



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ

Pedro Paulo Soares Sales

PROSPECÇÃO DA DISPONIBILIDADE DO NÍQUEL PARA SUBSIDIAR A PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

Jequié-BA

2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Pedro Paulo Soares Sales

**PROSPECÇÃO DA DISPONIBILIDADE DO NÍQUEL
PARA SUBSIDIAR A PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO
VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Federal de Educação da Bahia,
como parte das exigências para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cassia Souza de
Queiroz Lopes

Jequié-BA
2024

Resumo

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por soluções sustentáveis está impulsionando a investigação de fontes de energia limpa. Nesse contexto, o hidrogênio verde pode representar uma promissora opção. Entretanto, para ocorrer uma transição energética, é necessário que a produção de matérias-primas relacionadas, possam acompanhar a mudança. Este estudo buscou prospectar a disponibilidade do níquel para subsidiar a produção do hidrogênio verde. Na primeira parte da pesquisa, a composição dos componentes utilizados na eletrólise alcalina para a produção de hidrogênio verde foram estudados mediante uma pesquisa descritiva por meio de uma revisão bibliográfica em livros e artigos científicos. Logo após, foi realizado um levantamento da produção do níquel e suas aplicações nos diversos setores, no contexto global. Esta etapa foi dividida em dois estágios. No primeiro estágio, o levantamento acerca da produção de níquel, que foi executado por meio de uma pesquisa descritiva de forma quantitativa, mediante uma revisão bibliográfica em documentos governamentais e dados de mercado. No segundo estágio, as aplicações do níquel em cada setor foram registradas, como também a quantidade consumida. Realizou-se uma pesquisa descritiva de forma quantitativa por meio de uma revisão bibliográfica em documentos governamentais e dados de mercado. Por último, uma análise acerca da disponibilidade do níquel para suportar a produção de hidrogênio verde foi realizada. Para essa estimativa, um cenário específico foi adotado, levando em consideração um eletrolisador e um material para eletrodo, que foi o aço inoxidável AISI 304. Os cálculos para estimar um valor de massa necessário para o níquel subsidiar a produção de hidrogênio verde foram realizados. Com isso, foi possível identificar que a produção de níquel não consegue subsidiar a produção de hidrogênio verde diante das expectativas atuais, estimando cerca de 119,109 mil toneladas de níquel para uma produção estimada de 32 milhões de toneladas de hidrogênio verde no ano de 2030.

Palavras-chave: Eletrolise alcalina, eletrodo, eletrolisador, energia renovável.

Abstract

The growing concern about climate change and the search for sustainable solutions are driving the investigation of clean energy sources. In this context, green hydrogen could represent a promising option. However, for an energy transition to occur, it is necessary that the production of related raw materials can keep up with the change. This study aimed to prospect the availability of nickel to support the production of green hydrogen. In the first part of the research, the composition of the components used in alkaline electrolysis for green hydrogen production was studied through descriptive research via a bibliographic review of books and scientific articles. Subsequently, a survey of nickel production and its applications in various sectors in the global context was conducted. This stage was divided into two phases. In the first phase, the survey on nickel production was conducted through descriptive quantitative research via a bibliographic review of government documents and market data. In the second phase, the applications of nickel in each sector were recorded, as well as the quantity consumed. Descriptive quantitative research was carried out through a bibliographic review of government documents and market data. Finally, an analysis of the availability of nickel to support green hydrogen production was conducted. For this estimate, a specific scenario was adopted, considering an electrolyzer and a material for the electrode, which was AISI 304 stainless steel. Calculations were made to estimate the mass of nickel needed to support green hydrogen production. Consequently, it was possible to identify that nickel production cannot support green hydrogen production according to current expectations, estimating about 119.109 thousand tons of nickel to meet an estimated production of 32 million tons of green hydrogen by the year 2030.

Keywords: Alkaline electrolysis, electrode, electrolyzer, renewable energy.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Justificativa	6
1.2	Objetivo Geral	6
1.3	Objetivos específicos	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1	Hidrogênio	7
2.1.1	O hidrogênio como energia	7
2.1.2	Desafios para utilização	7
2.1.3	Hidrogênio Verde	8
2.2	Eletrólise da Água.....	8
2.2.1	Eletrólise de membrana de troca de prótons.....	9
2.2.2	Eletrolisadores de óxidos sólidos	10
2.2.3	Eletrólise alcalina	10
2.3	Materiais para Eletrodos	11
3	METODOLOGIA	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1	Apresentação da composição dos componentes no processo de eletrólise alcalina	16
4.2	Levantamento da disponibilidade do níquel	17
4.2.1	Produção	18
4.2.2	Utilização	19
4.3	Prospecção da disponibilidade do níquel para a produção de hidrogênio verde.....	22
5	CONCLUSÃO.....	25
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	25
	REFERÊNCIAS.....	26

1 Introdução

Desde a segunda revolução industrial, em 1870, a quantidade de energia utilizada a partir de combustíveis fósseis, cresceu exponencialmente, o que acarretou uma liberação em grande escala de gases poluentes na atmosfera. Esses gases interferem no clima e na qualidade de vida dos seres humanos, provocando o efeito estufa e poluição atmosférica na maioria dos centros urbanos.

Com todo esse impacto, países têm se reunido ao longo dos anos para colocar em pauta as mudanças climáticas, bem como o aquecimento global gerado por estes gases. Um dos mais importantes acordos já aprovados, foi o de Paris, no ano de 2015 (Cunha, 2017). O Acordo de Paris recebeu aprovação de 195 países que são partes da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) dentro do contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso estabelecido visa a evitar que o aumento da temperatura média global ultrapasse 2°C em relação aos níveis pré-industriais, além de empreender esforços para restringir esse aumento a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (AMBIENTE, 2023).

De acordo com Tavares (2019), a transformação necessária, chamada de transição energética, é liderada por países desenvolvidos e resulta de políticas para o setor de energia, com especial foco na difusão de fontes renováveis para a geração de eletricidade.

O foco da transição energética está no desenvolvimento das energias renováveis, que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), as fontes de energia que pertencem a este grupo são consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas. Nos últimos anos, a energia solar e a eólica têm se destacado ao lado de tecnologias maduras como hidrelétrica e geotérmica. Essa mudança de paradigma visa a descarbonização, ou seja, a redução gradual das fontes fósseis e o desligamento das centrais à carvão.

O surgimento de novos setores, como a energia marinha e o hidrogênio verde (H2V), promete impulsionar ainda mais essa transição. Tecnologias de armazenamento de energia são cruciais para lidar com a intermitência de fontes como sol e vento. Além disso, a eletrificação de consumos e de certos setores, juntamente com a digitalização de processos industriais e redes, contribui para melhorar a eficiência energética e completar o processo de transição energética (ENEL, 2021).

O hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água, é tido como uma das principais fontes de energia do futuro, sendo um fator determinante para a transição energética. Porém, para que essa expectativa de utilização do hidrogênio verde venha a se concretizar, é necessário o desenvolvimento da tecnologia de produção dessa fonte em escala industrial e o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem no processo de implementação dessa nova matriz (CAMPOS, s.d.).

E também, as matérias-primas envolvidas no processo de eletrólise, como os metais para fabricação dos eletrodos, precisam acompanhar a escala de produção. Como um dos metais

utilizados nos eletrodos para realizar a eletrólise da água, o níquel tem sido constantemente estudado e avaliado, por isso é necessária uma análise sobre sua disponibilidade para utilização neste setor.

1.1 Justificativa

O processo de produção de hidrogênio verde pela eletrólise alcalina da água, é uma tecnologia antiga, é a que mais tem maturidade e praticidade no mercado atual e novos estudos buscam ainda mais seu aperfeiçoamento para alcançar um maior nível de competitividade. Assim sendo, esse foi o método de produção escolhido nesse trabalho. Entender a demanda que essa tecnologia pode gerar em outras matérias-primas pode contribuir com o avanço da implementação desse novo processo de geração de energia. Como um dos materiais empregados em eletrodos para realizar a eletrólise da água, o níquel tem ganhado bastante destaque, sendo um ótimo substituinte para os metais nobres. Neste sentido, compreender a produção, utilização e demanda do níquel no cenário mundial é fundamental, inclusive como elemento integrante na produção do H₂V.

1.2 Objetivo Geral

Prospectar a disponibilidade do níquel para subsidiar a produção do hidrogênio verde.

1.3 Objetivos específicos

- Apresentar a composição dos componentes na eletrólise alcalina para a produção de hidrogênio verde;
- Realizar levantamento da produção do níquel e suas aplicações nos diversos setores, no cenário global;
- Analisar a disponibilidade do níquel para ser utilizado na produção de hidrogênio verde;

2 Referencial Teórico

2.1 Hidrogênio

O hidrogênio, é o primeiro elemento da tabela periódica e o mais simples dos elementos já catalogados. O átomo de hidrogênio é um dos componentes elementares da água, encontrado naturalmente nessa estrutura. A primeira pessoa a decompor o gás hidrogênio foi Henry Cavendish em 1766, mas essa molécula só foi nomeada por Lavoisier em 1783 (CRIZOL, 2020). Existente em milhões de substâncias, o hidrogênio compõe cerca 76% da massa do universo (ESTÊVÃO, 2008). Sua estrutura atômica é composta por 1 próton e 1 elétron, podendo ser encontrado com algumas variações isotrópicas, tais como o deutério e o trítio.

2.1.1 O hidrogênio como energia

O gás hidrogênio pode ser utilizado para armazenar energia em uma quantidade relativamente alta, se comparado a outros tipos de combustíveis. Tendo um poder calorífico quase três vezes maior que o da gasolina, é tido como a energia do futuro (CRIZOL, 2020). Diversas outras características do hidrogênio como as mostradas na figura 1 favorecem sua utilização como combustível.

Figura 1 – Características dos combustíveis.

Propriedades	Diesel	Gasolina	Etanol	Hidrogênio
Difusividade no ar (cm ² /s)	-	0,08	0,02	0,63
Velocidade de chama (cm/s)	30	37-43	41	265-325
Limite de inflamabilidade (% em volume no ar)	0,7-5	1,4-7,6	4,3-19	4-75
Energia mínima de ignição (mJ)	-	0,24	0,7	0,02
Temperatura de autoignição (K)	530	533-733	831	858
Distância de extinção da chama (cm)	-	0,200	0,09	0,064
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	42,5	43,9	26,9	119,9
Densidade Energética (MJ/m ³)	36340	31240	15840	10,8
Densidade a 16 °C e 1,01 bar (kg/m ³)	833-881	721-785	785	0,0838
Relação ar-combustível estequiométrica	14,5	14,6	8,93	34,3
Número de octano	30	92-98	100-114	130

Fonte: Cunha (2017, p. 37).

2.1.2 Desafios para utilização

Para utilizar o hidrogênio como energia, ainda existem grandes problemas relacionados ao armazenamento dessa substância. Por se encontrar no estado gasoso, seria necessário um volume muito grande para se comparado a outro combustível para gerar a mesma quantidade de

energia, isso acontece porque o hidrogênio tem uma baixa densidade energética por volume. Para o armazenamento no estado líquido, faz-se necessário sistemas de refrigeração altamente complexos, para manter o combustível a uma temperatura de -253°C .

2.1.3 Hidrogênio Verde

O hidrogênio pode ser classificado conforme o meio utilizado para sua geração. Se sua obtenção foi por meio de carvão, é classificado como Marrom. Utilizando gás natural é chamado de Cinza, porém se for de uma forma que não agrida o meio ambiente é Azul. O hidrogênio obtido a partir da eletrólise da água por meio de fontes de energia renovável é denominado verde, sendo o precursor para diminuição de gases do efeito estufa (CAMPOS et al., s.d.).

A figura 2 abaixo contém as diversas classificações do Hidrogênio.

Figura 2 – Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção.

Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2021.

O hidrogênio verde é considerado uma energia limpa, pelo fato de não emitir gases de efeito estufa em alguns processos de produção e utilização, visto que os meios para se gerar a energia utilizada na eletrólise pode vir de energias limpas, como eólica e solar, por exemplo. Nesse contexto, a Energia Limpa é caracterizada, conforme o próprio nome sugere, pode ser proveniente de recursos naturais e renováveis, ou seja, não gera poluição e é inesgotável (PINTO, 2012). O Hidrogênio pode ser obtido da eletrólise da água, tendo três diferentes métodos, sendo eles a eletrólise de membrana de troca de prótons, eletrólise de óxidos sólidos e a eletrólise alcalina, que serão apresentados nos próximos tópicos (MOURA, 2024).

2.2 Eletrólise da Água

A palavra eletrólise tem sua origem no grego, dos termos *electro* + *lysis*, designando a decomposição de elementos através da eletricidade (ESTÊVÃO, 2008). Para que esse fenômeno ocorra é necessário um meio que tenha condutividade iônica, o qual é denominado eletrólito.

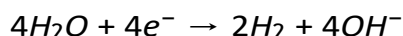
Podendo ser líquido, sólido ou pastoso, o eletrólito deve ser capaz de transportar íons de um eletrodo para o outro. O eletrodo é o componente que possibilita a transferência de corrente elétrica de uma fonte externa para o sistema e pode ser classificado como cátodo ou ânodo (CUNHA, 2017). O cátodo é o eletrodo positivo, onde acontece a redução e o ânodo é o eletrodo negativo onde ocorre a oxidação (CUNHA, 2017).

Ao fornecer uma corrente elétrica ao sistema, elétrons liberados pelo cátodo reagem com o meio eletrolítico, quebrando ligações moleculares e formando íons, transportados para o ânodo. A eletrólise é um fenômeno não espontâneo, devido a sua necessidade de energia para acontecer (CRIZOL, 2020).

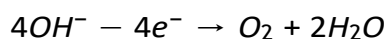
Atualmente, nos registros literários, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água é frequentemente mencionada como a reação de desprendimento de hidrogênio (HER) (TORRES, 2014).

Na eletrólise da água, os elétrons quebram a ligação entre o oxigênio e o hidrogênio, por meio das seguintes reações:

No cátodo:



No ânodo:



Na eletrólise alcalina, o hidrogênio é liberado no cátodo. O Hidrogênio pode ser obtido da eletrólise da água, tendo três diferentes métodos, sendo eles a eletrólise de membrana de troca de prótons, eletrólise de óxidos sólidos e a eletrólise alcalina (MOURA, 2024).

2.2.1 Eletrólise de membrana de troca de prótons

O uso de polímeros de troca iônica em aplicações eletroquímicas teve início no final da década de 1950 nos Estados Unidos, coincidindo com a era da corrida espacial. Em torno de 1966, a General Electric desenvolveu pioneiramente o primeiro eletrolisador de água baseado no conceito de condução de prótons, utilizando uma membrana de polímero como eletrólito. Em 1978, a empresa deu início à comercialização dos primeiros eletrolisadores de água desse tipo (URSUA; GANDIA, 2012). Esse sistema incorpora uma membrana sólida condutora de prótons que desempenha uma dupla função, separando os gases e conduzindo íons.

A baixa taxa de permeabilidade de gás da membrana polimérica permite que o eletrolisador de membrana de troca de próton (*Proton Exchange Membrane*, PEM) funcione eficientemente em uma ampla faixa de entradas de energia. Isso ocorre porque o transporte de prótons através da membrana responde rapidamente a variações de energia, sem ser retardado pela inércia, como acontece em eletrólitos líquidos. Além disso, o funcionamento

em alta pressão de um eletrolisador oferece a vantagem de produzir hidrogênio a uma pressão elevada, o que requer menos energia no processo (CARMO; FRITZ, 2013).

2.2.2 Eletrolisadores de óxidos sólidos

O processo descrito refere-se à eletrólise de vapor de água em altas temperaturas (900-1000°C), utilizando cerâmicas condutoras de íons de oxigênio, como o ZrO_2 estabilizado por Y_2O_3 , MgO ou CaO , como eletrólito. Nesse processo, a água é introduzida no cátodo na forma de vapor e é reduzida para produzir hidrogênio. Íons de oxigênio (O^{2-}) são transportados através do eletrólito para o ânodo, onde são descarregados como oxigênio (O_2) (WENDT; KREYSA, 1999).

A eletrólise de vapor de água surgiu com o objetivo de reduzir a demanda de energia e, consequentemente, os custos operacionais. Teoricamente, até 40% da energia necessária para a produção de hidrogênio pode ser fornecida na forma de calor a 1000°C, reduzindo assim a necessidade de eletricidade em até 25%. As células eletrolisadores de óxidos sólidos (*Solid Oxide Electrolyser Cell*, SOEC) apresentam uma eficiência entre 81% e 86%, o que é mais elevado do que os eletrolisadores alcalinos e de Membrana de Troca de Prótons (PEM) (BHANDARI; CLE- MENS, 2014).

Essa tecnologia SOEC tem um grande potencial para a produção em massa de hidrogênio. No entanto, questões relacionadas à durabilidade dos materiais cerâmicos em altas temperaturas e à operação em longo prazo precisam ser resolvidas. Para futuros desenvolvimentos, a compreensão da estrutura e da eletroquímica dos materiais é essencial.

2.2.3 Eletrólise alcalina

A eletrólise alcalina é uma tecnologia amplamente utilizada para a produção de hidrogênio e é a tecnologia eletrolítica mais antiga em operação comercial em todo o mundo, desde que o fenômeno da eletrólise foi descoberto em 1789 (CARMO; FRITZ, 2013).

Neste processo, uma célula eletrolítica consiste em dois eletrodos separados por um diafragma, que impede a mistura dos gases produzidos na eletrólise, visando eficiência e segurança. A célula é imersa em um eletrólito alcalino líquido, normalmente uma solução altamente concentrada de hidróxido de potássio (6-8 mol/L) (HAMANN; HAMNETT, 2007). Essa escolha do eletrólito baseia-se na sua alta condutividade e na notável resistência à corrosão dos materiais empregados nos eletrodos em soluções cáusticas nessas concentrações (WENDT H.; KREYSA, 1999). Embora outros eletrólitos, como soluções de hidróxido de sódio e cloreto de sódio, sejam menos comuns, também podem ser usados (URSUA; GANDIA, 2012).

Os eletrolisadores alcalinos comerciais operam com densidades de corrente que variam de 200 a 2400 mA/cm². As temperaturas normais de operação ficam entre 60 e 80°C. Em relação à pressão, alguns modelos operam à pressão atmosférica, enquanto outros podem alcançar até

448 bar. No entanto, a pressão máxima típica para a eletrólise é próxima de 30 bar (BHANDARI R.; CLEMENS, 2014).

Esses eletrolisadores têm uma capacidade de produção muito alta, chegando a 500-760 Nm³/h, tornando-os adequados para a produção em grande escala de hidrogênio. Os níveis de pureza do hidrogênio e oxigênio produzidos podem atingir 99,9% e 99,7%, respectivamente, sem a necessidade de equipamentos de purificação adicionais (URSUA; GANDIA, 2012).

É importante notar que os eletrolisadores alcalinos geralmente requerem energia adicional para comprimir o hidrogênio produzido para poder ser armazenado em menores volumes, resultando em uma demanda de energia que varia de 4,5 a 7 kWh/Nm³ em plantas de produção de hidrogênio (BHANDARI R.; CLEMENS, 2014).

Informações sobre tipos de eletrolisadores estão apresentadas na figura 3.

Figura 3 – Especificações de eletrolisadores alcalinos, PEM e SOEC.

Especificação	Unidade	Alcalinos	PEM	SOEC
Temperatura da célula	°C	60-80	50-80	900-1000
Pressão da célula	bar	<30	<30	<30
Densidade de corrente	A/cm ²	0,2-0,4	0,6-2,0	0,3-1,0
Voltagem da célula	V	1,80-2,40	1,80-2,20	0,95-1,30
Densidade Energética	W/cm ²	< 1,0	< 4,4	-
Eficiência voltaica	%	62-82	67-82	81-86
Consumo de energia específica	kWh/Nm ³	4,5-7,0	4,5-7,5	2,5-3,5
Produção de hidrogênio	Nm ³ /h	< 760	< 30	-
Tempo de duração da eletrólise	h	< 90000	< 20000	< 40000
Tempo de vida da célula	a	20-30	10-20	-
Pureza de hidrogênio	%	> 99,8	99,999	-

Fonte: Cunha (2017, p. 6).

Porém, é importante ressaltar que o material que compõe o eletrodo é crucial no processo de eletrólise da água. Há uma diversidade de materiais usados como eletrodos em eletrolisadores. Cada metal apresenta um nível distinto de atividade, resistência elétrica, resistência à corrosão e durabilidade (CUNHA, 2017).

2.3 Materiais para Eletrodos

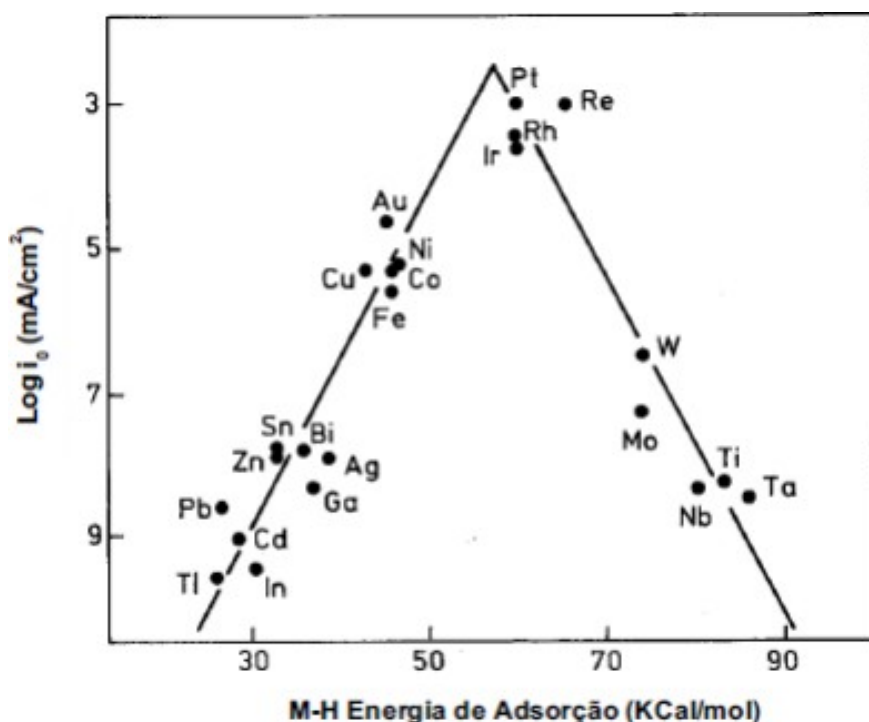
Para aperfeiçoar a reação de desprendimento de hidrogênio (HER), pesquisas estão sendo realizadas com o propósito de melhorar a eficiência do processo e diminuir seus custos com a utilização de materiais alternativos (TORRES, 2014). De fato, o material dos eletrodos desempenha um papel crucial no HER. Um eletrodo eficaz deve exibir alta atividade catalítica, baixo sobrepotencial catódico e grande área superficial, além de ser resistente a ambientes altamente

corrosivos. Essas características são essenciais para reduzir os custos operacionais da célula eletrolítica (TORRES, 2014).

Os metais nobres, como Rutênio (Ru), Irídio (Ir), Ródio (Rh), Paládio (Pd) e, especialmente, Platina (Pt), aplicados em eletrodos, são altamente eficazes na produção de hidrogênio via eletrólise da água. Isso se deve à sua alta densidade de corrente de troca, indicativa de uma elevada atividade catalítica, e a um valor intermediário de energia de adsorção para o hidrogênio em sua superfície, colocando-os no topo da "curva de Vulcano" (LIMA, 2017). A Curva de Vulcano é utilizada para comparar a atividade eletroquímica da HER em diversos metais, como pode ser visto na figura 4, que relaciona a densidade de corrente de troca com a entalpia de adsorção do hidrogênio atômico em diferentes metais.

A densidade de corrente é uma medida de taxa, de corrente por unidade de área que flui em ambas as direções em um eletrodo em equilíbrio eletroquímico, onde não há corrente líquida fluindo através da interface eletrodo-eletrólito (TORRES, 2014). Já a entalpia de adsorção do hidrogênio atômico, refere-se à quantidade de energia liberada ou absorvida quando átomos de hidrogênio são adsorvidos na superfície de um material (PAIVA, 2022).

Figura 4 – Diagrama de Vulcano.



Fonte: Torres (2014).

Os demais metais de transição geralmente apresentam densidades de corrente de troca (i_0) inferiores aos metais nobres, e têm energias de adsorção M-H mais baixas, resultando em uma fraca adsorção de hidrogênio na superfície. Por outro lado, alguns desses metais podem ter energias de adsorção mais altas, o que requer mais energia para a dessorção do H_2 da superfície

catalítica. No entanto, o uso destes materiais, Ferro (Fe), Cobalto (Co), Cobre (Cu), e Níquel (Ni), com menores densidades de corrente de troca, oferecem uma alternativa viável aos metais nobres, com a condição de buscar materiais eficientes na produção de hidrogênio via eletrólise, que também sejam menos dispendiosos (LIMA, 2017).

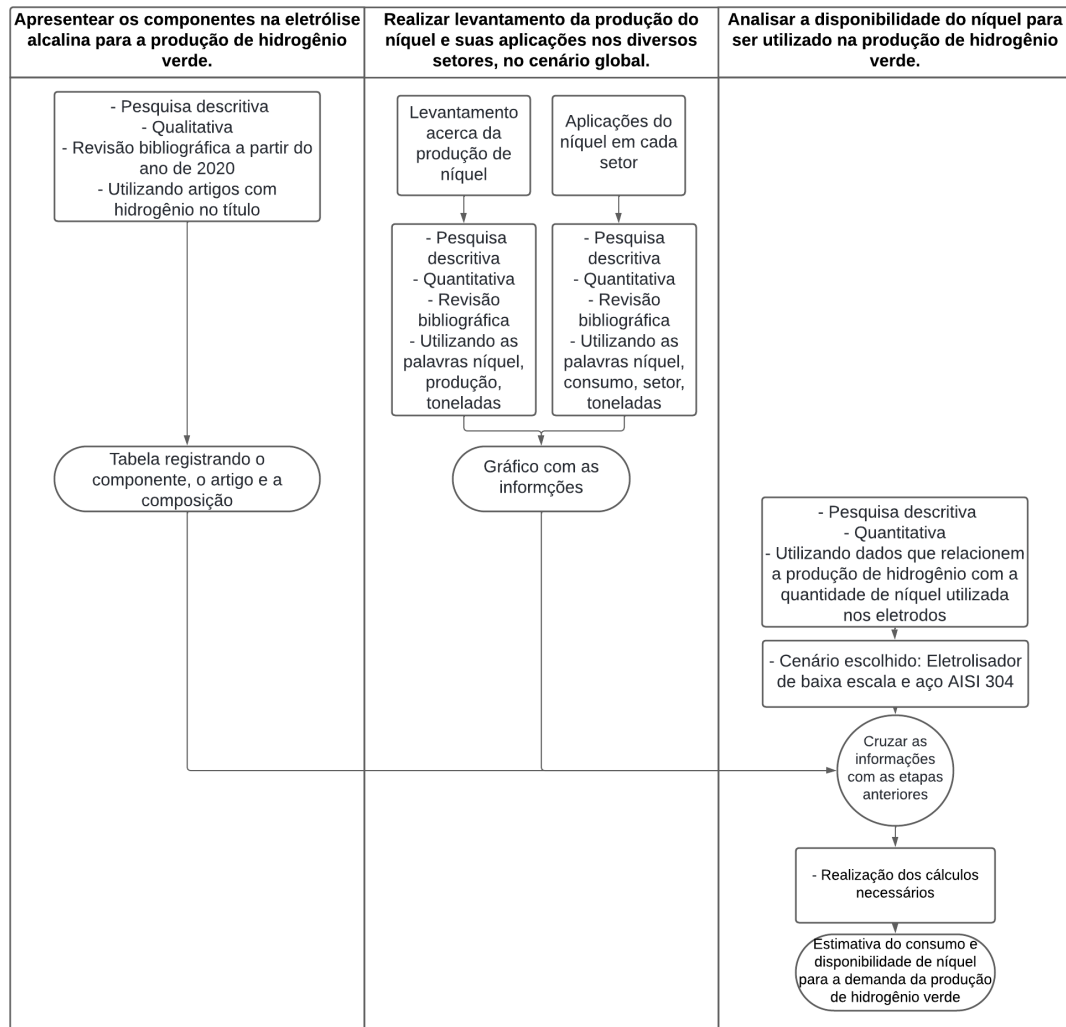
O níquel tem se destacado dentre esses materiais devido a sua corrente de troca relativamente alta, energia de adsorção intermediária, pequeno sobrepotencial catódico, resistência à corrosão em meio alcalino e custo mais baixo em comparação com os metais nobres. O níquel (Ni) é o 24º metal mais abundante na crosta terrestre, sendo caracterizado como um metal pesado, com uma densidade de 8,9 g/cm³ a 25 °C (INSTITUTE, 2022). Na sua forma metálica, o níquel é branco, prateado, dúctil e maleável, apresentando também uma considerável resistência à corrosão e à oxidação quando exposto ao ar, à água e a agentes alcalinos (GONZALEZ, 2016).

Com isso, o níquel é amplamente utilizado na indústria para a produção de hidrogênio por meio da eletrólise alcalina da água, utilizando solução de KOH. No entanto, é importante notar que, nesse meio, o níquel inicialmente apresenta alta atividade catalítica, mas acaba se desativando ao longo do processo de eletrólise (LIMA, 2017).

3 Metodologia

Para avaliar a disponibilidade do níquel para subsidiar a produção de hidrogênio verde, foram realizadas três etapas principais neste trabalho, conforme explicado na figura 5.

Figura 5 – Fluxograma metodológico.



Fonte: O autor (2024).

Na primeira parte da pesquisa, a composição dos componentes utilizados na eletrólise alcalina para a produção de hidrogênio verde foram estudados. Para isso, foi realizada uma pesquisa descritiva por meio de uma revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, pesquisados em bancos de dados como Portal de Periódicos CAPES, Scielo, PubMed e o banco de dados de patentes do Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI).

A pesquisa foi direcionada para artigos com a palavra hidrogênio no título. As palavras eletrólise alcalina e componentes foram utilizadas como palavras chave, juntamente com a leitura dos resumos, para filtrar os artigos nas diversas fontes. Alguns critérios foram utilizados para

selecionar os documentos, como a presença de uma descrição dos principais componentes no processo de eletrólise e também informações a respeito da composição de cada componente. Considerando a evolução da tecnologia ao longo dos últimos anos, somente fontes de informação a partir do ano de 2020 foram avaliadas. Com as informações obtidas, uma tabela foi desenvolvida, compreendendo assim todos os componentes envolvidos no processo de eletrólise alcalina.

Em paralelo, foi realizado um levantamento acerca da produção e aplicação (nos diversos setores) do níquel no cenário mundial. Essa atividade ocorreu em 2 estágios. Primeiro, o levantamento acerca da produção de níquel, que foi executado por meio de uma pesquisa descritiva de forma quantitativa, mediante uma revisão bibliográfica em documentos governamentais e dados de mercado, para mensurar produção desse metal. Para isso, as palavras níquel, produção, toneladas, foram utilizadas durante as buscas. Apenas documentos com informações quantitativas foram utilizados.

No segundo estágio sobre produção e aplicação do níquel, suas aplicações em cada setor foram registradas, como também a quantidade consumida. Realizou-se uma pesquisa descritiva de forma quantitativa por meio de uma revisão bibliográfica em documentos governamentais e dados de mercado. Para isso, as palavras níquel, consumo, setor, toneladas, foram utilizadas. As informações dos dois estágios desta pesquisa foram usadas na produção de gráficos do tipo pizza, para melhor visualização dos resultados.

Por último, a disponibilidade do níquel para ser utilizado na produção de hidrogênio verde foi avaliada. Para isso, as informações das etapas anteriores foram cruzadas e informações numéricas para produção de hidrogênio verde nos próximos anos foram levantadas, mediante uma pesquisa descritiva quantitativa, para relacionar a produção de hidrogênio com a quantidade de níquel utilizada nos eletrodos. Para isso, um cenário específico foi abordado, levando em consideração um eletrolisador alcalino, com os eletrodos cilíndricos e tendo o aço inoxidável AISI 304 como material.

Neste cenário, foi escolhido um eletrolisador de pequena escala (baixa produção de hidrogênio por tempo) e não de escala industrial, devido as dificuldades em se obter informações para essa categoria. Posteriormente, os cálculos para estimar um valor necessário de massa para níquel ser utilizado na produção de hidrogênio verde nos próximos anos foram realizados, utilizando as densidades dos respectivos elementos e a fórmula de volume para cilindros.

4 Resultados e discussão

4.1 Compreensão da composição dos componentes no processo de eletrólise alcalina

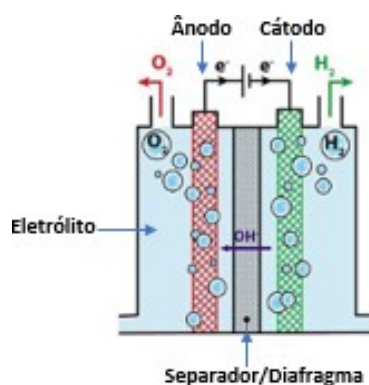
A partir do levantamento bibliográfico foram encontrados um total de 137 artigos nos quais a palavra hidrogênio constava no título, publicados a partir de 2020. Com a utilização das demais palavras-chave e leitura dos resumos, usando como critérios aqueles que descreviam os componentes de eletrolisadores alcalinos, esse conjunto foi sintetizado para um total de 7 documentos.

Ao analisar os artigos, pode-se identificar os componentes basilares para produção de hidrogênio verde através da eletrólise alcalina da água. Segundo Silva (2023), em um eletrolisador alcalino, os principais componentes são o eletrólito, os eletrodos, o separador e um recipiente. Paiva (2022) afirma que dois eletrodos imersos em uma solução alcalina, constituem a eletrólise alcalina.

Mas Borge (2022), define que a eletrólise alcalina consiste em eletrodos, uma membrana de separação entre eles e uma solução alcalina e que para a produção de hidrogênio, uma variedade de eletrólitos e materiais de eletrodos podem ser empregados em diferentes arranjos de células eletrolíticas. E Madruga (2023) descreve que a eletrólise da água envolve dois eletrodos submersos em um recipiente de água, que, quando conectados a uma fonte de energia elétrica, como energia eólica ou solar, geram uma corrente contínua, conduzida pelos sais e minerais presentes na água.

Portanto, identifica-se o eletrodo, o eletrólito e um separador entre o cátodo e o ânodo, como essenciais para o processo de produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise alcalina. Na figura 6 é mostrado cada um dos componentes no eletrolisador.

Figura 6 – Esquema de um eletrolisador alcalino.



Fonte: Adaptado de Moura (2024).

As afirmações de cada autor foram organizadas na tabela 1 de acordo com cada componente.

Tabela 1 – Definições de cada autor sobre a composição dos componentes.

Componente	Referência	Afirmação
Eletrólito	Borges, 2022.	Eletrólito comumente utilizado em eletrolisadores convencionais é o hidróxido de potássio (KOH), com concentrações entre 25 e 30%, outro eletrólito que pode ser utilizado é o cloreto de sódio (NaCl).
	Paiva, 2022.	Com o intuito de aumentar a condutividade iônica no sistema, é utilizado uma solução de hidróxido de potássio (KOH) de 20-40% em peso.
	IRENA, 2020.	Eles operam com KOH altamente concentrado (tipicamente 57 moles de soluto por litro de solução [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]) como eletrólito.
	Moura, 2024.	Soluções contendo hidróxido de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH) a uma concentração entre 20% e 40% tornando o eletrólito alcalino, operando a baixas temperaturas, variando de 60°C a 100°C, e em baixas densidades de corrente ($<400 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$), gerando uma eficiência que está em torno de 70% a 85%.
Elétrodo	Paiva, 2022.	Geralmente para esse tipo de sistema são empregados eletrodos feitos de níquel ou aço, um dos motivos é a presença do eletrólito hidróxido de potássio pelo seu caráter corrosivo, e em baixas temperaturas em torno de 30-80°C.
	IRENA, 2020.	Eletrodos de aço inoxidável revestidos com níquel (Ni).
	Moura, 2024.	Neste tipo de tecnologia, metais nobres não são necessários para a uso nos eletrodos, sendo o material mais conveniente para estes sistemas aqueles à base de níquel (Ni), todavia, na busca pelo melhoramento do desempenho do processo e visando diminuir a degradação dos eletrodos, uma série de metais podem ser usados como catalisadores, dentre eles o cobalto, ferro, seleneto e vanádio.
	Martino et al, 2021.	Recentemente, foi relatado que os conjuntos de óxido de molibdênio e níquel ($\text{MoO}_2\text{-Ni}$) exibem uma atividade semelhante à do Pt a 25,0 °C.
Separador	IRENA, 2020.	Diafragmas robustos à base de dióxido de zircônio (ZrO_2).
	Martino et al, 2021.	Historicamente, o diafragma mais comum é de amianto branco poroso ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Devido aos problemas de toxicidade relacionados ao uso de amianto, na última década foram feitos consideráveis esforços para desenvolver polímeros condutores de hidróxido adequados para a eletrólise alcalina da água.

Fonte: Paiva (2022), Borge (2022), Irena (2020), Moura (2024) e Martino et al.(2021).

O hidróxido de potássio é o eletrólito mais utilizado devidos a sua alta eficiência no processo de eletrólise podendo chegar entre 70% a 80% (Moura, 2024). A alta condutividade desse eletrólito também é um fator determinante para seu uso.

Segundo Moura (2024), historicamente, óxidos e ligas à base de níquel foram usados como eletrodos no processo e o diafragma era constituído de amianto poroso. Irena (2020), aponta que os eletrolisadores alcalinos têm um design simples de pilha e são relativamente fáceis de fabricar. Esse fator pode ser um resultado dos componentes e suas composições utilizadas no eletrolisador, que em sua grande parte são composições simples com materiais comuns no mercado.

Conforme Irena (2020), usam-se catalisadores à base de níquel, que são baratos e amplamente disponíveis para seus eletrodo. Logo, os eletrodos a base de níquel tem sido amplamente utilizados devido ao seu custo, que em relação aos metais nobres é menor (Martino et al., 2021). Porém o maior desafio para eletrolisadores alcalinos é fugir de designs rudimentares para alcançar eficiências mais altas.

Diante dos resultados da tabela 1, fica claro que o níquel é utilizado apenas nos eletrodos, tomando como base os componentes apresentados. Entretanto diante dos desafios para os

materiais que o processo de eletrólise pode proporcionar, como a necessidade de elementos resistentes a corrosão, o níquel pode ser utilizado em outras partes da construção do eletrolisador como a estrutura, por conta de ser um metal barato.

Portanto, foi possível observar que para a eletrolise alcalina do hidrogênio o eletrólito mais comum utilizado é o hidróxido de potássio (KOH), com concentrações entre 20 a 40%. Já em relação ao eletrodo, nota-se uma utilização considerável de níquel, seja como liga ou revestimento. Por fim, em relação ao separador temos o amianto branco poroso como um dos mais comumente utilizados.

4.2 Levantamento da disponibilidade do níquel

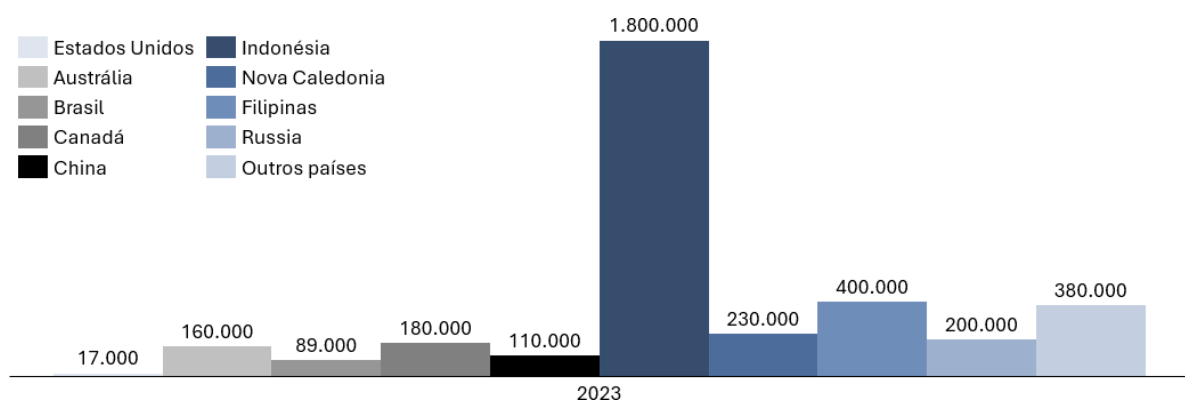
Como foi apresentado, esta etapa corresponde a um levantamento da disponibilidade do níquel e suas aplicações nos diversos setores, no cenário global, dividido nas etapas de produção e utilização.

4.2.1 Produção

Durante a pesquisa, foi percebido que os principais documentos, dentre os quais estão os relatórios da Agência Nacional de Mineração (ANM) de 2023, que trazem os dados atualizados acerca da produção de níquel no mundo, tem a mesma fonte, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS). Portanto, os dados analisados no que diz respeito a produção de níquel, foram retirados desta fonte.

De acordo com o Resumo de Commodities Minerais da USGS publicado em 2024, a produção mundial de níquel em 2023 foi de aproximadamente, 3,6 milhões de toneladas. A produção em toneladas por país em 2023 é demonstrada no gráfico 1.

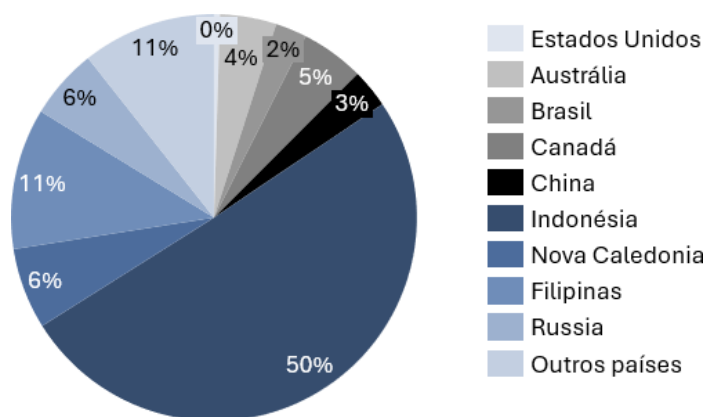
Gráfico 1 – Produção global de níquel por país em toneladas no ano de 2023.



Fonte: Adaptado de USGS (2024).

A comparação percentual da produção por país é mostrada no gráfico 2.

Gráfico 2 – Produção global de níquel por país em porcentagem.



Fonte: Adaptado de USGS (2024).

Globalmente, estima-se que as reservas e depósitos de níquel totalizem mais de 350 milhões de toneladas, distribuídos com 54% em lateritas (rochas formadas por intemperismo intenso e prolongado em climas tropicais e subtropicais) e 35% em depósitos de sulfeto magmático (formados a partir da solidificação de magma que contém sulfetos metálicos). Os sistemas hidrotermais, como a liga de ferro-níquel, os depósitos polimetálicos alojados em sedimentos e os sulfetos maciços vulcanogênicos, assim como as crostas e nódulos de manganês no leito marinho, representam 10%, enquanto recursos diversos, como rejeitos, contribuem com 1% (USGS, 2024).

Acerca da produção de níquel, é possível perceber uma quantidade considerável em relação ao ano de 2023 em relação ao ano de 2022, que foi de 3,270 milhões de toneladas (USGS, 2024). Ao olhar para os depósitos e reservas, a perspectiva é que a escala de produção continue por um longo período. Se a produção global de níquel permanecer no patamar de 2023, poderá ser mantida por aproximadamente mais 98 anos diante das reservas e depósitos mapeados atualmente e considerando a rápida velocidade em que a tecnologia tem evoluído nos últimos anos, é um tempo considerável, permitindo que novos nichos surjam com a possibilidade de redução do uso desse metal.

Grande parte da produção atual vem da Indonésia, país que tem implementado novos projetos hidrometalúrgicos (tratamento de metais por meio de um reagente aquoso) e pirometalúrgicos (tratamento de metais em altas temperaturas), com perspectiva de crescimento até o ano de 2025 (CORPORATION, 2023). Logo, este aumento massivo de produção pode provocar uma diminuição no preço do níquel, por ter uma maior oferta, tornando-o mais competitivo em relação a outros metais, entretanto, isso pode provocar uma queda na sua produção no futuro, com a ausência de investimento nessa *commoditie*.

O custo de produção do níquel sulfetado pode ser reduzido sistematicamente nos próximos anos, facilitando ainda mais sua produção (CORPORATION, 2023). Porém, em 2023 o preço médio anual do níquel na *London Metal Exchange* (LME), que é uma plataforma internacional de consulta para empresas que compram e vendem metais, foi estimado ter diminuído em 15% em relação a 2022, decaindo de 25.815 para 22.000 dólares por tonelada, que continuou a cair em 2024 (USGS, 2024). Portanto, custo de produção e preço de venda são informações importantes para monitorar e projetar a produção de níquel para os próximos anos.

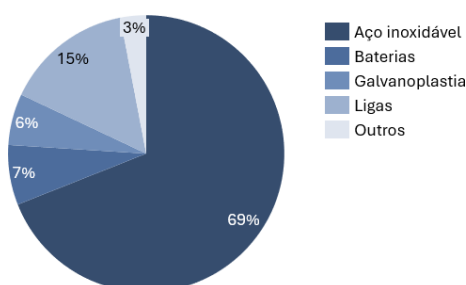
4.2.2 Utilização

As fontes de dados utilizadas para o levantamento das informações foram o Grupo Internacional de Estudo do Níquel (INSG, 2021), o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2024), o Instituto Níquel (Institute, 2022), as empresas *China International Capital Corporation* (Corporation, 2023) e *Nornickel* (Nornickel, 2022). Valer ressaltar que todos os dados coletados estão disponíveis de forma gratuita e aberta nos respectivos sites, não necessitando de nenhum termo de consentimento.

De acordo com INSG (2021), em 2020 a produção de aço inoxidável representou mais de 70% do uso mundial de níquel primário, enquanto o setor de baterias representou aproximadamente 6%, juntamente com ligas não ferrosas, chapeamento e outros. Aços inoxidáveis, ligas e aços contendo níquel representam mais de 85% do consumo doméstico nos Estados Unidos (USGS, 2024).

Conforme a *China International Capital Corporation*, em 2021, o consumo de níquel por setor no mundo está distribuído no gráfico 3.

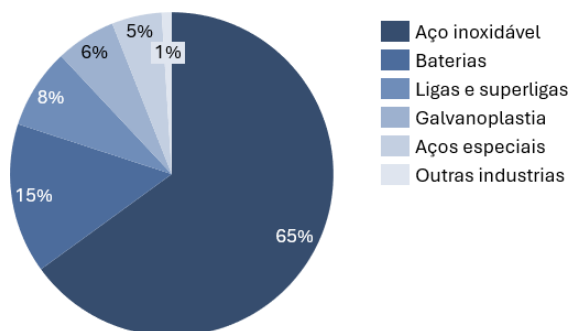
Gráfico 3 – Consumo de níquel no mundo por setor em 2021.



Fonte: Adaptado de Corporation (2023).

No gráfico 4, a *Nornickel* (2022) aponta o seguinte consumo de níquel por setor no ano de 2022.

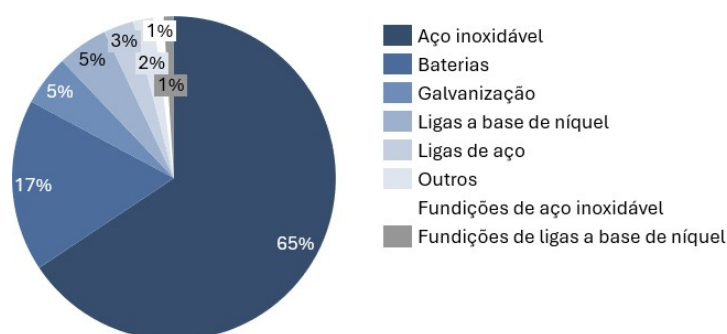
Gráfico 4 – Consumo de níquel no mundo por setor em 2022.



Fonte: Adaptado de Nornickel (2022).

Já o Institute (2022), adiciona mais variáveis no consumo do níquel por setor, mudando também a proporção em relação aos outros setores para o mesmo ano, como é possível notar no gráfico 5.

Gráfico 5 – Consumo de níquel por setor em 2022.



Fonte: Adaptado de Institute (2022).

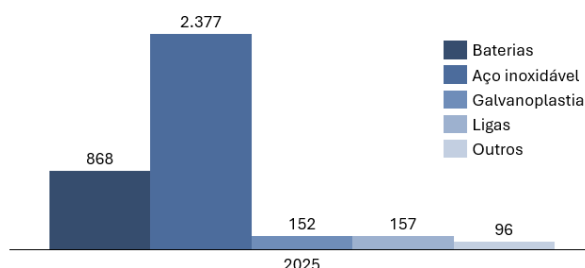
Logo, podemos perceber um crescimento entre os anos de 2021 e 2022 na utilização de níquel em baterias, juntamente com a diminuição da aplicação em aços inoxidáveis. Considerando que todo o níquel produzido para o ano de 2022 foi consumido conforme as informações nos gráficos, grande parte da produção do níquel foi destinada para o aço inoxidável, aproximadamente 2,145 milhões de toneladas, sendo uma liga de ferro resistente a corrosão, logo, pode ser amplamente aplicada em processos eletrolíticos diante da produção global anual. Já baterias tem uma utilização em torno de 17%, contemplando 561 milhões de toneladas. Ligas de níquel somam 5% do consumo em 2022, totalizando 165 milhões de toneladas. Por fim, o processo de galvanização com as demais aplicações totaliza 13%, 429 milhões de toneladas (USGS, 2024).

Levando em consideração essas estimativas em relação à aplicação do níquel na produção de hidrogênio, será necessário um aumento da produção para adicionar outro setor dentre os existentes, pois todas essas informações apresentadas dizem a respeito do metal consumido, logo, não necessariamente se pode evidenciar diante dos dados, que teria espaço no mercado atual para subsidiar uma nova cadeia produtiva, independente de quanto desse material ela necessite.

Entretanto, através de uma análise elaborada por Corporation (2023), de como essa utilização pode se comportar nos próximos anos, é possível perceber um aumento para 22%

de consumo do níquel para baterias e redução para 60% em aços inoxidáveis até 2025. Para esse mesmo ano, o consumo em toneladas do níquel está dividido conforme no gráfico 6.

Gráfico 6 – Previsão de consumo de níquel por setor em 2025 (em milhões de toneladas).



Fonte: Adaptado pelo autor de Corporation (2023).

Para 2025, estima-se que a produção de níquel chegue a 3,997 milhões de toneladas e o consumo a 3,930 milhões de toneladas, gerando um saldo de 67 mil toneladas, podendo gerar, um espaço no mercado para utilização desse metal em outra frente (Corporation, 2023). Enfrentando, este saldo é relativamente pequeno e dependerá totalmente de como o material será utilizado no eletrodo, para garantir uma cadeia produtiva confiável.

Grande parte da utilização do níquel continuará sendo destinada à fabricação de aço inoxidável, porém sua utilização para baterias ganhará cada vez mais mercado diante das novas discussões e metas de alguns países para zerar a emissão de gás carbônico no meio de transporte, com o emprego de carros elétricos (AGENCY, 2023).

Baterias de íons de lítio foram integradas à próxima geração de carros elétricos devido à sua alta densidade de potência, que se tornou crucial para a capacidade de percorrer longas distâncias. Atualmente, os veículos elétricos (VEs) representam 18% de todas as vendas globais de carros, com sua participação de mercado em crescimento e previsões indicando um rápido aumento nos próximos anos. Estima-se que eles possam compor mais de 30% do mercado de veículos até 2025, sendo a maioria equipada com baterias de íons de lítio que incluem níquel na sua composição (INSTITUTE, 2022).

A aplicação em ligas de diversos tipos também consome uma parte relevante da produção de níquel, sendo esse um setor determinante para a geração de hidrogênio (AGENCY, 2023). O aço inoxidável é comumente utilizado em eletrodos, porém a queda na demanda no ano de 2022 fez a produção dessa liga cair, porém, com a possível demanda por hidrogênio verde em ascensão, a oferta pode se estabilizar no futuro.

Porém, é importante ressaltar que, como toda *commoditie*, sua utilização depende das necessidades do mercado, que impacta em seu preço. É possível que as demandas emergentes do processo de produção do hidrogênio façam com que a demanda por níquel suba, elevando seu preço, trazendo assim mais investimentos para a área de mineração deste metal, aumentando a sua produção.

4.3 Prospecção da disponibilidade do níquel para a produção de hidrogênio verde

Para estimar a disponibilidade do níquel para subsidiar a produção de hidrogênio verde, foi utilizado um cenário onde o eletrolisador escolhido foi de pequena escala, devido à dificuldade de obter dados técnicos mais específicos a respeito de equipamentos em escala industrial. O material para o eletrodo no eletrolisador escolhido, é o aço inoxidável AISI 304, que é uma liga comumente utilizada nesse processo, fazendo assim uma estimativa num cenário mais desafiador para a produção de níquel.

Conforme a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, IEA), para alcançar o cenário de emissões líquidas zero dos gases de efeito estufa em 2050, que se refere a um estado de equilíbrio em que as emissões residuais são compensadas por uma quantidade equivalente de remoção da atmosfera, a produção de hidrogênio verde por eletrolisadores precisa atingir o marco de 560.000 MW, estando em 1.152 MW no ano de 2023 (AGENCY, 2023).

Utilizando os dados do relatório técnico da *Hydrogen Council*, que é uma iniciativa global liderada por CEOs de diversas empresas renomadas nos setores de energia, transporte e indústria, podemos estimar que até o ano de 2030 a produção de hidrogênio chegará a 32 milhões de toneladas por ano (COUNCIL, 2023). Já a Agency (2023) estima que para o ano de 2030, a produção de hidrogênio por eletrólise pode chegar a 38 milhões de toneladas por ano, estando em apenas 0,1 milhões de toneladas no ano de 2022.

Com isso, os dados sobre o eletrolisador estabelecido, sua informação de produção de hidrogênio foi cruzada com a estimativa para o ano de 2030, para assim identificar a quantidade de eletrolisadores necessários para atender a demanda global, encontrando consequentemente a quantidade de níquel total nesses equipamentos. A informação de 32 milhões de toneladas para o ano de 2030, apontada no relatório técnico da *Hydrogen Council*, foi a escolhida para os cálculos por ser um valor mais conservador diante da produção atual.

Por meio do trabalho de Cunha (2017), é possível constatar que um eletrolisador de pequena escala, composto apenas por 2 eletrodos de aço inoxidável AISI 304, com dimensões de 130 mm de comprimento e 19,05 mm de diâmetro, consegue uma taxa de produção máxima de hidrogênio de 0,02679 g/min.

A massa de níquel contida nos 2 eletrodos pode ser encontrada por meio da densidade do Ni. Primeiro utilizando a fórmula do volume do cilindro, para calcular o volume (V) dos dois eletrodos como mostra a equação 1.

$$V = 2 * 130 * (19,05)^2 * \pi$$

$$V = 74105,96 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Conforme a NBR5601 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011) a porcentagem mínima de níquel contida no AISI 304 é de 8% e a densidade do níquel que é

de $8,9 \text{ g/cm}^3$ podemos encontrar a massa do níquel (m_{Ni}) contida no volume dos eletrodos em quilogramas, através da equação 2.

$$\begin{aligned} m_{Ni} &= 74105,96 * 0,08 * 8,9 * 10^{-6} \\ m_{Ni} &= 0,05276344352 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2)$$

Transformando a informação a respeito da produção de hidrogênio no ano de 2030, de 32 milhões de toneladas para gramas por minuto encontramos $60882800,61 \text{ g/min}$. Com isso, podemos encontrar a quantidade (Q) de eletrolisadores para alcançar essa meta dividindo a produção desejada pela produção máxima do eletrolisador de pequena escala, como mostra a equação 3.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{60882800,61}{0,02679} \\ Q &= 2.257.426.793 \end{aligned} \quad (3)$$

Com isso, podemos calcular a massa de níquel necessária para essa quantidade de eletrolisadores (m_{NiT}), multiplicando o valor Q pela massa de níquel contida (m_{Ni}) em cada um dos equipamentos analisados, por meio da equação 4 se obtém a massa de níquel total (m_{NiT}).

$$\begin{aligned} m_{NiT} &= 2.257.426.793 * 0,0527634432 \\ m_{NiT} &= 119.109.611,1 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4)$$

Logo, a quantidade de níquel estimada conforme o cenário estabelecido para alcançar a produção de 32 MT de hidrogênio verde no ano de 2030, é de 119,109 mil toneladas. Se for usado o saldo da produção global para o ano de 2025 como estimativa entre demanda e oferta, que é de 67 mil toneladas, a produção de níquel não atenderia a produção de hidrogênio. Porém, levando em consideração que o material selecionado é um aço inoxidável (AISI 304), que ocupa grande parte do consumo de Ni, sua utilização pode ser alterada para atender a demanda da cadeia produtiva do hidrogênio.

Outro fator decisivo, é o tempo de vida útil desses eletrolisadores, que é totalmente influenciada pelos eletrodos, ficando entre 20 a 30 anos para eletrolisadores alcalinos (BHANDARI R.; CLEMENS, 2014). Para eletrolisadores industriais a estimativa é de 200 mil horas, aproximadamente 23 anos (LONGI, 2022). Logo, a renovação de equipamentos e consequentemente a demanda por materiais de eletrodos terá um ciclo de tempo considerável, podendo auxiliar na subsidiação do níquel, caso sua produção aumente, na cadeia de produção do hidrogênio.

É importante ressaltar que o valor da massa de níquel encontrado é uma estimativa que pode variar com o cenário proposto. Outro fator que influenciaria, é a geometria do eletrodo, que ao ter uma maior área de contato com o eletrólito pode alcançar maiores patamares de produção de hidrogênio verde, porém aumentando também a quantidade de níquel. Em alguns eletrodos o níquel é utilizado como revestimento adicional, o que pode modificar ainda mais sua quantidade demandada.

Além disso, como foi discutido nos primeiros tópicos dos resultados, o níquel só foi aplicado para os cálculos no eletrodo, diante da revisão bibliográfica realizada, entretanto, nada impede dele ser utilizado nas estruturas dos eletrolisadores devido as suas propriedades anti-corrosivas. Logo, esse ponto pode ser relevante para a aplicação futura do níquel.

Atualmente, alguns eletrolisadores alcalinos de escala industrial, conseguem alcançar a taxa de produção de 1498 g/min de hidrogênio verde. Pode-se concluir que o nível de eficiência dessa escala é maior do que o eletrolisador utilizado nesta prospecção, contudo até o momento de desenvolvimento deste trabalho não se tem informações a respeito do material e geometria dos eletrodos desses eletrolisadores, nem mesmo em banco de patentes como o INPI (LONGI, 2022).

A norma ISO 22734 de 2019 da Organização Internacional de Padronização (*International Organization for Standardization*, ISO), é uma norma sobre geração de hidrogênio a partir da eletrólise da água, também não traz informações de especificação da construção dos eletrolisadores e da composição dos componentes, apesar ser de uma norma sobre a aplicação da produção de hidrogênio em indústrias (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2019).

Portanto, mesmo com o valor prospectado do níquel estando fora do saldo estimado para o ano de 2025, ainda existem diversos outros pontos a serem discutidos, como os que acabaram de ser citados que podem impactar nesta discussão e a produção do metal pode aumentar até o ano de 2030. Apesar das limitações encontradas durante o desenvolvimento desse trabalho, a estimativa pode ser utilizada como um fator direcionador para tomada de decisões futuras e influenciar ações e políticas públicas.

5 Conclusão

Conforme foi observado, grande parte dos eletrolisadores para a produção de hidrogênio verde, tem o níquel como um dos principais elementos da composição dos eletrodos. O material mais citado na literatura para aplicação como eletrodo é o aço inoxidável, que tem Ni em sua composição. É importante ressaltar que o nível de maturidade tecnológica (*Technology readiness level*) do eletrolisador alcalino para geração de hidrogênio é TRL 9. Entretanto, essa tecnologia ainda necessita de apoio político e aprimoramento para ser competitiva com as tecnologias tradicionais de produção de hidrogênio baseadas em combustíveis fósseis (AGENCY, 2023).

Olhando para o levantamento feito a partir da produção e utilização do níquel, foi possível identificar nichos no mercado para inserção do hidrogênio verde. Por último, através das considerações feitas, foi possível perceber que o níquel não conseguirá suportar a cadeia produtiva do hidrogênio verde para alcançar as metas mundiais para produção. Uma quantidade de 119,109 mil toneladas de níquel, estimada para o ano de 2030, é quase o dobro da produção prospectada para o ano de 2025, que é de 67 mil toneladas. Logo, o objetivo principal do trabalho foi alcançado, identificando uma necessidade de aumento da produção de níquel para subsidiar a produção de hidrogênio verde.

Porém, os valores encontrados e estimados devem ser utilizados apenas para direcionar estudos e pesquisas futuras. Devido à ausência de dados técnicos acerca de eletrolisadores para produção de H₂ em larga escala, não se tem informações específicas que permitam uma estimativa confiável da demanda de níquel nessa escala de produção de H₂.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões e ideias para direcionar trabalhos futuros:

- Prospeção do níquel para subsidiar a produção de hidrogênio, em eletrolisadores de escala industrial.
- Especificação das ligas de alta eficiência no processo de eletrólise.
- Compreensão detalhada acerca da quantidade de níquel utilizado nos eletrolisadores.

Referências

BHANDARI R.; CLEMENS, A. T. Z. P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - a review. **Journal of Cleaner Production**, nº 85, p. 151–163, 2014.

BORGE, A. C. F. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. Rosana: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**, 2023. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acesso em: 29 de dez. de 2023.

CAMPOS, M.; LEÃO, C.; AMORIM, L. O hidrogênio como fonte de energia: uma visão regulatória. **GESEL, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, s.d.

CARMO M.; FRITZ, D. L. M. J. S. D. A comprehensive review on pem water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2013.

CHEN, Y. **Nickel - A tug war between supply and demand growth**, 2023. Slide. Disponível em: <https://www.lme.com/-/media/Files/Events/LME-Asia-Week/LME-Asia-Week-Presentations/LME-Asia-Metals-Seminar-2023_Yan-Chen_Nickel.pdf?sc_lang=en&hash=92683B040D2949CF5684B382B121BB5E>. Acesso em: 01 de maio de 2024.

COUNCIL, H. **Hydrogen Insights 2023: The state of the global hydrogen economy, with a deep dive into renewable hydrogen cost evolution**. 2023. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf?urldate={2024-05-1}>>>.

CRIZOL, A. A. Z. **GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à combustão**. Varginha: CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS, 2020.

CUNHA, P. C. R. da. Efeito da adição de hidrogênio produzido a partir de eletrolise alcalina no desempenho de um motor de combustão interna. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA; FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA; PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**, 2017.

ENEL. **A transição energética**. 2021. Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/transicao-energetica>>.

EPE. **Fontes de Energia**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia,urldate={2024-03-2}>>>.

ESTÊVÃO, T. E. R. **O hidrogênio com combustível**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

GONZALEZ, K. R. Toxicologia do níquel. **Revista Intertox de Toxicologia Risco Ambiental e Sociedade**, 2016.

HAMANN C. H.; HAMNETT, A. V. W. *Electrochemistry*. **2a Ed. Weinheim, Wiley-VCH**, 2007.

INSG. **World Nickel Statistics**. Lisboa, Portugal: International Nickel Study Group, 2021.

INSTITUTE, N. **About Nickel**. 2022. Disponível em: <<https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications>,urldate={2024-05-1}>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em: 19 de maio de 2024.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

LIMA, D. W. *Materiais eletródicos À base de carbono para produção de hidrogênio a partir da eletrólise da Água em meio do Líquido iônico tea-ps.bf*. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2017.

LONGI. **LHy - A1000**. 2022. Disponível em: <<https://www.longi.com/br/products/hydrogen/lhy-a1000/>>.

MADRUGA, M. G. C. **OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA**. Natal: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2023.

MARTINO, M.; RUOCCO, C.; MELONI, E.; PULLUMBI, P.; PALMA, V. **Main Hydrogen Production Processes: An Overview**. [S.l.]: catalysts, 2021.

MOURA, L. C. M. A. de. **MODELO FUNCIONAL DE UM SISTEMA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE**. Natal: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2024.

NORNICKEL. **Annual Report 2022**. 2022. Disponível em: <<https://ar2022.nornickel.com/strategic-report/commodity-markets/ni>,urldate={2024-05-1}>.

PAIVA, S. da Silva Mendonça de. **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVELA**. Natal: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2022.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SILVA, A. R. L. **HIDROGÊNIO VERDE E O ENSINO DA ELETRÓLISE A PARTIR DE UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**. Ouricuri: Instituto Federal do Sertão de Pernambucano, 2023.

STANDARDIZATION, I. O. F. **ISO 22734: Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications**. Suíça: ISO, 2019.

TAVARES, L. L. F. B. *Política energética no brics: Desafios da transição energética*. **Instituto de Pesquisa e Economia Aplicada**, Rio de Janeiro - RJ, 2019.

TORRES, C. dos S. *Eletrodos para produção de hidrogênio por eletrólise a partir de glicerina e sacarose*. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2014.

URSUA A.; GANDIA, L. M. S. P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, 2012.

USGS. **MMINERAL COMMODITY SUMMARIES 2024**. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 2024.

WENDT H.; KREYSA, G. Electrochemical engineering. **1a Ed. Berlim, Springer**, 1999.