu valor de sobre potencial (b).



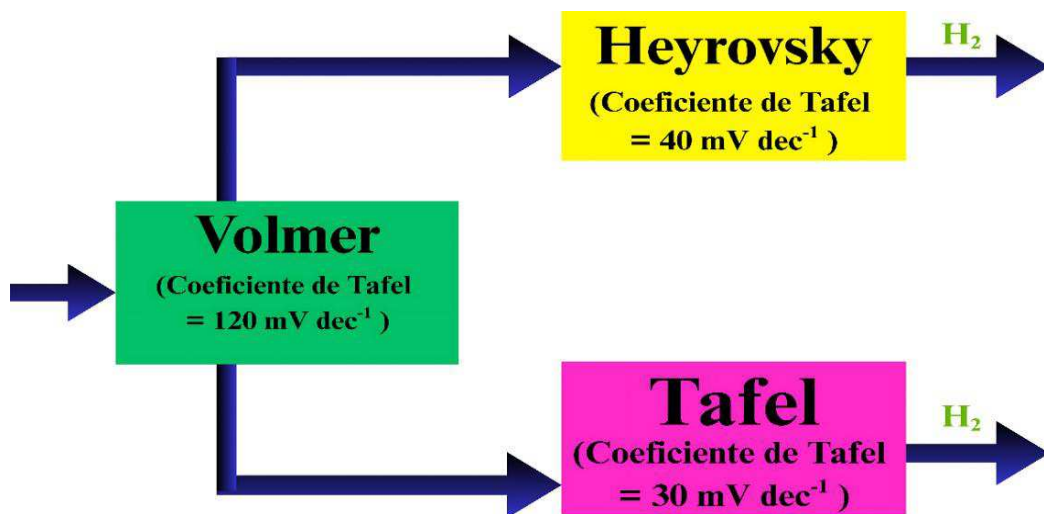
Fontes: (Tahir et al., 2017b e Zhu et al., 2020)

As análises de Tafel são um dos métodos mais empregados na HER para estudar a cinética eletroquímica e o mecanismo da reação, permitindo, assim, a comparação do desempenho eletrocatalítico de diferentes eletrocatalisadores. A inclinação da curva de Tafel é o parâmetro utilizado para identificar o mecanismo da reação de HER, além de ajudar a determinar a etapa limite da reação. Na literatura, o método mais comum para calcular as inclinações de Tafel é a construção do gráfico ($\log | \text{densidade de corrente} |$ vs. sobrepotencial) extraídos das curvas de polarização linear, e posteriormente o ajuste da parte do gráfico com a equação de Tafel (Eq. 5) (Suen et al., 2017; Murthy et al., 2017)

$$\eta = a + b \log J \quad (5)$$

em que, η é o sobrepotencial aplicado, J é a densidade de corrente medida, b é o coeficiente de Tafel e a é o intercepto da curva. a inclinação de Tafel é uma característica intrínseca do electrocatalisador em análise. Esse parâmetro é fundamental para identificar a etapa limitante da HER. Teoricamente, para os mecanismos de Volmer, Heyrovsky e Tafel, os valores das inclinações são 120, 40 e 30 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$, respectivamente (Theerthagiri et al., 2020; Wang et al., 2017; Yu et al., 2019), conforme ilustrado na Fig. 8. Um exemplo clássico dessa análise é a HER sobre a superfície de platina (Pt), onde o valor de b calculado é cerca de 20 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$, indicando um mecanismo do tipo Volmer-Tafel, com a etapa de Tafel sendo a limitante da reação de HER (Li et al., 2011). Em termos gerais, uma reação na inclinação de Tafel de m electrocatalisador investigado sugere uma cinética mais rápida para a reação de HER, o que indica que o material em questão pode ter um desempenho electrocatalítico excelente quando utilizado como electrocatalisador para a HER (Ge et al., 2020).

FIGURA 8 – Visão geral dos mecanismos de HER Volmer, Heyrovsky e Tafel com suas etapas de determinação.



Fonte: Adaptado de: (Theerthagiri et al., 2020)

2.4 Estado da Arte

2.4.1 Revestimentos de Ni aplicados à eletrólise da água

Borges (Borges, 2024), desenvolveu depósitos de níquel poroso (NiP) em substrato de níquel aplicados ao HER, utilizando diferentes densidades de corrente [-0,5; -1,0 e -2,0] $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, tempos de deposição [50, 150 e 300] s em um meio aquoso com pH de 0,3. A

caracterização morfológica indicou a formação de uma estrutura porosa uniforme, influenciada pelas condições de síntese. Entre os parâmetros testados, a melhor performance catalítica foi obtida com a densidade de corrente de $-0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, resultando em um material com maior área superficial e elevada eficiência na produção de hidrogênio. Apesar dos resultados promissores, a eletrodeposição em meio aquoso apresenta desafios ambientais, contrariando os princípios da química verde e os ODS. Nesse sentido, solventes eutéticos profundos (DES) surgem como uma alternativa sustentável, reduzindo impactos ambientais e potencialmente otimizando a estrutura e a eficiência dos eletrocatalisadores para o HER.

Elsharkawya, Hammad e El-Hallaga (Elsharkawya; Hammad; El-hallaga, 2022) investigaram filmes de níquel (Ni) sintetizados a partir de um solvente eutético profundo composto por cloreto de colina (ChCl) e etilenoglicol (EG), na razão molar de 1:3. Esse solvente, conhecido como etalina, foi mantido a uma temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até a formação de um líquido incolor. Os filmes foram avaliados como eletrocatalisadores para a reação de HER e para a reação de OER em solução aquosa de KOH 1 M. Os resultados mostraram que os depósitos de Ni fabricados a partir da etalina apresentaram ótima eficácia, demonstrando elevada eficiência catalítica para ambas as reações. Além disso, os depósitos exibiram morfologia uniforme e estabilidade, enquanto as análises de Tafel indicaram valores de inclinação compatíveis com boa cinética para os processos eletroquímicos, evidenciando o potencial da etalina como solvente para a obtenção de revestimentos metálicos eficientes.

O estudo realizado por Huang e Zhang (Huang; Zhang, 2018) investigou a eletrodeposição de revestimentos de níquel em substratos de cobre. A deposição foi conduzida em Solvente Eutético Profundo (DES) à base de cloreto de colina e ureia na razão molar de 1:2. A fonte de níquel utilizada foi o óxido de níquel (Ni_2O_3) adicionado ao DES na concentração de 50mM. As investigações eletroquímicas do comportamento de eletrodeposição do níquel foram realizadas utilizando a técnica de voltametria cíclica, com eletrodo de trabalho de cobre (Cu). O processo foi avaliado nas temperaturas de 60 , 70 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e observou-se que o potencial de pico catódico (E_{pc}) se desloca para valores mais positivos com o aumento da temperatura, indicando maior facilidade de redução do íon metálico. O estudo também demonstrou que a temperatura influencia diretamente a morfologia dos depósitos de níquel, sendo que o tamanho dos grãos metálicos aumenta gradualmente com o aumento da temperatura de reação. A $60 \text{ }^\circ\text{C}$, o depósito obtido consistiu em grãos de níquel homogêneos e aderentes, com uma superfície lisa, compacta e densa. A $70 \text{ }^\circ\text{C}$, foi obtido um depósito igualmente liso, bem aderente e com excelente uniformidade, sendo considerada pelos autores a temperatura ideal para a formação de revestimentos densos e uniformes. No entanto, os resultados obtidos a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ também

apresentaram características morfológicas altamente satisfatórias, comparáveis às observadas a 70 °C, o que reforça a eficácia dessa condição para a obtenção de revestimentos de qualidade. Já a 80 °C, os revestimentos apresentaram aparência preta e esponjosa, com formação de muitas dendritas nas bordas, o que aumentou significativamente a espessura do depósito, mas comprometeu a sua uniformidade e qualidade. Assim a partir dos resultados obtidos pelos autores, destaca-se a importância crucial do controle da temperatura no processo de eletrodeposição de níquel em DES.

2.4.2 Revestimentos de Ni-Co aprimorados para produção de Hidrogênio

As ligas de níquel-cobalto (Ni-Co), formadas por metais de transição não nobres, tem sido amplamente estudada devido às suas excelentes propriedades, como alta resistência ao desgaste, resistência mecânica, condutividade térmica e notáveis propriedades eletrocatalíticas. Em sistemas aquosos, observa-se que, mesmo com o uso de aditivos e fatores auxiliares externos, o desempenho desses revestimentos pode ser significativamente melhorado. No entanto, materiais preparados em sistemas aquosos são inevitavelmente dopados com impurezas, e o custo e a complexidade do processo de eletrodeposição podem ser aumentados (Lokhande; Bagi, 2014)

Em um estudo de Li e colaboradores (Li et al., 2020) a preparação de ligas de Ni-Co utilizando DESs foi amplamente investigada. Nesse trabalho, os pesquisadores usaram uma mistura de cloreto de colina e etilenoglicol, controlando precisamente o potencial de deposição. A análise do comportamento eletroquímico realizada por voltametria cíclica, revelou que o pico de redução ocorre entre $-0,6$ V e $-1,13$ V, correspondendo à co-deposição de Ni e Co. O controle do potencial de deposição foi fundamental para ajustar a composição da liga, permitindo a modulação do teor de cobalto e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas, como dureza e resistência. Além disso, foi observado que a microestrutura das ligas podia ser controlada, influenciando diretamente as propriedades de desempenho e ampliando seu potencial para aplicações em catalisadores e dispositivos de alto desempenho.

Em um estudo subsequente, Li e colaboradores (Li et al., 2021) exploraram o uso de cloreto de colina e ureia como DES para a eletrodeposição de Ni-Co na proporção molar de 1:2 a uma temperatura de 70 °C. Os resultados indicaram que a ureia complexava os íons metálicos de Ni e Co, e a voltametria cíclica revelou que a região de redução da liga ocorria entre $-0,6$ V e $-1,2$ V. A análise do comportamento eletroquímico mostrou que a composição da liga e a morfologia das partículas eram fortemente influenciadas pela proporção de cobalto. O estudo

também destacou que as reações de oxidação e redução no sistema são irreversíveis, sugerindo um processo de eletrodeposição controlado e altamente eficiente. Esse trabalho demonstrou que a eletrodeposição de ligas de Ni-Co em DES oferece uma abordagem sustentável e controlada, com grande potencial para aplicações em catalisadores para a reação de desprendimento do hidrogênio, e revestimentos protetores e dispositivos eletroquímicos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Investigar o comportamento eletrocatalítico de revestimentos de Ni e Ni-Co sintetizados por eletrodeposição usando solvestes eutéticos a base de cloreto de colina e ureia.

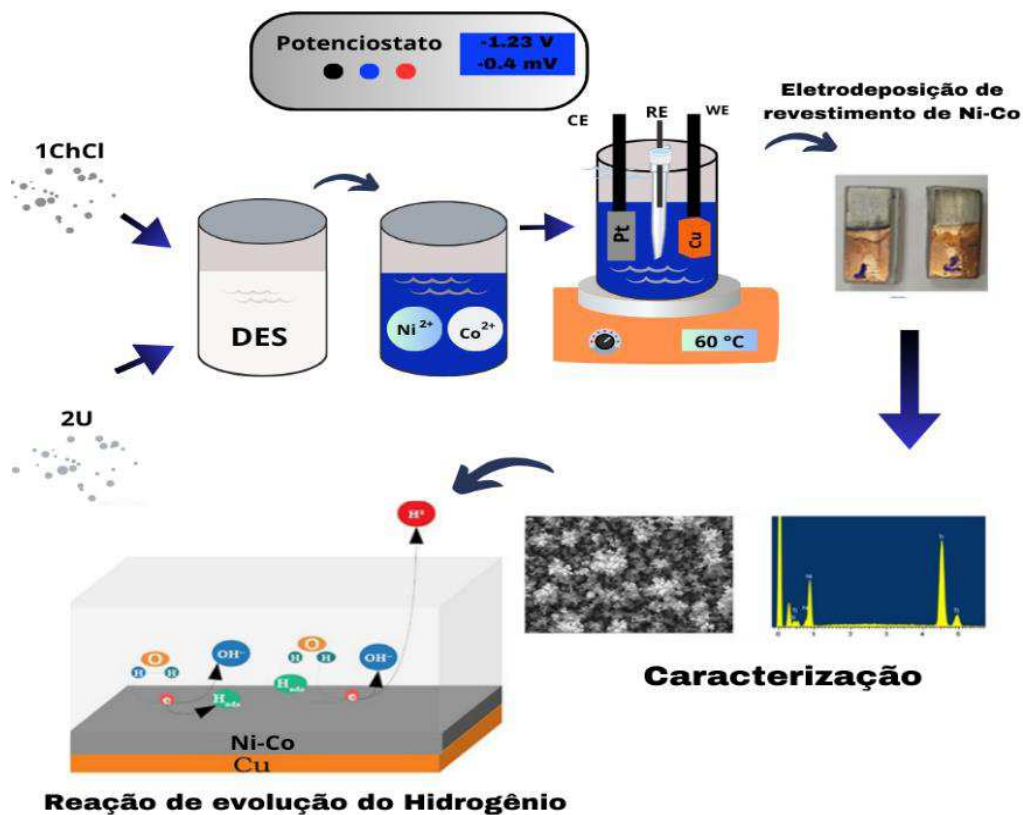
3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Sintetizar revestimentos eletrocatalíticos de Ni e Ni-Co sobre eletrodo de cobre através da eletrodeposição a partir de solventes eutéticos profundos;
- ✓ Estudar o comportamento eletroquímico das espécies de Ni^{2+} e Co^{2+} em eletrodos de cobre imersos em solvente eutético profundo a 60°C
- ✓ Realizar a caracterização morfológica química e física dos revestimentos de Ni e Ni-Co;
- ✓ Avaliar o comportamento eletrocatalítico dos revestimentos em solução de KOH 1M;

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho experimental, com abordagem quali-quantitativa, foi desenvolvido no Laboratório de Física Aplicada a Energias Renováveis (LFAER/UEMA – Campus Caxias). Inicialmente, realizou-se um estudo bibliográfico sobre revestimentos de Ni e Ni-Co. A Figura 9 apresenta as etapas do estudo, incluindo preparação do eletrólito, eletrodeposição, caracterizações e testes eletroquímicos. As análises morfológicas e composicionais foram feitas por MEV e EDS na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O MEV permite observar a morfologia da superfície, enquanto o EDS identifica os elementos presentes. Essas técnicas são essenciais para avaliar a qualidade dos revestimentos e sua relação com o desempenho eletroquímico. a microestrutura com o desempenho nos testes de evolução do hidrogênio.

FIGURA 9 – Resumo Gráfico da metodologia seguida durante o processo de eletrodeposição e caracterização dos revestimentos.

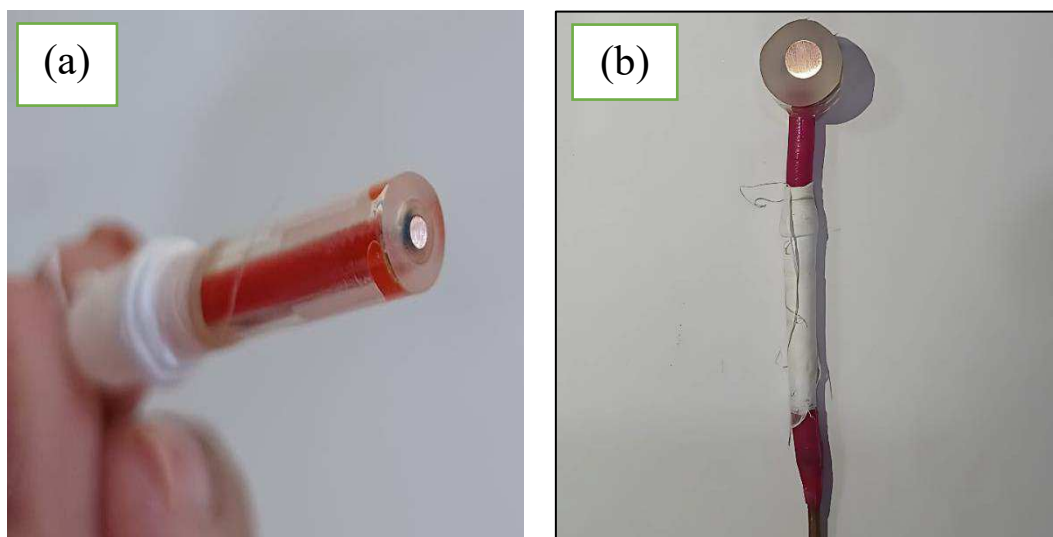


Fonte: O Próprio Autor, 2025

4.1 Preparação de eletrodos e soluções

Inicialmente, para os experimentos de voltametria cíclica, utilizou-se um eletrodo de cobre cilíndrico, com área de $0,02 \text{ cm}^2$, isolado com resina acrílica e lixado com granulometria 600 mesh para garantir uma superfície adequada. A Fig. 10a ilustra esse eletrodo. Posteriormente, para a eletrodeposição, foram confeccionados eletrodos de cobre (Cu) com área exposta de $0,1777 \text{ cm}^2$, também isolados com resina acrílica, conforme mostrado na Fig. 10b. O polimento foi feito com lixas de diferentes granulometrias (200, 300, 400, 600 e 1200 mesh), e a Fig. 10b também ilustra o eletrodo de cobre antes do processo de eletrodeposição, ainda sem revestimento.

FIGURA 10 – Ilustração do eletrodo de cobre para o experimento de voltametria cíclica (a) e para o processo de eletrodeposição (b).

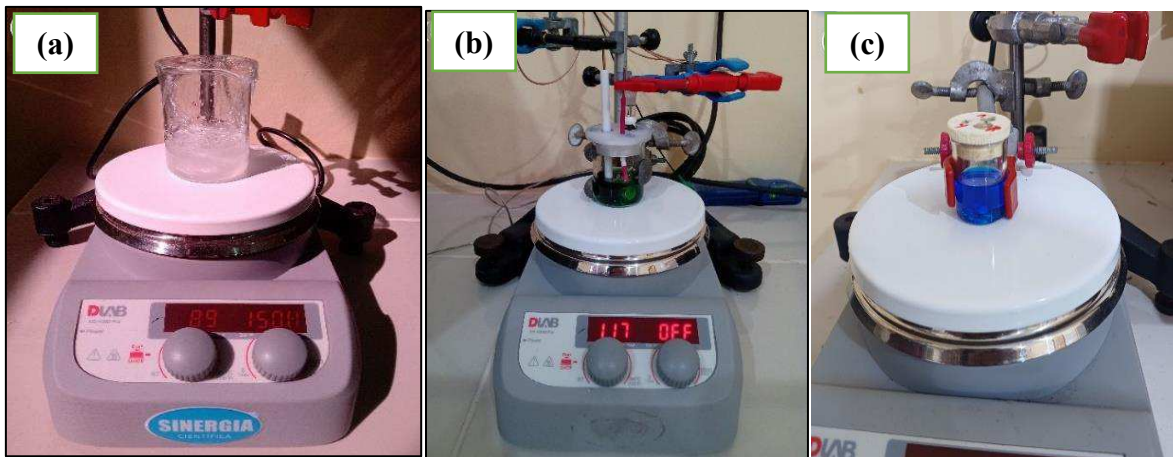


Fonte: O Próprio Autor, 2025

Os reagentes cloreto de colina (ChCl PA) e ureia (U PA) foram utilizados para preparação do DES e o mesmo foi sintetizado conforme proposta por Abbott e colaboradores (Smith; Abbott; Ryder, 2014). Desta forma, foi adicionado em um béquer de 20 ml uma mistura dos dois componentes na razão molar de 1 para 2 (1ChCl:2U), logo em seguida a mistura foi colocada em uma chapa aquecedora em $60 \text{ }^\circ\text{C}$ com agitação magnética até a mistura adquirir uma característica líquida e incolor como ilustra a Fig. 11a. Este DES também é muito conhecido por relina. O eletrólito para obtenção dos revestimentos de Ni foi preparado adicionando $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NiCl_2 a solução de relina, sendo então levados a cuba ultrassônica

para dispersão e solubilização dos sais metálicos até obter uma mistura com a coloração esverdeada como mostra a Fig. 11b. Para a obtenção dos revestimentos de Ni-Co foram preparados eletrólitos adicionado $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NiCl_2 + $[0,08; 0,04; 0,02; 0,01] \text{ mol L}^{-1}$ de CoCl_2 em 1ChCl:2U até formar uma solução com uma coloração azul marinho mostra na Fig. 11c.

FIGURA 11– Ilustração do preparo das soluções eletrolíticas: (a) O DES à base de cloreto de colina e ureia, (b) DES com NiCl_2 dissolvido e (c) DES com CoCl_2 e NiCl_2 dissolvidos

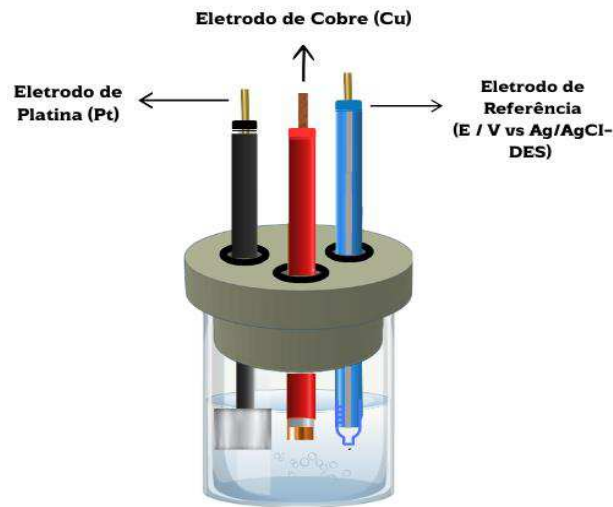


Fonte: O Próprio Autor, 2025

4.2 Caracterizações eletroquímica dos revestimentos de Ni e Ni-Co

Um estudo prévio do comportamento eletroquímico das espécies de Ni^{2+} foi realizado com banho contendo $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ de NiCl_2 , já para o comportamento eletroquímico das espécies Co^{2+} foi utilizado uma solução contendo $0,04 \text{ mol L}^{-1}$ de CoCl_2 em DES, na temperatura de 60°C e foi aplicada a técnica de Voltametria Cíclica obtida com o auxílio de um potenciostato PGSTAT (Metrohm Chemie®). O sistema eletroquímico foi composto por um eletrodo de trabalho de cobre ($0,02 \text{ cm}^2$), um contra eletrodo de platina (99.5%) com área de 1 cm^2 e um eletrodo de referência de $\text{Ag}_{(s)}/\text{AgCl}_{(s)}$ imerso em 1ChCl:2U, todos montados em uma cela eletroquímica de 10ml como ilustrado na Fig. 12. A aquisição de dados foi feita pelo software NOVA versão 2.1.3 que controlou o potenciostato. Já A Tab. 1 mostra a nomenclatura das soluções de eletrodeposição conforme sua concentração específica, a relação entre as espécies envolvidas no eletrólito.

FIGURA 12 – Esquema representativo da disposição dos eletrodos em uma célula eletroquímica.



Fonte: O próprio autor, 2025

TABELA 1 – Composição química das soluções de eletrodeposição, relação entre as espécies de $[\text{Ni}^{2+} / \text{Co}^{2+}]$, potencial de eletrodeposição, a carga aplicada para ambos e nomenclatura de cada banho.

BANHOS	CONCENTRAÇÃO (mol L ⁻¹)		RAZÃO (Ni ²⁺ /Co ²⁺)
	NiCl ₂	CoCl ₂	
I	0,2	-	-
II	-	0,04	-
III	0,2	0,01	20
IV	0,2	0,02	10
V	0,2	0,04	5
VI	0,2	0,08	2,5

Fonte: Dados da pesquisa, 2025

4.3 Eletrodeposição e Caracterização morfológica e Química dos revestimentos

O revestimento ilustrado na Fig. 13 apresenta o eletrodo de cobre (área de 0,1777 cm²) após o processo de eletrodeposição. Para todos os banhos utilizados, observou-se que a superfície eletrodepositada apresentou aspecto semelhante, após a aplicação de um potencial previamente determinado por voltametria cíclica. Independentemente das composições dos

banhos, os eletrodos obtidos em diferentes experimentos exibiram características visuais similares.

FIGURA 13 – Esquema representativo da disposição dos eletrodos em uma célula eletroquímica.



Fonte: O Próprio Autor, 2025

Além do mais, a carga de -1,26 C determinada pela lei de Faraday (equação 6) foi aplicada em todos os experimentos para obtenção de camadas com espessura teórica de 1 μm .

$$Q_{(d)} = \int i \cdot dt = F\rho Ae/E \quad (6)$$

Na equação 6, $Q_{(d)}$ é a carga aplicada (C) para a eletrodeposição do revestimento, i é a corrente elétrica (A), t é o tempo (s), ρ é a densidade média da liga, A é a área do eletrodo (cm^2), e representa a espessura do eletrodo (μm) e E é o equivalente químico médio (g/Mol^{-1}) dos íons de Ni^{2+} e Co^{2+} . As morfologias das camadas obtidas foram caracterizadas com auxílio MEV modelo TESCAR MIRA-FEG, e a composição química foi determinada por EDS acoplada ao MEV.

4.4 Testes de Eletrocatalise

Após a obtenção dos experimentos de eletrodeposição dos revestimentos Ni-Co, os eletrodos foram conduzidos aos testes de eletrocatalise utilizando uma célula eletroquímica convencional de vidro com três eletrodos, a temperatura de 23 °C, o eletrólito utilizado foi uma solução alcalina de K(OH) a 1M. Para o eletrodo de referência, foi utilizado Hg/HgO/OH⁻ (1

mol L⁻¹) e como contra eletrodo foi usado uma placa de Pt (1 cm²). Os dados cinéticos da HER foram obtidos através da aplicação da técnica de voltametria linear com uma taxa de varredura de 1mV s⁻¹. Baseando-se a partir das curvas obtidas, os gráficos de Tafel foram elaborados para a análise dos parâmetros cinéticos. Para fins de comparação com a literatura, todos os valores de potenciais foram apresentados em função do eletrodo reversível de hidrogênio (Padrão) e a conversão do potencial foi feita de acordo com a equação 7.

$$E (\text{vs HER}) = E (\text{vs Hg/HgO}) + 0,095 + 0,0591\text{pH} \quad (7)$$

Onde E (vs Hg/HgO) é o potencial medido para evolução de hidrogênio nas condições de teste; E (vs HER) é o potencial obtido em relação ao eletrodo Hg/HgO (1M KOH) E o pH é o potencial de hidrogênio do eletrodo do experimento, que foi medido como 13,8.

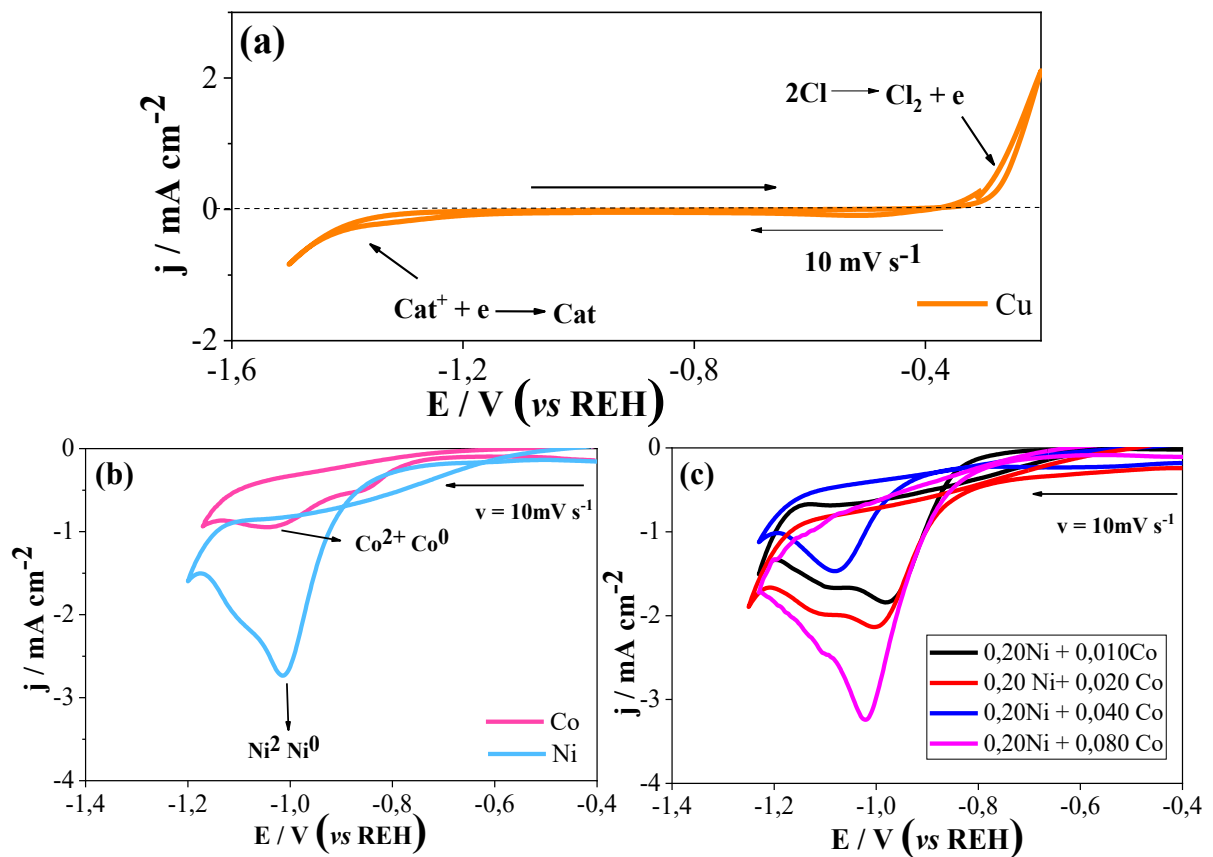
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos durante o trabalho experimental, incluindo análises por voltametria cíclica, MEV, espectroscopia de EDS, curvas de polarização e diagramas de Tafel.

5.1 Caracterização eletroquímica e eletrodeposição dos revestimentos

A caracterização eletroquímica iniciou com a investigação das possíveis reações entre o solvente eutético profundo (1ChCl:2U) e a superfície do eletrodo de cobre, sem adição de sais metálicos, a uma temperatura de 60°C.

FIGURA 14 – Voltamogramas cíclicos relativo ao substrato de cobre em meio de 1ChCl:2U na temperatura de 60 °C (a), do eletrólito contendo 1ChCl:2U + 0,20 mol L⁻¹ de NiCl₂ (azul claro) e 1ChCl:2U + 0,04 CoCl₂ (rosa), (b) e Eletrólito contendo 1ChCl:2U + 0,20 mol L⁻¹ + [0,01;0,02;0,04 e 0,08] mol L⁻¹ (c).



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

Desta forma, foi aplicado a técnica de voltametria cíclica no intervalo de -0,1 a -1,5 V a uma velocidade de varredura de 10 mV s^{-1} como ilustra a Fig. 14a. Neste gráfico, observa-se que, entre os potenciais de -0,3 V e -1,2 V, não há sinal de corrente, indicando que, nesse intervalo, não ocorrem reações eletroquímicas. Esse intervalo é caracterizado como a “janela eletroquímica de trabalho” (Oliveira, 2021). Ao expandir a varredura para potenciais mais negativos, observa-se um aumento na densidade de corrente catódica, atribuído à redução dos íons colina (Ch^+) presentes no meio. Além disso, é perceptível um segundo aumento de corrente a partir de aproximadamente em -0,4 V, o qual está associado à oxidação dos íons cloreto (Cl^-), resultando na formação de gás cloro (Cl_2), conforme discutido por Abbott et al. (Abbott et al., 2015).

A seguir, para avaliar os potenciais de redução das espécies de Ni^{2+} e Co^{2+} , experimentos voltamétricos foram realizados com íons Ni^{2+} e Co^{2+} dissolvidos em 1ChCl:2U separadamente (Fig. 14b). O voltamograma azul claro indica que a redução eletroquímica das espécies de $\text{Ni}_{(aq)}^{2+}$ para $\text{Ni}_{(s)}^0$ ocorre a um potencial em torno de -1,07 V, com transferência de dois elétrons (Qadr et al., 2023). Por outro lado, o voltamograma rosa (Fig. 14b) mostra um pico de corrente em torno de -1,1 V, sendo atribuído a redução das espécies de $\text{Co}_{(aq)}^{2+}$ para $\text{Co}_{(s)}^0$ ocorrendo com transferência simultânea de dois elétrons (Serrà et al., 2021).

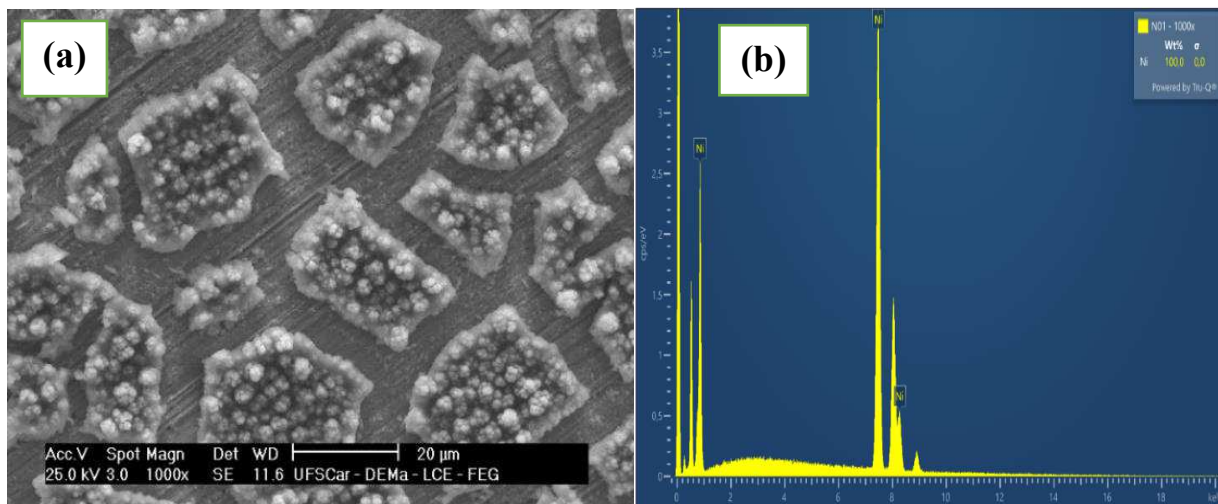
Por fim, a Fig. 14c mostra o perfil voltamétrico dos eletrólitos contendo sais de NiCl_2 e CoCl_2 dissolvidos em 1ChCl:2U. As voltametrias apresentam uma varredura catódica com picos de redução das espécies de Ni^{2+} e Co^{2+} para Ni e Co metálicos, ambos com transferência de dois elétrons em uma única etapa. Os potenciais médios observados para a redução das espécies metálicas foram aproximadamente: -1,1V (banho III), -1,2 V (banho IV), -1,08V (banho V) e -1,02V (banho VI). É importante observar, que estes potenciais foram utilizados para a eletrodeposição dos revestimentos de Ni e de Ni-Co em cada condição.

5.2 Caracterização morfológica e química e física

A Fig. 15a apresenta a micrografia com ampliação de 1000X para a camada de Ni eletrodepositada sobre eletrodos de cobre obtidos com o banho I (Tab. 2) a uma temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Desta forma, observa-se uma morfologia descontínua, caracterizada pela presença de colônias bem definidas, com superfície trincada e rugosa, disposta de maneira isolada, semelhante a “ilhas” distribuídas sobre o substrato. Esse tipo de formação é típico de filmes metálicos em estágios iniciais de crescimento, lembrando a fratura do leito de um lago seco. Tal

morfologia também é compatível com os padrões descritos na literatura para revestimento de níquel, conforme observado por Urcezino (Urcezino et al., 2016). Já a Fig. 15b mostra a análise química realizada por EDS da superfície revestida. O espectro evidencia picos intensos atribuídos ao níquel, confirmando a deposição da camada metálica. Esta amostra foi designada como Ni₁₀₀.

FIGURA 15 – Imagem MEV com ampliação 1.000X dos revestimentos de Ni eletrodepositados a partir do banho I (a) e EDS da superfície do revestimento Ni₁₀₀ eletrodepositado sobre eletrodos de cobre (Cu) em 60 °C (b).



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

A Fig. 16a revela a morfologia superficial do revestimento obtido a partir do banho III, com ampliação de 1000X. Observa-se uma camada formada por aglomerados metálicos alinhados paralelamente, com distribuição uniforme em toda a superfície. Essa organização em forma de cordões indica que a eletrodeposição ocorreu de maneira eficiente, resultando em uma cobertura contínua, aderente e sem falhas visíveis.

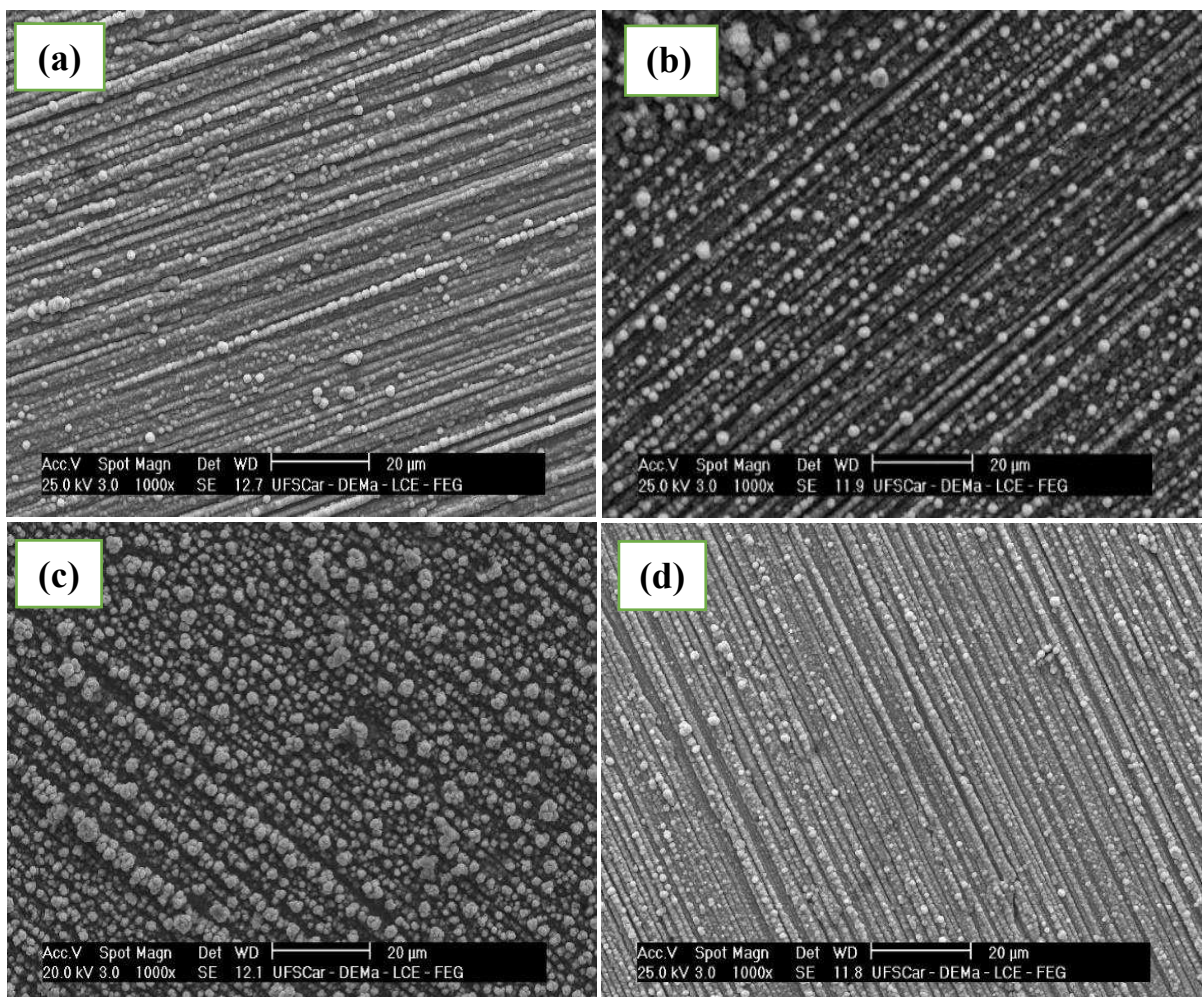
A Fig. 16b revela o aspecto morfológico da amostra eletrodepositada a partir do banho IV. A superfície apresenta uma estrutura semelhante a observada na Fig. 16a, porém com um aumento no tamanho dos aglomerados metálicos. Esse crescimento pode estar relacionado ao maior teor de cobalto no banho, influenciando o processo de nucleação e crescimento durante a deposição.

A Fig. 16c revela uma superfície mais densamente recoberta por partículas metálicas, resultante do banho V. As partículas apresentam tamanhos variados e distribuição aleatória sobre a camada, sugerindo um aumento da rugosidade e, conseqüentemente, da área

eletroquimicamente ativa, aspecto favorável para a aplicação desses revestimentos como catalisadores na HER.

A Fig. 16d revela uma camada compacta, espessa e homogênea, correspondente ao revestimento obtido com o banho VI. As partículas metálicas estão finamente distribuídas e praticamente ocultam as linhas do substrato, evidenciando uma deposição densa e bem formada, semelhante à observada nos revestimentos do banho III. O aumento na concentração de íons Co^{2+} contribuiu para a formação de um depósito mais uniforme e espesso, com potencial aprimorado para aplicações eletrocatalíticas.

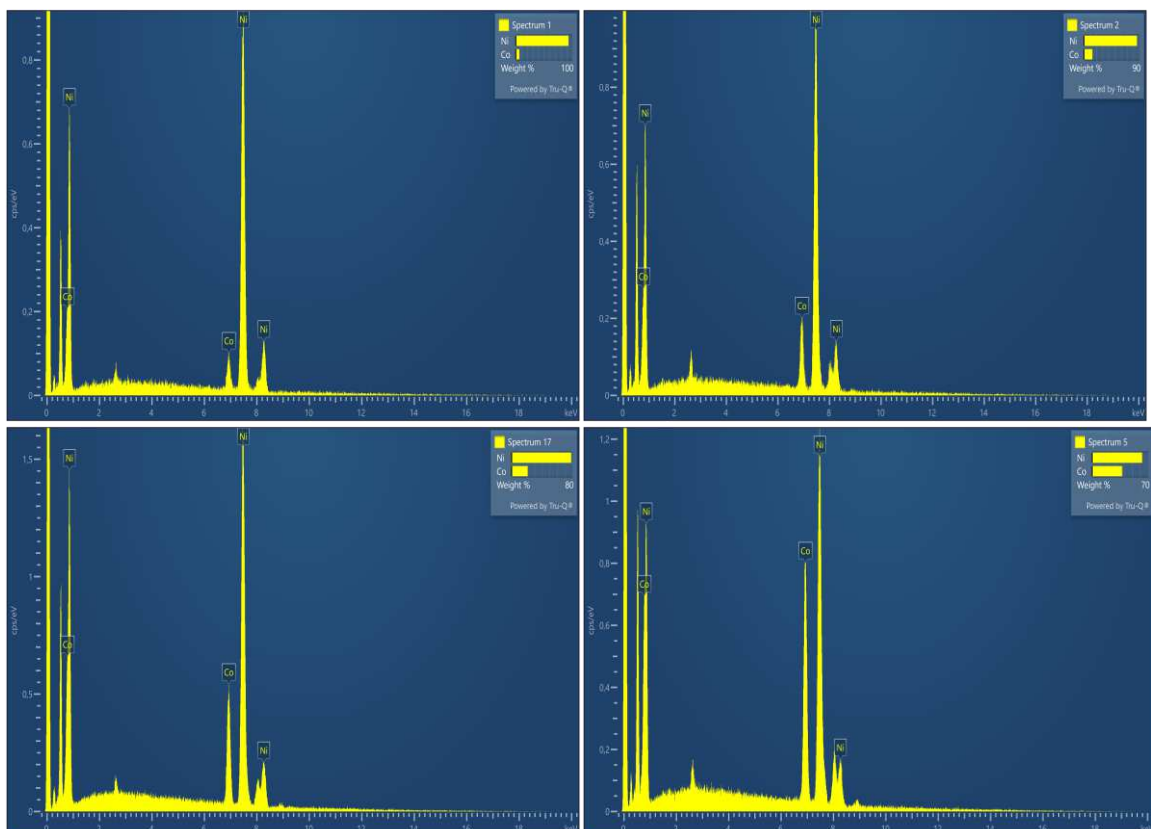
FIGURA 16 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000X, referente aos revestimentos de Ni-Co eletrodepositados a partir dos banhos III, IV, V e VI à 60°C.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

A Figura 17 apresenta os espectros de EDS dos revestimentos obtidos a partir dos banhos III, IV, V e VI, correspondentes às Figuras (a), (b), (c) e (d), respectivamente. Os espectros revelam que os picos de Ni mantêm-se com alta intensidade em todas as amostras, confirmando que o níquel continua sendo o elemento predominante nos revestimentos, mesmo com o aumento da concentração de Co. Observa-se também um crescimento gradual na intensidade dos picos de Co, indicando maior incorporação desse elemento nas camadas metálicas — comportamento associado ao aumento da concentração de íons Co^{2+} nas soluções eletrolíticas. Com base na composição atômica determinada, as amostras foram nomeadas como $\text{Ni}_{93}\text{Co}_7$, $\text{Ni}_{86}\text{Co}_{14}$, $\text{Ni}_{78}\text{Co}_{22}$ e $\text{Ni}_{62}\text{Co}_{38}$, refletindo a variação na proporção de Ni e Co. Esses resultados confirmam a eficiência do método eletroquímico utilizado na formação de ligas Ni–Co com composições controláveis, importantes para aplicações específicas.

FIGURA 17 – EDS dos revestimentos obtidos a partir dos banhos III, IV, V e VI, indicando a incorporação crescente de cobalto no decorrer da sequência.

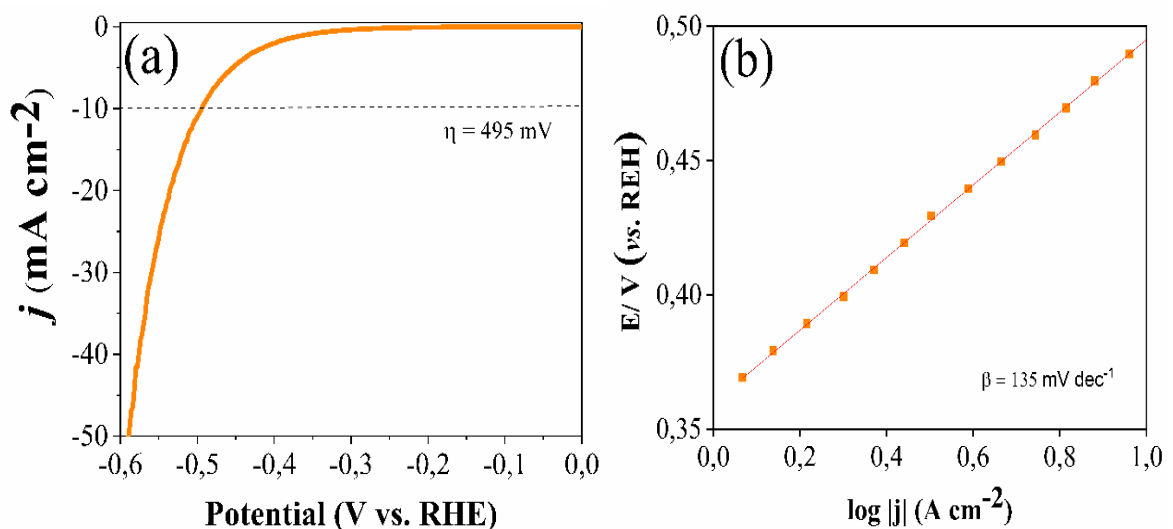


Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

5.3 Testes de Eletrocatalise

A Fig. 18 representa a curva de polarização da amostra de cobre (Cu) ensaiadas em solução alcalina de K (OH) 1M à temperatura de 23 °C. Para essa amostra, bem como para as demais, tiveram seus desempenhos eletrocatalíticos avaliados com base no sobrepotencial (η_{10}) necessário para atingir a densidade de corrente de $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Desta forma, a Fig. 18a apresenta os dados de polarização linear para o substrato de cobre (Cu), nos quais se observa que um sobrepotencial (η_{10}) de aproximadamente $495 \pm 1 \text{ mV}$. Esse valor está de acordo com o comportamento esperado para materiais não nobres, como o Cu, e é bastante próximo ao sobrepotencial ($465,5 \pm 1 \text{ mV}$) relatado por Gomes (Gomes, 2022) para as mesmas condições. Já a Fig. 18b mostra a curva de Tafel ($\log |j|$ vs E) obtida para o mesmo substrato. Os dados experimentais revelam uma inclinação superior a $120 \text{ mV}\cdot\text{dec}^{-1}$, indicando que, sob essas condições, a etapa determinante da reação de formação do hidrogênio é a adsorção do próton sobre a superfície do eletrodo, conhecida como etapa de Volmer.

FIGURA 18 – Comportamento eletroquímico do substrato de cobre em relina: curva de polarização linear (a) e curva de Tafel (b).

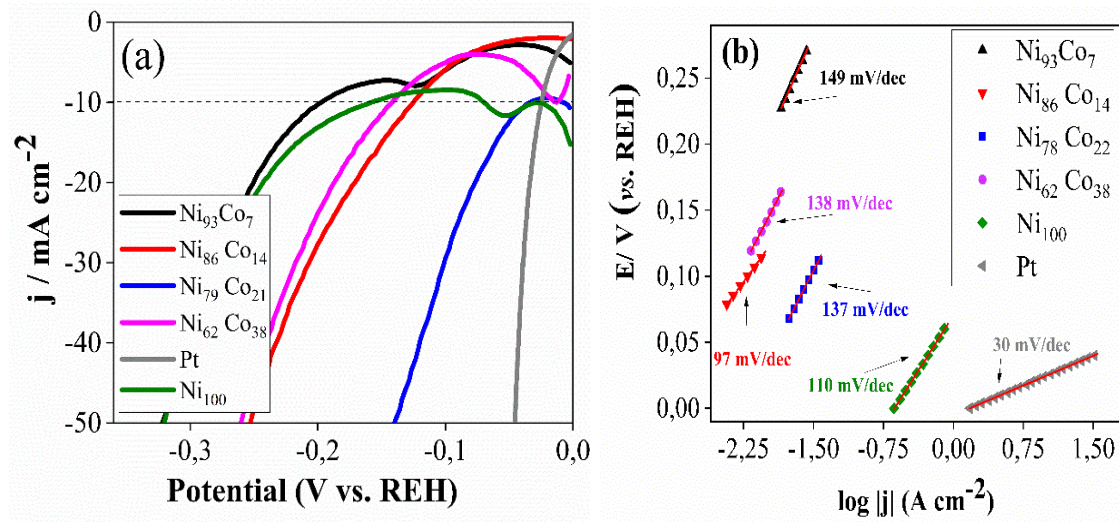


Fonte: Dados da pesquisa, 2025

A Fig. 19a apresenta as curvas de polarização obtidas para os revestimentos de Ni_{100} , $\text{Ni}_{93}\text{Co}_7$, $\text{Ni}_{86}\text{Co}_{14}$, $\text{Ni}_{79}\text{Co}_{21}$ e $\text{Ni}_{62}\text{Co}_{38}$, cujos parâmetros eletrocatalíticos encontram-se na Tab. 2. A análise foi baseada no sobrepotencial (η_{10}) necessário para atingir a densidade de corrente

de $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, parâmetro amplamente utilizado na literatura para avaliar a eficiência de catalisadores na reação de evolução de hidrogênio (HER).

FIGURA 19 – Curvas de Polarização Linear dos revestimentos de Ni (linha verde) e Ni-Co nas diferentes concentrações (a), Gráficos de Tafel das curvas de eletrocatalise (b).



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

TABELA 2 – Média dos Parâmetros eletrocatalíticos do substrato de Cu, revestimentos Ni_{100} , $\text{Ni}_{93}\text{Co}_7$, $\text{Ni}_{86}\text{Co}_{14}$, $\text{Ni}_{79}\text{Co}_{21}$ e $\text{Ni}_{62}\text{Co}_{38}$ em solução aquosa de KOH 1M.

Amostra	η (mV) em 10 mA cm^{-2}	β / mV dec^{-1}	Classificação	Referências
Cu	495 ± 1	135 ± 1	Satisfatório	Esta pesquisa
Ni_{100}	175 ± 10	$110 \pm 5,5$	Mais que ideal	Esta pesquisa
$\text{Ni}_{93}\text{Co}_7$	180 ± 8	$140 \pm 9,4$	Mais que ideal	Esta pesquisa
$\text{Ni}_{86}\text{Co}_{14}$	115 ± 9	$97 \pm 5,4$	Mais que ideal	Esta pesquisa
$\text{Ni}_{79}\text{Co}_{21}$	45 ± 8	137 ± 10	Mais que ideal	Esta pesquisa
$\text{Ni}_{62}\text{Co}_{38}$	127 ± 9	138 ± 8	Mais que ideal	Esta pesquisa
Pt/C	24 ± 1	30	Mais que ideal	Esta pesquisa

Fonte: Dados da pesquisa, 2025

Analisando os dados obtidos a partir da amostra de Ni₁₀₀ (curva verde), observa-se que o sobrepotencial (η_{10}) foi de 175 ± 10 mV para atingir a densidade de 10 mA cm^{-2} , um valor significativamente inferior ao observado para o cobre (495 ± 1 mV). Esse resultado indica que o revestimento de níquel puro foi aproximadamente 2,8 vezes mais eficiente do que o cobre como catalisador para a reação de evolução de hidrogênio (HER). A redução expressiva do sobrepotencial evidencia que a adição de níquel ao substrato possibilitou obter um material com maior atividade catalítica.

Um estudo recente de Wang e colaboradores (Wang et al., 2018), investigou o comportamento eletrocatalítico de camadas de níquel nanoestruturadas sobre um eletrodo de cobre. A síntese foi realizada utilizando o mesmo solvente à base de cloreto de colina e ureia (1ChCl:2U) a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, com a eletrodeposição ocorrendo em diferentes potenciais (de $-0,6$ a $-0,9$ V). Os resultados mostraram que, para o revestimento mais catalítico, obtido a $-0,6$ V, o η_{10} foi de 199 mV. Quando comparados aos resultados desta pesquisa, percebe-se que, com o aumento da temperatura, o valor do sobrepotencial tende a diminuir. Isso evidencia que temperaturas mais elevadas, como $60 \text{ }^\circ\text{C}$, favorecem a cinética da reação, resultando em um desempenho eletrocatalítico superior com relatos de até 13% de melhoria. Portanto, embora os experimentos deste trabalho tenham sido conduzidos à temperatura ambiente, é possível inferir que o desempenho do revestimento de níquel poderia ser ainda mais eficiente sob condições térmicas elevadas.

Para esta pesquisa, a adição de cobalto nas camadas de Ni resultou em um aumento significativo no desempenho eletrocatalítico, com o melhor desempenho observado para um teor de 21% de cobalto, apresentando um sobrepotencial de 45 ± 8 mV, que chega a ser até quatro vezes mais catalítico do que o revestimento de Níquel puro (Ni₁₀₀). No entanto, quando a concentração de cobalto (Co) no revestimento ultrapassa 21%, o sobrepotencial aumenta para 127 ± 9 mV, o que resulta em uma redução da atividade eletrocatalítica para as reações de evolução de hidrogênio.

Wang e colaboradores (Wang et al., 2021) investigaram a atividade catalítica de revestimentos porosos de ligas Ni-Co obtidos por galvanoplastia em meio alcalino de KOH 1M, empregando em substrato de cobre. Os autores relataram que o revestimento apresentou um sobrepotencial de 54 mV para atingir a densidade de corrente de 10 mA cm^{-2} , valor considerado mais do que ideais segundo os critérios da literatura (Tahir et al., 2017b). A galvanoplastia é uma técnica baseada na aplicação de corrente constante, o que pode influenciar a morfologia dos depósitos e sua adesão ao substrato. Apesar do bom desempenho obtido, o valor de η_{10} ainda é superior ao alcançado neste trabalho para a amostra Ni₇₉Co₂₁ ($\eta_{10} = 45 \pm 8$ mV),

evidenciando que o método de eletrodeposição potenciostática utilizado em solução de cloreto de colina e ureia (relina) pode resultar em revestimentos mais eficientes para a HER. De forma semelhante, Hu e Wang (Hu; Wang, 2024) utilizaram a técnica de eletrodeposição galvanostática para a obtenção de revestimentos de Ni-Co a partir de solventes eutéticos profundos compostos por serina, também avaliando a atividade catalítica em meio de KOH 1M. O substrato empregado foi o cobre, semelhante ao utilizado neste estudo, permitindo uma comparação direta. O revestimento obtido apresentou um sobrepotencial de 62 mV para HER, valor considerado excelente, porém ainda acima do melhor resultado alcançado neste trabalho. A amostra Ni₇₉Co₂₁, obtida via eletrodeposição potenciostática em relina a 60 °C, demonstrou um sobrepotencial inferior (45 ± 8 mV), com estrutura densa e morfologia homogênea, além de uma boa adesão, como evidenciado nas imagens de MEV. Isso reforça que o uso de DES e a aplicação de potenciais controlados resultam em melhores propriedades eletrocatalíticas quando comparados a outros métodos comumente utilizados na literatura.

Os dados das curvas de polarização referentes ao eletrodo de platina (curva cinza) exibiram um η_{10} de 24 mV e uma inclinação de Tafel (β) de $30 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$. Apesar de a platina apresentar desempenho superior, a amostra Ni₇₉-Co₂₁ atingiu um η_{10} de 45 ± 8 mV, o que representa um valor apenas 1,9 vezes maior. Tal desempenho evidencia que os revestimentos de Ni-Co são catalisadores altamente ativos e economicamente mais viáveis que os materiais à base de metais nobres.

A Fig. 19b apresenta as curvas de Tafel com ajuste linear, conforme descrito pela equação 5. Os valores de inclinação (β), extraídos da Tab. 2 para as amostras Ni₁₀₀, Ni₉₃Co₇, Ni₈₆Co₁₄, Ni₇₉Co₂₁ e Ni₆₂Co₃₈, indicam que o mecanismo predominante da HER é governado pela etapa de adsorção do próton na superfície do eletrodo, também conhecida como etapa de Volmer, característica de sistemas com inclinações próximas a $120 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$. Em contraste, o eletrodo de platina apresentou uma inclinação de apenas $30 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$, valor típico da etapa de recombinação de hidrogênio (etapa de Tafel), o que evidencia sua maior eficiência catalítica.

Os resultados indicaram que os revestimentos de Ni₇₉Co₂₁ apresentaram desempenho superior em relação às demais amostras. Embora o desempenho da platina seja ligeiramente melhor, com um sobrepotencial de 24 mV, o Ni₇₉Co₂₁ obteve um valor próximo de 45 ± 8 mV. Isso demonstra que, apesar da platina ser mais eficiente, o Ni₇₉Co₂₁ se destaca como uma alternativa viável e de baixo custo, mantendo um desempenho competitivo. Esses resultados sugerem que Ni-Co pode ser uma opção promissora, especialmente em termos de sustentabilidade, para eletrocatalise e outras aplicações de energia limpa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou a viabilidade da utilização de DES na síntese de revestimentos metálicos de Ni e Ni-Co por eletrodeposição, aplicados como catalisadores para a HER. Os testes eletroquímicos revelaram que a introdução de cobalto nos revestimentos de níquel influencia diretamente sua morfologia, composição e eficiência catalítica. Entre as amostras analisadas, o revestimento Ni₇₉Co₂₁ se destacou com o menor sobrepotencial ($\eta_{10} = 45 \pm 8$ mV), superando inclusive os valores reportados na literatura para métodos semelhantes. Além disso, os resultados de MEV e EDS confirmaram a formação de camadas metálicas homogêneas, compactas e com incorporação crescente de cobalto conforme o aumento de sua concentração no eletrólito. A escolha da temperatura de 60 °C para os estudos comparativos foi baseada em trabalhos anteriores, que demonstraram melhor desempenho catalítico em DES sob aquecimento, como forma de favorecer a cinética da HER. Comparativamente à platina, referência convencional em eletrocatalise, os revestimentos Ni-Co demonstraram excelente desempenho e com custo consideravelmente reduzido. Isso torna os materiais desenvolvidos neste estudo alternativas promissoras para a substituição de metais nobres em tecnologias de produção de hidrogênio verde. Por fim, este trabalho contribui significativamente para o avanço de materiais sustentáveis e eficientes, ao apresentar revestimentos com desempenho superior aos existentes na literatura em condições similares. Os resultados obtidos alinham-se às metas de descarbonização, inovação tecnológica e transição energética estabelecidas pelos ODS.

REFERÊNCIA

ABBOTT, Andrew P. *et al.* A Comparative Study of Nickel Electrodeposition Using Deep Eutectic Solvents and Aqueous Solutions. **Electrochimica Acta**, v. 176, p. 718–726, set. 2015.

AL RADADI, Rasha Muneer; IBRAHIM, Magdy Ahmed Mahmoud. Nickel-cobalt alloy coatings prepared by electrodeposition Part I: Cathodic current efficiency, alloy composition, polarization behavior and throwing power. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 37, n. 9, p. 1599–1608, 30 set. 2020.

AL-ENAZI, Ahad *et al.* A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. **Energy Reports**, v. 7, p. 1962–1985, nov. 2021.

APPEL, Aaron M.; HELM, Monte L. Determining the Overpotential for a Molecular Electrocatalyst. **ACS Catalysis**, v. 4, n. 2, p. 630–633, 7 fev. 2014.

ARCOS, Jose M. Marín; SANTOS, Diogo M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. **Gases**, v. 3, n. 1, p. 25–46, 3 fev. 2023.

ASTRONOO. **Abundância de elementos químicos.** Disponível em: <<https://astronoo.com/pt/artigos/abundancia-dos-elementos.html>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

BARD, Allen J. ..; FAULKNER, Larry R. .. **Electrochemical methods : fundamentals and applications.** [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

BARD, Allen J.; FAULKNER, Larry R.; WILEY, John. **Electrochemical Methods, Fundamentals and Applications.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/sharingguidelines>>.

BERNASCONI, R. *et al.* Electrodeposition from Deep Eutectic Solvents. *In: Progress and Developments in Ionic Liquids.* [S.l.]: InTech, 2017.

BORGES, Gabriel. **SÍNTESE ELETROQUÍMICA DE ELETRODO POROSO DE NÍQUEL APLICADO COMO CÁTODO NA ELETRÓLISE DA ÁGUA.** [S.l.: S.n.].

CHEN, Zhijie; WEI, Wei; NI, Bing-Jie. Cost-effective catalysts for renewable hydrogen production via electrochemical water splitting: Recent advances. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 27, p. 100398, fev. 2021.

ELSHARKAWYA, Safya; HAMMAD, Sherin; EL-HALLAGA, Ibrahim. c. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 26, n. 6–7, p. 1501–1517, 17 jul. 2022.

Emissions Gap Report 2022. [S.l.]: United Nations, 2022.

ESPOSITO, Elisa *et al.* Green H₂ Production by Water Electrolysis Using Cation Exchange Membrane: Insights on Activation and Ohmic Polarization Phenomena. **Membranes**, v. 12, n. 1, p. 15, 23 dez. 2021.

FERNANDES BORGES, Ana Caroline. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética.** [S.l.: S.n.].

FERREIRA, Sabrina. **SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS NATURAIS (NADES): PREPARO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM AMOSTRAS AMBIENTAIS.** [S.l.: S.n.].

FERREIRA, Thiago Vasconcellos Barral. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** 2021.

FRENTIU, Francesca D. *et al.* Adaptive evolution of color vision as seen through the eyes of butterflies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. suppl_1, p. 8634–8640, 15 maio 2007.

G. O. SAMPAIO, FRANCISCO. **ELETRODEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS Fe_x-Co_{100-x} e Fe_x-Ni_{100-x} EM SOLVENTE EUTÉTICO CLORETO DE COLINA E UREIA: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA REAÇÃO DE DESPRENDIMENTO DE HIDROGÊNIO.** [S.l.: S.n.].

GE, Zhenhua *et al.* A review of the electrocatalysts on hydrogen evolution reaction with an emphasis on Fe, Co and Ni-based phosphides. **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 29, p. 14081–14104, 10 out. 2020.

GÉRIOS, Yonah Favero *et al.* Química verde aplicada: os Solventes Eutéticos Naturais Profundos (NADES) na extração de compostos fenólicos – uma análise cienciométrica. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 17, n. 10, p. e12134, 29 out. 2024.

GOMES, KAUAN LEMOS. **REVESTIMENTOS DE Ni-Mo OBTIDOS EM MEIO DE SOLVENTE EUTÉTICO COMO ELETROCATALISADOR NA REAÇÃO DE DESPRENDIMENTO DE HIDROGÊNIO.** [S.l.: S.n.].

HOLLADAY, J. D. *et al.* An overview of hydrogen production technologies. v. 139, p. 244–260, 2009.

HU, Yanling; WANG, Chao. Electrodeposition of nickel–cobalt alloys from metal chloride–serine deep eutectic solvent for the hydrogen evolution reaction. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 12, n. 27, p. 16769–16779, 2024.

HUANG, Ping; ZHANG, Yuan. Electrodeposition of Nickel Coating in Choline Chloride-Urea Deep Eutectic Solvent. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 13, n. 11, p. 10798–10808, nov. 2018.

KHAN, Ibrahim *et al.* c. **Carbon**, v. 213, p. 118292, set. 2023.

KNOB, Daniel. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 19 mar. 2014.

KORETSKY. **Termodinâmica para Engenharia Química.** [S.l.: S.n.].

LI, Ruopeng *et al.* Electrodeposition: Synthesis of advanced transition metal-based catalyst for hydrogen production via electrolysis of water. **Journal of Energy Chemistry**, v. 57, p. 547–566, jun. 2021.

LI, Wenruo *et al.* Electrochemical behavior and electrodeposition of Ni-Co alloy from choline chloride-ethylene glycol deep eutectic solvent. **Applied Surface Science**, v. 507, p. 144889, mar. 2020.

LI, Yanguang *et al.* MoS₂ Nanoparticles Grown on Graphene: An Advanced Catalyst for the Hydrogen Evolution Reaction. **Journal of the American Chemical Society**, v. 133, n. 19, p. 7296–7299, 18 maio 2011.

LOKHANDE, A. C.; BAGI, J. S. Studies on enhancement of surface mechanical properties of electrodeposited Ni–Co alloy coatings due to saccharin additive. **Surface and Coatings Technology**, v. 258, p. 225–231, nov. 2014.

MCCRORY, Charles C. L. *et al.* **Benchmarking Heterogeneous Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction.** [S.l.: S.n.].

MURTHY, Arun Prasad *et al.* Highly active MoS₂/carbon electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction – insight into the effect of the internal resistance and roughness factor on the Tafel slope. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 19, n. 3, p. 1988–1998, 2017.

OLIVEIRA, FRANCISCO GILVANE. **ELETRODEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS Fe_x-Co_{100-x} e Fe_x-Ni_{100-x} EM SOLVENTE EUTETICO CLORETO DE COLINA E UREIA: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA.** [S.l.: S.n.].

PATELLI LONGATTO, GUSTAVO. **Nanopartículas Metálicas: Síntese em Solventes Eutéticos Profundos e Suas Aplicações em Eletroanalítica.** [S.l.: S.n.].

PEREIRA, Juliermes Carvalho. **EFEITO DOS PARÂMETROS DE ELETRODEPOSIÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTOS DE Zn-Sn e Zn-Sn-In.** Fortaleza: [S.n.].

POPOV, Branko N. .. **Corrosion engineering: principles and solved problems.** [S.l.]: Elsevier, 2015.

POPOV, Konstantin I. *et al.* **Morphology of Electrochemically and Chemically Deposited Metals.** Cham: Springer International Publishing, 2016.

QADR, Gharib *et al.* Nickel electrodeposition from deep eutectic solvents containing copper ions at a high temperature. **Journal of Molecular Liquids**, v. 378, p. 121584, maio 2023.

RAFAELA, Ana; SILVA, Luz. **HIDROGÊNIO VERDE E O ENSINO DA ELETRÓLISE A PARTIR DE UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PERNAMBUCANO-CAMPUS OURICURI COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA CURSO DE LICENCIATURA QUÍMICA. [S.l.: S.n.].

SAKITA, Alan Massayuki Perdizio. **Estudos de eletrodeposição dos metais do grupo do ferro em meio aquoso e solventes eutéticos profundos.** [S.l.: S.n.].

SANTANA, Ana *et al.* SOLVENTES EUTÉTICOS NATURAIS PROFUNDOS (NADES) NO PREPARO DE AMOSTRAS DE ROCHA FOSFÁTICA E SUPLEMENTO MINERAL PARA DETERMINAÇÃO ELEMENTAR POR TÉCNICAS DE PLASMA. **Química Nova**, 2021.

SANTOS, D. M. F. *et al.* Electrocatalytic approach for the efficiency increase of electrolytic hydrogen production: Proof-of-concept using platinum--dysprosium alloys. **Energy**, v. 50, p. 486–492, fev. 2013.

SANTOS, Victoria; OHARA, Amanda. **Desafios e Oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde.** Rio de Janeiro: [S.n.].

SERRÀ, Albert *et al.* Electrochemical assessment of high active area of cobalt deposited in deep eutectic solvent. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 896, p. 115177, set. 2021.

SHI, Yanmei; ZHANG, Bin. **Recent advances in transition metal phosphide nanomaterials: Synthesis and applications in hydrogen evolution reaction.** **Chemical Society Reviews** Royal Society of Chemistry, , 21 mar. 2016.

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442–454, dez. 2019.

SILVA, Felipe Azevedo Rios; YAMASHITA, Yaeko; SANTOS, Luis Claudio Rios. O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO DOS PORTOS NO BRASIL. **ARACÊ**, v. 6, n. 3, p. 10826–10857, 29 nov. 2024.

SILVA MENDONÇA DE PAIVA, Suelya. **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL.** Natal: [S.n.].

SMITH, Emma L.; ABBOTT, Andrew P.; RYDER, Karl S. **Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications.** 2014.

SUEN, Nian-Tzu *et al.* Electrocatalysis for the oxygen evolution reaction: recent development and future perspectives. **Chemical Society Reviews**, v. 46, n. 2, p. 337–365, 2017.

TAHIR, Muhammad *et al.* Nano Energy Electrocatalytic oxygen evolution reaction for energy conversion and storage : A comprehensive review. **Nano Energy**, v. 37, n. May, p. 136–157, 2017.

THEERTHAGIRI, Jayaraman *et al.* Fundamental aspects and recent advances in transition metal nitrides as electrocatalysts for hydrogen evolution reaction: A review. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 24, n. 1, p. 100805, 2020a.

THEERTHAGIRI, Jayaraman *et al.* Fundamental aspects and recent advances in transition metal nitrides as electrocatalysts for hydrogen evolution reaction: A review. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 24, n. 1, p. 100805, fev. 2020.

TORKZADEH, Sahar *et al.* Deep eutectic solvents for water vapor absorption: A new strategy. **Separation Science and Technology**, p. 1–12, 5 set. 2024.

URCEZINO, Amanda *et al.* Electrodeposition Study of Ni Coatings on Copper from Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2016.

WANG, Jing *et al.* Non-Noble Metal-based Carbon Composites in Hydrogen Evolution Reaction: Fundamentals to Applications. **Advanced Materials**, v. 29, n. 14, 24 abr. 2017.

WANG, Jing *et al.* Fabrication of porous Ni-Co catalytic electrode with high performance in hydrogen evolution reaction. **Applied Surface Science**, v. 539, p. 148045, fev. 2021.

WANG, Mingyong *et al.* The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 573–588, 2014.

WANG, Shujuan *et al.* Electrodeposition of nano-nickel in deep eutectic solvents for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 33, p. 15673–15686, ago. 2018.

WIKIPEDIA. **Voltametria cíclica**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Voltametria_c%C3%ADclica>. Acesso em: 29 jun. 2025.

YANG, Peixia *et al.* Electrodeposition of Cu–Li alloy from room temperature ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. **Electrochimica Acta**, v. 88, p. 203–207, jan. 2013.

YU, Peng *et al.* Earth abundant materials beyond transition metal dichalcogenides: A focus on electrocatalyzing hydrogen evolution reaction. **Nano Energy**, v. 58, p. 244–276, abr. 2019.

ZHU, Jing *et al.* Recent Advances in Electrocatalytic Hydrogen Evolution Using Nanoparticles. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 2, p. 851–918, 2020.

ZHU, Yan-Li; KATAYAMA, Yasushi; MIURA, Takashi. Effects of acetonitrile on electrodeposition of Ni from a hydrophobic ionic liquid. **Electrochimica Acta**, v. 55, n. 28, p. 9019–9023, dez. 2010.