

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

Lisandra Craveiro da Silva
Maria Isabel Araújo Ferreira

Hidrogênio como potencial elétrico e energético

GOIÂNIA
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Lisandra Craveiro da Silva e Maria Isabel Araújo Ferreira

Título do trabalho: Hidrogênio como potencial elétrico e energético

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 22/02/2023, às 08:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Isabel Araújo Ferreira, Discente**, em 22/02/2023, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lisandra Craveiro Da Silva, Discente**, em 22/02/2023, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3536866** e o código CRC **B7ED28E6**.

Referência: Processo nº 23070.059855/2022-32

SEI nº 3536866

Lisandra Craveiro da Silva
Maria Isabel Araújo Ferreira

Hidrogênio como potencial elétrico e energético

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Lisandra Craveiro da
Hidrogênio como potencial elétrico e energético [manuscrito] /
Lisandra Craveiro da Silva, Maria Isabel Araújo Ferreira. - 2023.
LXIII, 63 f.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista
de tabelas.

1. Hidrogênio verde. 2. Energia renovável. 3. Energia solar. I.
Ferreira, Maria Isabel Araújo. II. Belchior, Fernando Nunes, orient. III.
Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DECLARAÇÃO

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

CURSO		
<input checked="" type="checkbox"/> Eng. Elétrica	<input type="checkbox"/> Eng. Mecânica	<input type="checkbox"/> Eng. de Computação
		<input type="checkbox"/> Projeto Final I <input type="checkbox"/> Projeto Final II

TÍTULO DO TRABALHO	
Hidrogênio como potencial elétrico e energético	
BANCA AVALIADORA	
Membro 1:	Prof. Dr. Marcelo Stehling Castro (EMC/UFG)
Membro 2:	Prof. Dr. Antônio Melo de Oliveira (EMC/UFG)
Membro 3:	Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior (Orientador - FCT/UFG)
ESTUDANTE	
Matrícula	Nome
201800817	Lisandra Craveiro da Silva
201700294	Maria Isabel Araújo Ferreira

NOTAS										
Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Média
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	Final
201800817	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
201700294	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0

NPT – Nota plano de trabalho; NTE – Nota do trabalho escrito; NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORINETADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 16/02/2023, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Stehling De Castro, Professor do Magistério Superior**, em 16/02/2023, às 19:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Melo De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 17/02/2023, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3470405** e o código CRC **496F0E58**.

RESUMO

No atual contexto climático, é fundamental que novas fontes de energia renováveis sejam não apenas desenvolvidas, mas tenham sua aplicação viabilizada em termos de segurança e constância para o usuário. Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta uma pesquisa sobre a utilização do hidrogênio verde como uma dessas fontes. O hidrogênio é o elemento químico mais abundante que existe, sua utilização em sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica é uma promissora alternativa que vem ganhando destaque nos últimos anos, inclusive no Brasil. O objetivo desta pesquisa é apresentar os principais conceitos relacionados ao hidrogênio verde e sua associação com a energia solar. Para isso, foi realizada uma revisão integrativa da literatura com busca nas bases Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, *IEEE Xplore*, *Scielo*, *Scopus* e *Web of Science*. A amostra contabilizou 305 artigos publicados entre 2019 e 2023. Os resultados desses estudos foram agrupados em três categorias: processo de obtenção do hidrogênio verde, impactos ambientais e dificuldades na implementação do sistema de produção. A segunda etapa da produção desta monografia é construída através da reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica. Para isto, usa-se como base a tese de doutorado “Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula à Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia” (Silva, Sérgio; 2010), desenvolvido na Universidade de Brasília, pelo departamento de engenharia elétrica. Conclui-se que é possível a reprodução da metodologia de cálculo utilizada nessa produção para demais localidades do Brasil. Para obtenção dos dados referentes à radiação solar, a plataforma CRESESB pode ser consultada como fonte, pois sua base possui dados referentes a diversas regiões brasileiras.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Energia Solar. Energia Renovável. Geração Distribuída. Hidrogênio. Sistemas de Geração.

ABSTRACT

In the current climate context, it is fundamental that new sources of renewable energy are developed and have their application made possible for the user in terms of security and constancy. This final project presents research about the use of hydrogen as one of these sources. Hydrogen is the most abundant chemical element on the planet, its use in electric energy generation and storage systems is a promising alternative that has been gaining prominence in recent years, including in Brazil. The objective of this research is to present the main concepts related to green hydrogen and its association with solar energy. For this, an integrative literature review was carried out with a search in the Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, *IEEE Xplore*, Scielo, Scopus and Web of Science databases. The sample included 305 articles published between 2019 and 2023. The results of these studies were grouped into three categories: green hydrogen accessibility process, environmental impacts and difficulties in implementing the production system. The second stage of the production of this monograph is built through the reproduction of calculations for the dimensioning of the hybrid photovoltaic generation system. For this, the doctoral thesis “Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula à Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia” (Silva, Sérgio; 2010), developed at the University of Brasília, by the electrical engineering department. It is concluded that it is possible to reproduce the knowledge methodology used in this production for other locations in Brazil. To obtain data regarding solar radiation, the CRESESB platform can be consulted as a source, as its base has data referring to several Brazilian regions.

Keywords: Green Hydrogen. Solar Energy. Distributed Generation. Generation Systems. Hydrogen. Renewable energy.

AGRADECIMENTO CONJUNTO

De forma honrosa, agradece-se ao professor Dr. Fernando Nunes Belchior pelo aceite do desafio de orientação em uma área de conhecimento com tantas possibilidades de desdobramento científico. Ele exerceu um papel fundamental para a consolidação deste trabalho de pesquisa.

Outrossim, felicitam-se os outros membros da banca pela ilustre presença neste momento de comemorações e encerramento de um ciclo de aprendizado, professores Dr. Marcelo Stehling de Castro e Dr. Antônio Melo de Oliveira.

Este trabalho é resultado de muitos esforços, coletivos e individuais. Portanto, expressa-se a gratidão por todos que colaboraram positivamente no período de graduação, agregando ensinamentos e conhecimentos raros.

*“Se sabeis que Ele é justo, sabeis que todo aquele que pratica a justiça é nascido dele.” –
João 2:29.*

AGRADECIMENTOS INDIVIDUAIS

A Deus, em primeiro lugar, por sempre me dar forças para continuar e guiar meus caminhos concedendo muitas bênçãos.

Aos meus pais, José e Adélia, e aos meus irmãos, Carla e Cassino que, perto ou longe, sempre me incentivaram, acreditando em mim e me enchendo de amor. Sem isso, com certeza, não teria conseguido.

Agradeço, também, ao meu primo, Tiago, que desde o início me apoiou de todas as formas e foi uma peça fundamental na minha formação.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram comigo durante essa trajetória, em especial, à Elana Tanan, José Pereira, Vinicius Faria, Amanda Vieira e Marcelo Pinheiro, companheiros para toda a vida.

Ao professor Fernando Belchior, orientador deste trabalho, pela paciência, dedicação e atenção durante todo o desenvolvimento do trabalho e a Maria Isabel pelo período que passamos juntas na graduação.

- Lisandra

Agradeço a Deus por olhar e cuidar dos caminhos da minha trajetória e me abençoar sempre de forma generosa.

A minha mãe por dedicar sua vida ao meu desenvolvimento e por sempre acreditar que a educação é uma força transformadora de realidades. Obrigada pelo amor incondicional, por ser a base da nossa família e por inúmeras vezes colocar meu bem-estar acima do dela próprio. Com certeza sem ela não teria chegado tão longe e não seria metade da pessoa que sou hoje.

A minha irmã Ana Carolina, por estar sempre ao meu lado independentemente do que aconteça cuidando de mim e me apoiando nos momentos mais difíceis. Obrigada por todo amor e carinho.

A minha irmã de outra mãe Russany que é a prova de que Deus coloca anjos na nossa vida para nos guiar nos momentos de dificuldades. Obrigada por acreditar em mim até mesmo nos momentos em que nem eu mesma acreditava e por estar sempre ao meu lado.

A Luciana Madeleine e Alana Beatriz por estarem por mim nessa fase final da graduação oferecendo todo apoio necessário. Vocês são provas do quanto a amizade pode ser generosa.

Por fim, ao professor Fernando Belchior que nos deu todo apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por passar tranquilidade nesse momento de grande nervosismo.

- Maria Isabel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética Mundial em 2020.....	21
Figura 2: Matriz Energética Brasileira em 2021.....	22
Figura 3: Matriz Elétrica Mundial em 2020.....	22
Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira em 2021.....	23
Figura 5: Eixos Temáticos do PNH ₂	28
Figura 6: Componentes básicos de um eletrolisador.....	30
Figura 7: Eletrolisador Alcalino.....	31
Figura 8: Eletrolisador PEM.....	32
Figura 9: Eletrolisador.....	32
Figura 10: Usos do hidrogênio.....	33
Figura 11: Fluxograma do processo de seleção dos artigos.....	39
Figura 12: Curva de carga utilizada no estudo.....	51

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Valores do fator de correção da capacidade de baterias chumbo-ácido em função da temperatura (NBR 14298/1999)	43
Tabela 2- Dados de radiação solar referente a cidade de Goiânia, Goiás	50
Tabela 3 - Rendimento do eletrolisador e CaC	51
Tabela 4 - Informações técnicas do módulo fotovoltaico utilizado	51
Tabela 5 - Valores obtidos através do dimensionamento	52
Quadro 1 - Quadro-síntese dos métodos de obtenção do hidrogênio verde identificadas na Revisão Integrativa da Literatura	46
Quadro 2 - Quadro-síntese das dificuldades de implementação da geração de energia através do hidrogênio verde	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABH ₂	Associação Brasileira do Hidrogênio
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
A_{FV}	Área requerida de módulos fotovoltaicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CaC	Célula a Combustível
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRESESB	Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CNPE	Conselho Nacional de Política Econômica
CNREH	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCHEA	<i>Fuel Cell & Hydrogen Energy Association</i>
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPHE	<i>International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy</i>
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MME	Ministério de Minas e Energia
NIPE	Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PNE	Plano Nacional de Energia 2050
ProCac	Programa Brasileiro de Células a Combustível
ProH ₂	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
SOE	<i>Solid Oxid Electrolyzers</i>
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
WICaC	Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. Fontes Renováveis.....	20
2.2. Geração Distribuída.....	22
2.3. Hidrogênio.....	23
2.4. Hidrogênio no Brasil	25
2.5. Produção de hidrogênio.....	28
2.6. Armazenamento e transporte de hidrogênio.....	32
2.7. Baterias de íon de lítio.....	35
2.8. Armazenamento de energia em célula a combustível.....	36
2.9. Considerações finais acerca da fundamentação teórica.....	36
3 METODOLOGIA	37
3.1. Revisão integrativa	37
3.2. Reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica em situação problema.....	39
3.2.1. Capacidade diária demandada pela carga.....	42
3.2.2. Capacidade ajustada em função da autonomia.....	42
3.2.3. Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga máxima permitida das baterias ($PD_{máx}$).....	42
3.2.4. Capacidade ajustada em função da $PD_{máx}$ diária.....	42
3.2.5. Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim da vida das baterias.....	42
3.2.6. Capacidade ajustada em função da PD (profundidade de descarga) (maior valor entre “3”, “4” e “5”).....	43
3.2.7. Capacidade ajustada em função da temperatura média de operação.....	43
3.2.8. Capacidade ajustada em função do fator de segurança.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Caracterização dos estudos.....	45
4.2. Processo de obtenção do hidrogênio verde.....	45
4.3. Dificuldades na implementação do sistema de produção.....	46
4.4. Impactos ambientais relacionados.....	47

SUMÁRIO

4.5. Reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica em uma situação problema.....	48
4.5.1. Dimensionamento do gerador fotovoltaico.....	49
5 CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE.....	62

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é responsável por uma grande parcela das emissões globais dos gases do efeito estufa (GEE). O setor energético responde por cerca de 65% dessas emissões (IPCC, 2014). O desafio posto ao enfrentamento do aquecimento global e seus problemas derivados aponta para a mitigação das emissões de GEE originada na conversão e uso da energia, sem deixar de atender às novas demandas associadas ao desenvolvimento do país. Todas as tecnologias de geração de eletricidade em alguma etapa de seu processo (exploração, transformação, distribuição, uso e descarte) vão gerar em maior ou menor escala impactos ambientais, perda de energia e custo (LIMA, 2019).

Uma forma de contribuir para a redução das pressões ambientais advindas do funcionamento dos sistemas energéticos, sem que comprometa o atendimento de demandas por energia, é ampliar o uso de fontes renováveis.

A utilização de fontes renováveis de energia permite diminuir em cerca de 35% as emissões de GEE necessárias até 2060 para que as metas do Acordo de Paris sejam cumpridas (IEA, 2017a). O Acordo de Paris, firmado por diversas nações na Conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre a mudança climática realizada em 2015 (COP21), estipulou metas para redução de emissões de GEE, de modo a limitar o aumento da temperatura média global em 2°C em relação aos níveis pré-industriais (EPE, 2016).

Dada a urgência da necessidade de ações para frear o aquecimento global, diversas nações planejam neutralizar as suas emissões de GEE até 2050, e a expansão da oferta de fontes renováveis para a produção energia elétrica é fundamental para a estratégia de substituição de parte dos combustíveis fósseis utilizados nesse setor. (JÚNIOR, 2021).

A principal desvantagem das tecnologias de energia renovável é a intermitência e sazonalidade das suas disponibilidades, que podem comprometer a qualidade da energia elétrica produzida e a confiabilidade do suprimento de eletricidade. A maior parcela de energia elétrica sendo fornecida por meio dessas fontes requer a adoção de soluções tecnológicas, como o armazenamento de energia (IRENA; 2020; IEA, 2017a).

As tecnologias de armazenamento de energia têm a capacidade de guardar a energia elétrica gerada em momentos em que a oferta de energia renovável é alta e a demanda é baixa, para, então, ser utilizada nos momentos em que a oferta é menor e a demanda é elevada, melhorando a confiabilidade do sistema (RIEDEL, 2019).

Atualmente, a tecnologia mais empregada para este tipo de armazenamento é a de acumuladores eletroquímicos, ou seja, baterias. Entretanto, este método de armazenamento

possui grandes restrições quanto aos procedimentos de carga e descarga elétricos e, mais importante, quanto ao peso e volume dos acumuladores necessários para o armazenamento de quantidades significativas de energia elétrica. Entre outras possibilidades, um método bastante discutido para o armazenamento de energia elétrica é na forma de hidrogênio (CARDOSO, 2019).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar, 2022), a fonte fotovoltaica está prestes a se tornar a segunda maior geradora de energia no Brasil, atrás apenas da matriz hídrica. Isso se dá graças às suas características únicas, principalmente em termos de versatilidade e potencial de redução contínua de custos. Ela é capaz de atender de forma sustentável a demanda crescente de eletricidade, principalmente de economias em crescimento nas regiões de elevados índices de irradiação solar.

A energia fotovoltaica não polui durante seu uso, as centrais necessitam de manutenção mínima, os painéis solares estão cada vez mais potentes e seu custo vem diminuindo, é ideal em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a ter investimento em linhas de transmissão. No entanto o rendimento da tecnologia é baixo, além do que durante a noite não existe produção alguma, o que obriga que existam meios de armazenamento da energia produzida durante o dia em locais onde os painéis solares não estejam ligados à rede de transmissão de energia (RUTHER, 2004).

Diante desse quadro negativo de estocagem da energia fotovoltaica, aparece como solução promissora a tecnologia de armazenamento de energia e com o elemento químico mais abundante do mundo, o hidrogênio. Quando o hidrogênio combinado com uma célula a combustível, oferece uma produção de eletricidade silenciosa, de alta eficácia e limpa, formando apenas como produto da reação a água e o calor, não havendo quaisquer emissões de partículas poluidoras (PINTO, 2014).

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a utilização do hidrogênio como vetor energético vem sendo estudada por diversos países como forma de solução para os problemas relativos ao esgotamento das reservas de combustíveis fósseis aliado aos problemas ambientais causados por esses combustíveis. Segurança energética e a redução dos impactos ambientais constituem os principais motivadores para a mudança de paradigma do setor energético.

O hidrogênio pode apoiar a segurança energética de várias maneiras. Quando implantado ao lado de uma infraestrutura de eletricidade, essa eletricidade pode ser convertida em hidrogênio e vice-versa. Sendo convertido a partir de outros combustíveis, possibilita aos usuários finais serem menos dependentes de recursos de energia específicos e aumenta a

resiliência do abastecimento de energia. A economia do hidrogênio é uma proposta de economia futura baseada no uso do hidrogênio como fonte de energia.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, o Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas excelentes e favoráveis para geração de energia elétrica através de fontes eólicas, solar e hídricas.

À vista deste panorama, esta monografia tratará de um estudo a respeito do hidrogênio, apresentando os conceitos básicos associados ao hidrogênio verde tais como: o que é, como a energia advinda dele pode ser produzida e como é o processo de armazenamento e transporte. Ainda será apresentado um estudo sobre o dimensionamento de componentes de sistemas híbrido (solar fotovoltaico e hidrogênio), mostrando assim os custos para implantação e levantando o questionamento sobre sua viabilidade econômica.

Os capítulos a seguir têm as seguintes constituições: a Fundamentação Teórica tem como objetivo explicitar os principais conceitos utilizados na realização do estudo e criar uma ambientação, enquanto a Metodologia apresenta e descreve os métodos e critérios utilizados ao longo do estudo e o motivo das decisões tomadas. Em Resultados e Discussão, aplica-se uma demonstração prática da utilidade do estudo, e, por último, na Conclusão, há considerações finais acerca do trabalho feito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

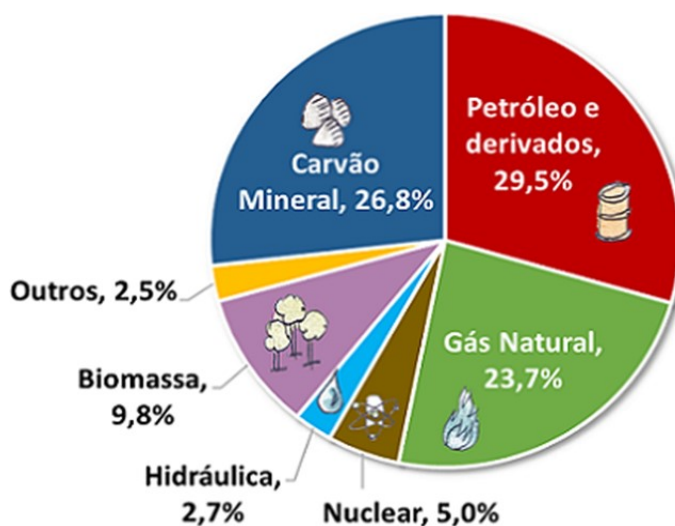
Neste capítulo serão apresentados os conceitos e informações base utilizados ao longo deste documento de trabalho final de curso.

2.1. Fontes Renováveis

Energia renovável é uma expressão usada para descrever uma ampla gama de fontes de energia que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica. As fontes renováveis podem ser utilizadas para gerar eletricidade, para gerar calor ou para produzir combustíveis líquidos para o setor de transportes (BNDES, 2005). Atualmente, essas fontes têm sido cada vez mais inseridas nas políticas energéticas dos países, já que exercem um papel importante para a sustentabilidade.

A matriz energética é o conjunto de fontes disponíveis em um país, estado ou no mundo para suprir a demanda de energia. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e, como mostra a Figura 1, a matriz energética mundial é formada em sua maioria por recursos não renováveis, como o petróleo, carvão e gás natural (EPE, 2022).

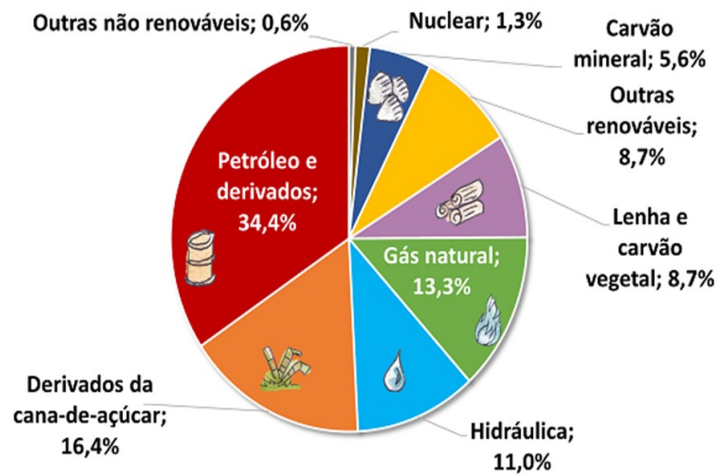
Figura 1: Matriz Energética Mundial em 2020



Fonte: IEA (2022)

Ainda segundo a EPE, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, no Brasil se utiliza mais fontes renováveis que no resto do mundo, conforme a Figura 2.

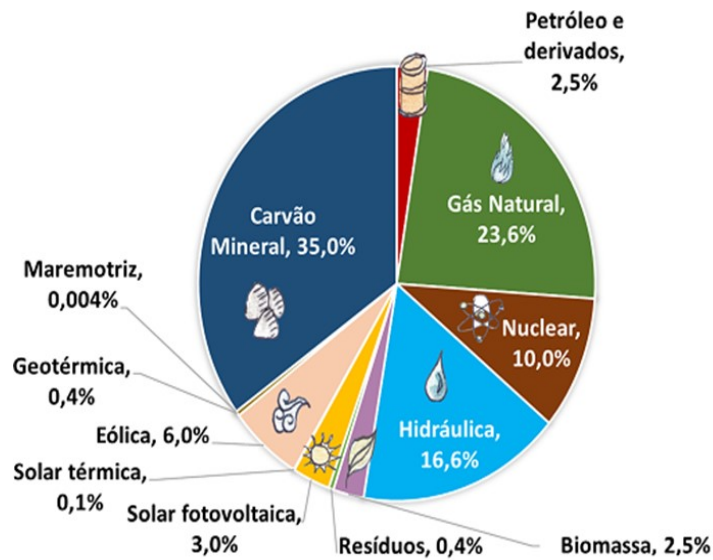
Figura 2: Matriz Energética Brasileira em 2021



Fonte: BEN (2022)

Já a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo. A Figura 3 mostra a distribuição da matriz elétrica mundial, que, segundo a EPE, é baseada principalmente em combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás natural, em termelétricas.

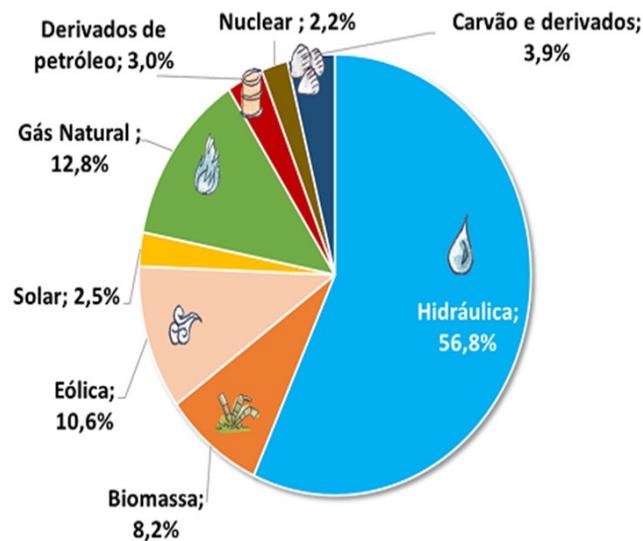
Figura 3: Matriz Elétrica Mundial em 2020



Fonte: IEA (2022)

A matriz elétrica brasileira, conforme mostra a Figura 4, é ainda mais renovável que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas (EPE, 2022).

Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira em 2021



Fonte: BEN (2022)

As várias fontes renováveis de energia, além de serem classificadas como opções ambientalmente corretas, pois emitem menos gases de efeito estufa (GEE), permitem, em vários casos, a geração distribuída de energia.

2.2. Geração Distribuída

Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética, a GD inclui: Cogeneradores; Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo; Geradores de emergência; Geradores para operação no horário de ponta; Painéis fotovoltaicos e Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs. Essa tecnologia permite a operação dos geradores e o eventual controle de cargas para que estas se adaptem à oferta de energia.

A evolução da geração distribuída se dá pelo fato dela possibilitar a redução nas perdas no sistema de distribuição, aumentando sua eficiência; permitir o uso de insumos regionais para geração de energia; pela necessidade de busca da redução tarifária; da necessidade de aumento da eficiência em processos industriais; além de possibilitar que comunidades isoladas tenham acesso à energia elétrica e reduzir os riscos de instabilidade, pois é ligada em paralelo à rede (DRIEMEIER, 2009).

As fontes locais e renováveis de energia também podem ser utilizadas de forma complementar, formando um Sistema Híbrido de Energia. Segundo definição adotada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Central Geradora Híbrida faz referência à instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração. Ela é objeto de outorga única, com medições distintas por tecnologia de geração ou não.

2.3. Hidrogênio

O hidrogênio (H_2) é um gás incolor e inodoro. Sua densidade a $0\text{ }^\circ\text{C}$ e 1 bar é $0,08987\text{ kg.m}^{-3}$, com poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI), respectivamente, de $141.880\text{ kJ.kg}^{-1}$ e $119.960\text{ kJ.kg}^{-1}$, sendo muito atraente para aplicações energéticas (SILVA, 1991). Como está sempre ligado a outros elementos químicos, é necessária a utilização de energia no processo de obtenção. Isso resulta em perda de eficiência, quando comparado com outras tecnologias, como às baterias eletroquímicas. As baterias são consideradas métodos diretos de armazenamento de eletricidade (IEA, 2015).

O hidrogênio pode ser produzido por meio de vários processos, associados a diversos tipos de emissões, dependendo da tecnologia e da fonte de energia utilizada, com diferentes implicações de custos e requisitos de materiais. Nesse sentido, a Comissão Europeia (2020) definiu os seguintes conceitos utilizados na classificação do hidrogênio, de acordo com a sustentabilidade do seu processo produtivo (BEZERRA, 2021):

- **Hidrogênio baseado em eletricidade:** refere-se ao hidrogênio produzido através da eletrólise da água (em um eletrolisador, alimentado por eletricidade), independentemente da fonte de eletricidade;
- **Hidrogênio renovável:** é o produzido através da eletrólise da água (em um eletrolisador, alimentado por eletricidade), e com a eletricidade proveniente de fontes renováveis;
- **Hidrogênio baseado em fósseis:** refere-se ao hidrogênio produzido através de uma variedade de processos, usando combustíveis fósseis como matéria-prima, principalmente, a reforma do gás natural ou a gaseificação do carvão.
- **Hidrogênio de base fóssil com captura de carbono:** é uma subparte do hidrogênio de base fóssil, em que os gases de efeito estufa emitidos como parte do processo de produção de hidrogênio são capturados; e

- **Hidrogênio de baixo teor de carbono:** abrange o hidrogênio baseado em fósseis, com captura de carbono e hidrogênio baseado em eletricidade, com emissões de gases de efeito estufa de ciclo de vida significativamente reduzidas em comparação com a produção de hidrogênio existente.

Porém, a diferenciação do hidrogênio por teor de carbono associado à sua produção tem implicações diferentes em termos de contribuições à mitigação das emissões de GEE e prevenção das mudanças climáticas globais. Nesse contexto, ainda que sob o ponto de vista técnico possa ser mais apropriado diferenciar o hidrogênio através de um índice que reflita o teor de carbono associado à sua produção, correntemente tem-se buscado diferenciar essa origem de produção através do uso de jargões com referência à distinção de cores (IEA, 2019a):

- **Hidrogênio marrom:** produzido do carvão mineral sem a captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS, na sigla em inglês);

- **Hidrogênio cinza:** produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, sem CCUS;

- **Hidrogênio azul:** produzido a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, mas com CCUS;

- **Hidrogênio verde (hidrogênio renovável):** produzido por eletrólise, com eletricidade oriunda de fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, geotérmica, marés, dentre outras.

A demanda global por hidrogênio cresceu mais de três vezes desde 1975 e continua a aumentar – quase inteiramente fornecida por combustíveis fósseis, com 6% do gás natural global e 2% do carvão global indo para a produção de hidrogênio. Como consequência, a produção de hidrogênio é responsável por emissões de CO₂, aproximadamente 830 milhões de toneladas por ano, o equivalente às emissões de CO₂ do Reino Unido e da Indonésia juntos (IEA, 2019).

Em meio às discussões cada vez mais frequentes acerca da necessidade de redução das emissões de carbono, cresce a procura por opções viáveis para substituição de combustíveis fósseis. O hidrogênio verde é apontado como a maior aposta para uma produção industrial mais sustentável (REVISTA BRASILEMANHA, 2021).

A maneira mais limpa de produzir hidrogênio, denominado de hidrogênio verde, é por meio da eletrólise da água associadas a fontes renováveis de energia. Neste processo, a molécula de água é clivada em moléculas de hidrogênio e oxigênio através da passagem de uma corrente elétrica contínua. Embora seja uma tecnologia bem estabelecida para geração de H₂ de forma limpa, o custo é alto devido ao uso de uma corrente contínua para a realização dessa reação

endotérmica (CONTE et al., 2001; KALAMARAS; EFSTATHIOU, 2013; SANTOS; SEQUEIRA, 2013).

Enquanto aumenta a pressão por novas alternativas energéticas para substituir combustíveis fósseis e carvão, e avançar na eletrificação, cresce também a urgência de uma economia para o hidrogênio de baixo carbono. Entre os principais países que atuam no setor de hidrogênio, destacam-se a Alemanha como grande importador, bem como a Austrália e o Chile como grandes exportadores. A China é o maior produtor de hidrogênio do mundo, com uma produção anual de cerca de 33 milhões de toneladas, quase em sua totalidade de origem fóssil, entretanto possui um objetivo de produção anual de H₂V de 100 mil a 200 mil toneladas até 2025 (CHIAPPINI, 2022). O plano de desenvolvimento de energia a partir do hidrogênio para o período 2021-2035 pretende reduzir as emissões de CO₂ de 1 milhão a 2 milhões de toneladas por ano.

2.4. Hidrogênio no Brasil

No Brasil, os recursos naturais renováveis são abundantes. Então, o desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio certamente contribuirá para uma utilização mais eficiente dessas fontes energéticas, além de possibilitar uma participação importante no mercado mundial de equipamentos e serviços relacionados às energias renováveis e ao hidrogênio. A seguir será apresentada a evolução do hidrogênio no Brasil:

- 1998: criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH);
- 2002: foi instituído pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCac), tendo como objetivo “organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada”. Posteriormente, em 2005, esse Programa passou por reformulação, recebendo o nome de Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH₂);
- 2003: o país tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (*International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*), visando trocar informações governamentais, industriais e acadêmicas no assunto de células a combustível e o hidrogênio na sociedade;
- 2005: o Ministério de Minas e Energia (MME), em decorrência da iniciativa da IPHE, lançou um roteiro para estruturação da economia do hidrogênio no Brasil. O roteiro

ênfatizava o uso industrial (indústrias de aço, fertilizantes, entre outras) e previa a geração de hidrogênio a partir de energias renováveis, incluindo a gaseificação da biomassa, a reforma do etanol e a eletrólise da água por energia solar, eólica e hidrelétrica;

- 2010: publicação do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) denominada “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”. Além de propor ações de curto (0 a 5 anos), médio (5 a 10 anos) e longo prazo (10 a 15 anos), o documento se apresenta no formato de propostas em quatro frentes de atuação: 1. Recomendações gerais para o incentivo à economia do hidrogênio; 2. Recomendações para o incentivo à produção do hidrogênio; 3. Recomendações para o incentivo ao desenvolvimento da logística do hidrogênio; e 4. Recomendações para o incentivo aos sistemas de utilização do hidrogênio;

- 2012: Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC), uma apresentação do MCTI mostrou algumas questões importantes após dez anos de investimentos em projetos;

- 2017: foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH₂), com o objetivo de fomentar a cadeia da produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio para fins energéticos no território brasileiro;

- 2020: o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, elencando diversos usos e aplicações, além de trazer recomendações para a política energética, entre as quais se podem destacar o adequado desenho do arcabouço jurídico-regulatório, que incentive a entrada de tecnologias aplicáveis à cadeia energética do hidrogênio como um todo (produção, transporte, armazenamento e consumo); e

- 2021: a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou as “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio”, em que apresentou o panorama do mercado de hidrogênio; rotas tecnológicas e processos de geração do hidrogênio; custos e aspectos competitivos do hidrogênio; desafios para desenvolvimento do mercado de uso energético do hidrogênio; papel do hidrogênio na transição energética e implicações de políticas públicas.

Nesse mesmo ano, ainda, foram publicadas duas resoluções pelo Conselho Nacional de Política Econômica (CNPE). A primeira, Resolução CNPE nº 2 de 2021, estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia, em áreas como hidrogênio, armazenamento, transformação digital, biocombustíveis, entre outras. Já a segunda,

Resolução CNPE nº 6 de 2021, institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências sobre o tema.

De acordo com essa resolução, o Ministério de Minas e Energia (MME) apresentou uma proposta com diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂). O estudo foi realizado em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR) e contou com o apoio técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). O programa se desdobra em seis eixos temáticos, sendo que diversas ações já foram iniciadas, incluindo a cooperação internacional e estudos de planejamento energético com foco no papel do hidrogênio no Brasil (EPE, 2021). A Figura 5 mostra um esquema desses eixos.

Figura 5: Eixos Temáticos do PNH₂



Fonte: EPE (2021)

Em 2021, o governo brasileiro, em uma parceria do Ministério de Minas e Energia, do Ministério de Relações Exteriores e da Empresa de Pesquisa Energética, com apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, do Ministério da Educação e outros importantes parceiros, também lançou o Pacto Energético (Energy Compact) para o Hidrogênio, que representa um compromisso voluntário de promoção do desenvolvimento desse mercado, como forma de acelerar a redução de emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2021). Por fim, em 2022, foi apresentado um projeto de lei que disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, estabelecendo parâmetros de incentivo ao uso.

2.5. Produção de hidrogênio

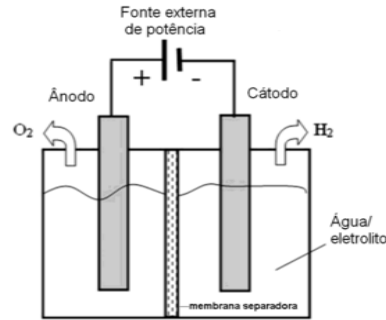
A produção global de hidrogênio é dominada pelo uso de combustíveis fósseis. O hidrogênio eletrolítico, produzido a partir de água e eletricidade, desempenha um papel menor. Com custos decrescentes para energia renovável, em particular solar fotovoltaico e eólico, o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de hidrogênio e sua conversão em combustíveis à base de hidrogênio ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que hidrogênio com a infraestrutura existente (IEA, 2019).

Os processos mais comuns de produção de eletricidade a partir do H₂ são a reformação e a eletrólise. A primeira funciona por meio da aplicação de altas temperaturas, em que o vapor reage com um combustível hidrocarboneto (gás natural, diesel, carvão etc). A eletrólise ocorre através de um eletrolisador, que usa uma corrente elétrica para separar a água em hidrogênio e oxigênio (OLIVEIRA, 2022).

O eletrolisador é o equipamento responsável pelo processo de eletrólise da água, podendo operar satisfatoriamente com um fornecimento variável de eletricidade e uma eficiência de conversão superior a 85% (GAMBETTA, 2010). Os eletrolisadores podem ser instalados perto da fonte de energia, evitando, desse modo, a necessidade de linhas de transmissão.

Processo eletrolítico é todo aquele em que reações químicas são desencadeadas a partir de uma fonte eletromotriz, no qual a tensão e a corrente são fornecidas através de eletrodos separados por um meio condutor iônico. Um processo eletrolítico que usa eletrodos inertes em meio condutor ácido ou básico, aquoso, em que os produtos das reações desenvolvidas são apenas o hidrogênio e o oxigênio, isto é, cujo balanço das reações químicas resulta unicamente na decomposição da água, é denominado eletrólise da água (SILVA, 1991). A Figura 6 mostra os componentes básicos de um eletrolisador, que incluem dois eletrodos (ânodo e cátodo) e uma fonte externa de potência.

Figura 6: Componentes básicos de um eletrolisador



Fonte: WANG et al (2012)

Conforme o NREL (2009), os sistemas eletrolíticos precisam de eletricidade para o processo de eletrólise e outros equipamentos auxiliares e periféricos como água de resfriamento para a unidade geradora de hidrogênio, gás de pressurização e gás inerte.

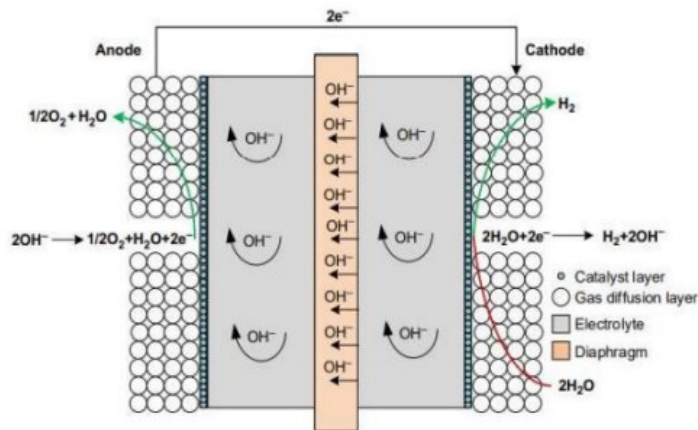
De acordo com o tipo de eletrólito adotado, existem três principais tipos de eletrolisadores comerciais: alcalino, de Membrana de Troca de Prótons (PEM) e de Óxido Sólido, e dois tipos de eletrolisadores industriais que operam a baixa temperatura são produzidos atualmente: unipolar e bipolar.

Um eletrolisador unipolar apresenta desenho de tanque e possui os eletrodos conectados em paralelo. Esse desenho corresponde a um sistema de alta corrente e baixa voltagem com uma única barra conectando todos os ânodos e outra barra conectando todos os cátodos. A membrana envolve cada cátodo ou ânodo separando o hidrogênio e o oxigênio, que são gerados cada um em ambos os lados dos eletrodos. O eletrolisador alcalino bipolar possui desenho de filtro prensa. As células eletrolíticas são conectadas em série. O hidrogênio é produzido num lado do eletrodo e o oxigênio do outro, sendo que a membrana separa os eletrodos entre si. O eletrolisador bipolar é um dispositivo de elevada voltagem e baixa corrente em relação ao arranjo unipolar. A maioria dos eletrolisadores comerciais alcalinos usa o desenho bipolar.

Os eletrolisadores alcalinos utilizam uma solução eletrolítica líquida, como hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio e água. O hidrogênio é produzido em uma célula constituída por um ânodo, um cátodo e uma membrana. As células costumam ser montadas em série para produzir mais hidrogênio e oxigênio ao mesmo tempo. Quando a corrente é aplicada na pilha eletrolítica, os íons hidróxidos se movem através do eletrólito do cátodo para o ânodo de cada célula, gerando bolhas de gás hidrogênio no lado do cátodo do eletrolisador e gás oxigênio no ânodo (SOUTO; NOGUEIRA, 2022).

O eletrolisador tipo alcalino tem uma tecnologia madura e amplamente utilizada para aplicações industriais de larga escala desde 1920. Estes sistemas estão disponíveis comercialmente, são duráveis e exibem custo de capital relativamente baixo devido à pouca utilização de metais nobres, uso de matérias convencionais e fabricação mais simples que os demais (ZENG; ZHANG, 2010; CARMO et. al., 2013). No entanto, a baixa densidade de corrente e as menores pressões de operação afetam negativamente o tamanho do sistema e os custos de produção de hidrogênio. Além disso, a operação dinâmica (partidas frequentes e entrada de energia variável) pode reduzir negativamente a eficiência do sistema e a pureza do gás (LEHNER et. al., 2014). A Figura 7 mostra esse tipo de eletrolisador.

Figura 7: Eletrolisador Alcalino

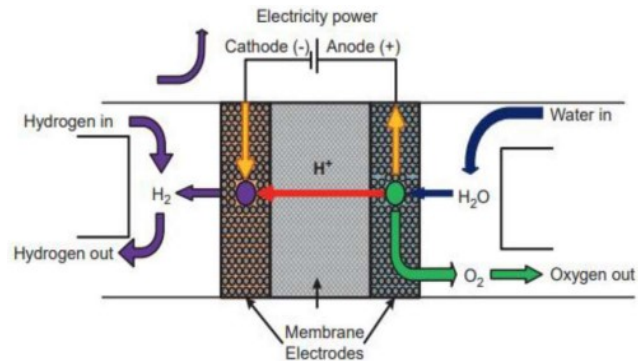


Fonte: MAHAN (1980)

Um tipo de eletrolisador bipolar avançado é o eletrolisador de eletrólito sólido polimérico. Tais sistemas também são denominados como eletrolisadores de membrana trocadora de prótons ou de membrana de eletrólito polimérico, PEM (*Proton Exchange Membrane*).

Os eletrolisadores PEM utilizam uma membrana de troca de prótons e um eletrólito polimérico sólido. Quando a corrente é aplicada na pilha, a água se divide em hidrogênio e oxigênio e os prótons do hidrogênio passam através da membrana para formar gás hidrogênio no lado do cátodo. São os mais populares porque produzem hidrogênio com alto grau de pureza e são fáceis de refrigerar. São os mais adequados para se acoplarem à variabilidade das energias renováveis, são compactos e obtêm um hidrogênio com alto grau de pureza. No entanto, são um pouco mais caros, pois utilizam metais preciosos como catalisadores (IBERDROLA, 2023). Os eletrolisadores PEM tipicamente usam o desenho bipolar (NREL, 2009). A Figura 8 mostra esse tipo de eletrolisador.

Figura 8: Eletrolisador PEM

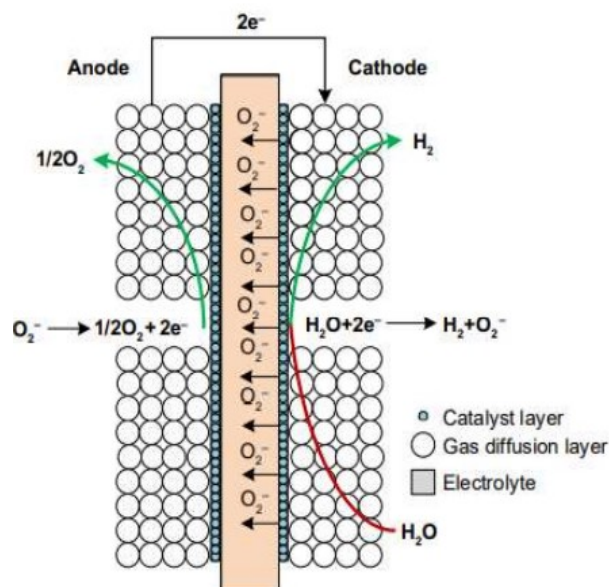


Fonte: MAHAN (1980)

O eletrolisador do tipo óxido sólido ou SOE (Solid Oxid Electrolyzers) tem a característica de eletrolisar a água em altas temperaturas, ou seja, em seu estado gasoso (600° C – 900° C), em comparação aos eletrolisadores alcalinos e PEM, o SOE possui a maior eficiência (URSUA ET AL., 2012).

Nos eletrolisadores do tipo óxido sólido, o processo se denomina eletrólise de alta temperatura (HTE) ou eletrólise do vapor de água e utiliza um material cerâmico sólido como eletrólito. Os elétrons do circuito externo são combinados com a água no cátodo para formar o gás hidrogênio e íons de carga negativa. O oxigênio então passa através da membrana cerâmica deslizante e reage no ânodo para formar gás oxigênio e gerar elétrons para o circuito externo. Tecnicamente, estão menos desenvolvidos que os anteriores (IBERDROLA, 2023). A Figura 9 mostra esse tipo de eletrolisador.

Figura 9: Eletrolisador



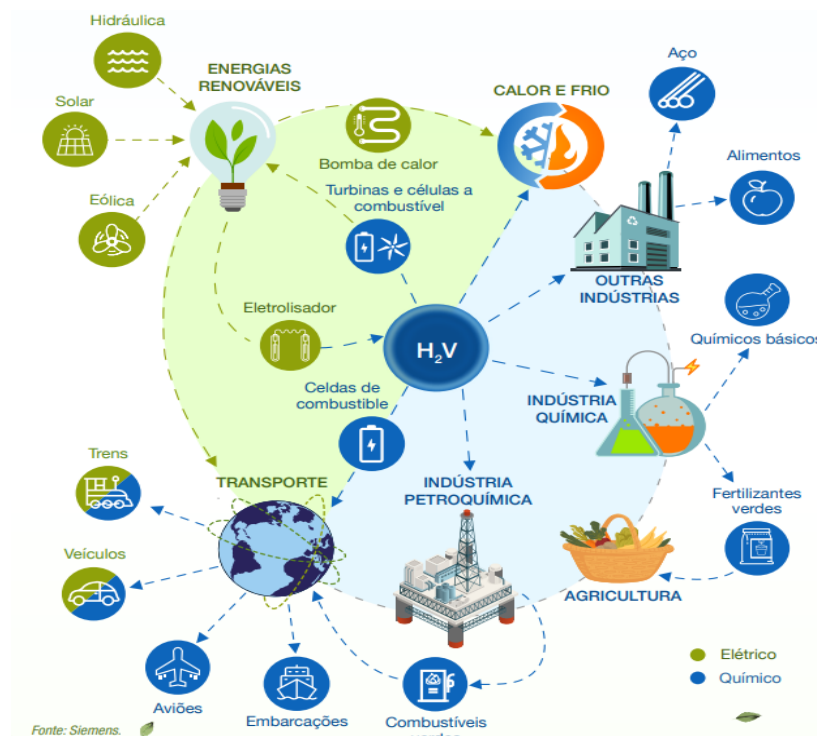
Fonte: MAHAN (1980)

2.6. Armazenamento e transporte de hidrogênio

O armazenamento e transporte de hidrogênio começaram a ser estudados muito antes do arranque da investigação sobre a sua utilização como vetor energético, uma vez que o hidrogênio tem sido largamente utilizado em várias indústrias químicas, na refinação do petróleo, tratamento de metais e aplicações elétricas. Existem vários sistemas de armazenamento de hidrogênio e a escolha da tecnologia a utilizar depende não só do fim a que se destina, mas de vários fatores.

Segundo a Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (FCHEA), uma vez criado o hidrogênio por meio da eletrólise, ele pode ser usado em células a combustível estacionárias, para a geração de energia elétrica, como combustível de veículos com células a combustível, podendo também ser injetado em tubulações de gás natural para reduzir a intensidade de carbono, ou mesmo armazenado como gás comprimido, líquido criogênico ou em uma ampla variedade de compostos de hidreto para uso posterior (FCHEA, 2019). A Figura 10 mostra de forma dinâmica alguns usos do hidrogênio.

Figura 10: Usos do hidrogênio



Fonte: IBERDROLA (2023)

O uso intensivo do hidrogênio como energético só foi cogitado, por poucos especialistas, na segunda metade dos anos 1970, durante o período conhecido como da Crise do Petróleo, iniciado com o primeiro Choque do Petróleo (1973-1979). Nesse período ocorreu o aumento do preço do petróleo e o controle de sua produção por parte da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Como nesta época a dependência de muitos países por petróleo era grande, houve várias tentativas por parte destes de substituir o petróleo por outras fontes de energia, sendo o hidrogênio considerado um vetor energético em diversos casos, principalmente para a regularização do suprimento das fontes intermitentes, como as renováveis. Portanto, o hidrogênio passou a ser uma alternativa economicamente viável em algumas aplicações, devido ao elevado preço dos derivados do petróleo. Entretanto, é importante ressaltar que nesta época o uso do hidrogênio como energético foi apresentado apenas como um substituto aos derivados do petróleo e não como resultado de uma preocupação ambiental (SANTOS, 2008).

O segundo Choque do Petróleo, ocorrido em 1979, ampliou a ideia do uso do hidrogênio como energético, mas a redução dos preços do petróleo no início dos anos 1980 fez com que esta e outras propostas de energias alternativas fossem preteridas (SANTOS, 2008).

Segundo Ennio Peres, coordenador do Laboratório de Hidrogênio e pesquisador do NIPE (Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético) da Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), o mundo está entrando na terceira onda do uso energético do hidrogênio. Ao contrário das outras duas, mais focadas no seu uso automotivo, esta abrange inúmeros setores industriais, que necessitam descarbonizar seus produtos e meios de produção.

A adoção de tecnologias de armazenamento de energia permite maximizar o aproveitamento das fontes renováveis, a partir da estocagem do excesso da oferta, quando há abundância na disponibilidade, para utilização em um momento oportuno. Além disso, estas podem ser empregadas para controlar picos de demanda, contribuindo para melhoria da qualidade da energia fornecida a um determinado equipamento ou processo, ou como fonte auxiliar de energia na ausência da alimentação principal (IEA, 2017a).

Existem diversos processos para permitir que o hidrogênio possa ser armazenado e/ou transportado e estar pronto para ser consumido comercialmente.

A armazenagem na forma gasosa ou líquida são atualmente as únicas categorias empregadas em escalas mais significativas. São as várias possibilidades de armazenamento do hidrogênio:

- Hidretos Metálicos: consiste em armazenar o hidrogênio no estado sólido. Esta rota incentivou o desenvolvimento de baterias em que o hidrogênio é absorvido em uma liga,

como as baterias de níquel-hidretos metálicos, que são utilizadas em eletrônicos como celulares e câmeras digitais (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2023; AMBROSIO; TICIANELLI, 2001). Atualmente, os hidretos metálicos estão sendo foco de estudos e desenvolvimentos em um projeto da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com a finalidade de otimizar a tecnologia (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, 2019)

- Hidretos Químicos: se encontra em estado líquido, o que simplifica o seu transporte e a sua armazenagem. Portanto, os hidretos químicos sugeridos para a armazenagem de hidrogênio são produtos químicos frequentemente sintetizados a partir do gás natural, como o metanol e a amônia. A circunstância de já existir uma infraestrutura, ajuda na viabilização da produção e utilização desses produtos químicos (MAHAN, 1980);

- Adsorção: esta rota ainda está em fase de desenvolvimento e estudos preliminares. Até o momento, os adsorventes mais bem sucedidos foram alguns carvões ativados e estruturas metal-orgânicas (MAHAN, 1980);

- Liquefação: com o hidrogênio liquefeito, o armazenamento deve ser realizado em tanques criogênicos de estrutura complexa para minimizar a sua evaporação (MAHAN, 1980); e

- Compressão: O sistema de armazenagem de gás hidrogênio comprimido exige um alto capital investido, devido à necessidade de aumentar a sua densidade e o comprimir a pressão suficiente para armazená-lo em cilindros ou em depósitos subterrâneos de forma segura (MAHAN, 1980). A alternativa de compressão apresenta as mesmas características já conhecidas para o gás natural, sendo o uso de cilindros interessantes para o transporte rodoviário e como tanque de veículos. Já os depósitos subterrâneos seguem racional já conhecido da estocagem subterrânea de gás natural, sendo uma saída para armazenar o combustível em elevadas proporções.

Outra forma de comprimir o hidrogênio e que é muito relevante no armazenamento e transporte de grandes quantidades do combustível é o uso de compressores para injeção em gasodutos. Para se ter uma dimensão, pode-se armazenar até 12 toneladas de hidrogênio por km de gasodutos. Entretanto, a construção de infraestrutura dedicada ao hidrogênio é mais dispendiosa do que outros gases (como o gás natural) por necessitar de processos que aumentem a margem de segurança da armazenagem (MAHAN, 1980).

Os custos de transporte e armazenamento desempenham um papel significativo na competitividade do hidrogênio. Se o hidrogênio puder ser usado perto de onde é produzido, esses custos podem ser próximos de zero. Contudo, se o hidrogênio tiver que percorrer um

longo caminho antes de poder ser usado, os custos de transmissão e a distribuição podem ser três vezes maiores que o custo de produção do hidrogênio (IEA, 2019).

O emprego do hidrogênio como transportador de energia ou como combustível em grande escala exige que haja desenvolvimento em vários setores, inclusive produção, transporte, armazenamento e utilização em seus diversos meios, para que se mostre viável em larga escala. Mesmo com as dificuldades surgidas, o uso do hidrogênio continua a ser uma tecnologia almejada, uma vez que a sua matéria-prima pode ser água, e o resíduo de sua combustão também é água (SHERIF et al, 2005).

A opção mais indicada, tecnicamente, para o transporte do hidrogênio em dutos é a construção de uma infraestrutura nova e exclusiva para o H₂ puro, como já existe – ainda que de forma bastante limitada – nos Estados Unidos da América, Alemanha, Holanda, França e Bélgica. Entretanto, essa é uma opção que exige altos investimentos (TAVARES, 2021).

Uma alternativa para viabilizar o transporte do hidrogênio por dutos para as regiões demandantes é o reaproveitamento da rede de transporte de gás natural, processo que ainda está em fase inicial de estudos. Até então, o que já foi possível confirmar é que é segura a injeção de hidrogênio para uma mistura com o gás natural. Os níveis indicados, porém, podem variar dependendo da aplicação. Em princípio, uma concentração segura é de 10% de hidrogênio no volume total. Os principais projetos pilotos estão sendo realizados na Europa.

2.7. Baterias de íon de lítio

Inventadas na década de 1960, as baterias de Lítio são utilizadas atualmente em dispositivos eletrônicos e portáteis, dada sua elevada densidade de energia derivada da alta reatividade do lítio (SOUTO; NOGUEIRA, 2022). Além de ser capaz de armazenar grande capacidade de energia em um espaço compacto, outra vantagem da bateria de íon de lítio é a ausência do efeito memória, efeito que ocorre em baterias de níquel e cádmio, onde sem os devidos cuidados nas recargas há a perda na capacidade de armazenamento de energia as baterias (SOUTO; NOGUEIRA, 2022).

Em uma bateria de íon de lítio, os eletrodos são compostos por lítio, sendo o conjunto da bateria constituído por células que podem ser cilíndricas ou planas. Essas células são constituídas de polímeros empilhados e são categorizadas entre as células de polímero de lítio e as tecnologias de íon-lítio. Na última, os carbonatos orgânicos de lítio (LiPF₆) são utilizados como eletrólito. O eletrodo negativo é normalmente um óxido de metal de lítio como os LiMO₂,

LiCoO₂ or LiNiO₂ etc, enquanto o eletrodo positivo é feito de carbono grafite (AKINYELE ET AL., 2017).

2.8. Armazenamento de energia em célula a combustível

As células a combustível oferecem um potencial para geração de eletricidade mais limpo, silencioso e eficiente que os métodos tradicionalmente utilizados para realizar a mesma tarefa (motores-geradores e turbinas a gás). De forma geral, seu princípio de funcionamento consiste em converter a energia química do hidrogênio diretamente em eletricidade, promovendo a ligação eletroquímica do hidrogênio com oxigênio, produzindo energia elétrica e água (RIEDEL, 2019).

Estas células podem ser de vários tipos, de acordo com o eletrólito existente entre os eletrodos, sendo as mais utilizadas as de polímero eletrolítico (PEMFC), alcalino (AFC), ácido fosfórico (PAFC), carbonatos fundidos (MCFC) e óxido sólido (SOFC) (RIEDEL, 2019).

A utilização direta do hidrogênio em células a combustível, que promovem a eletrólise reversa, pode garantir eficiência e confiabilidade ao sistema de energia e auxiliar na integração do fornecimento renovável em todos os setores da sociedade (IEA HYDROGEN, 2017).

2.9. Considerações finais acerca da fundamentação teórica

Expostos todos os conceitos e teorias primordiais para o entendimento desta monografia, percebe-se que o material de estudo em questão tem contexto atual e total potencial de aplicação, conforme será apresentado nos capítulos a seguir. Contudo, o conceito teórico do assunto é somente uma das partes importantes, tendo este que ser necessariamente atrelado ao contexto de mercado e demais variáveis para que seja realizado. Por fim, deve haver, paralelamente, o estudo de viabilidade técnica e econômica.

3 METODOLOGIA

3.1. Revisão integrativa

O presente estudo foi realizado utilizando o método de revisão integrativa que consiste em um compilado de conhecimentos previamente descritos sobre determinada temática, com o objetivo de agrupar produções científicas diagnosticando o conhecimento atual sobre determinado objeto de estudo (SOUZA, M.T.; SILVA, M.D.; CARVALHO, R., 2010).

A revisão integrativa é estruturada em seis fases, sendo elas: definição da pergunta que será o cerne do estudo; definição dos materiais para pesquisa utilizando critérios de exclusão e inclusão de tais materiais a fim de obter referências que respondam à pergunta cerne. A terceira fase é a coleta de dados por meio de um instrumento previamente elaborado. A quarta fase consiste na análise dos dados coletados. Na quinta fase é feita a discussão dos resultados obtidos e, por fim, é apresentada a revisão integrativa, correspondente à sexta fase (SOUZA, M.T.; SILVA, M.D.; CARVALHO, R., 2010).

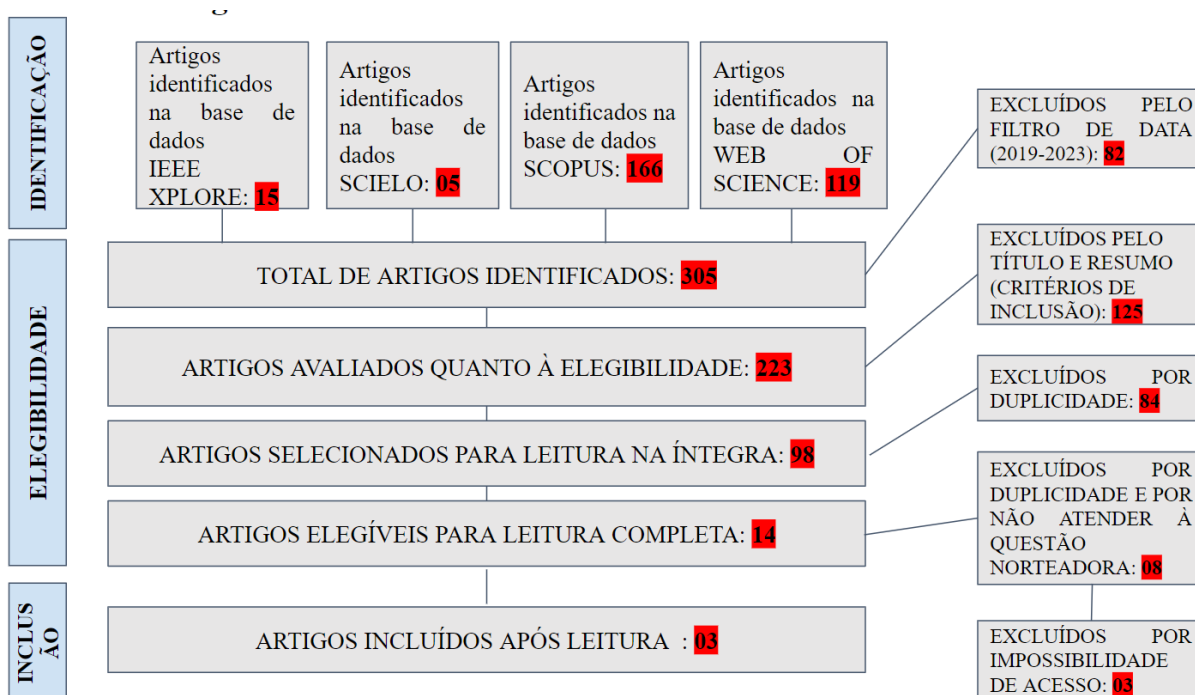
Seguindo as etapas de construção da revisão integrativa, busca-se responder a seguinte pergunta norteadora: Quais são os resultados científicos disponíveis acerca do modelo híbrido de geração de energia através da combinação do hidrogênio verde e energia solar, entre os anos de 2019 a 2023? Após tal fase, inicia-se a busca por produções científicas nos bancos de dados Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), *IEEE Xplore*, *Scielo*, *Scopus* e *Web of Science* utilizando dois mecanismos de busca: mecanismo 1 (“*green hydrogen AND energy*”) e mecanismo 2 (“*green hydrogen AND solar energy*”). Foram incluídos artigos originais publicados entre os anos de 2019 e 2023 que descrevessem a implementação do sistema híbrido de geração de energia utilizando o hidrogênio verde e a energia solar e que respondesse aos objetivos da pesquisa em todas as línguas disponíveis.

Para que fosse possível correlacionar as bases de dados Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, *IEEE Xplore*, *Scielo*, *Web of Science* e *Scopus* e executar o mesmo padrão de pesquisa dentro de cada uma, foi necessário buscar por um filtro que existisse nas 3 bases de dados, que foi o filtro de pesquisa por “título”. Dessa forma os descritores foram pesquisados adicionando essa opção que consiste em selecionar apenas as produções que possuísem em seu título as mesmas palavras dos descritores. A coleta de dados foi realizada através dos dois mecanismos citados anteriormente.

Foram encontrados 305 artigos nas bases de dados, sendo 15 artigos no *IEEE Xplore*, 05 artigos no *Scielo*, 166 artigos no *Scopus* e 119 artigos no *Web of Science*. Na base da BDTD

não foram encontrados resultados para os descritores utilizados. Aplicando o filtro de tempo mencionado, o número de artigos caiu para 223 no total, sendo 11 artigos no *IEEE Xplore*, 03 artigos no *Scielo*, 120 artigos no *Scopus* e 89 artigos no *Web of Science*. Destas, 125 produções foram excluídas por não atenderem aos critérios de inclusão. Foram encontrados 15 artigos duplicados entre os mecanismos 1 e 2 na *Scopus* e 13 na *Web of Science*. Comparando as quatro bases de dados, 55 artigos estavam duplicados, totalizando 84 artigos excluídos por duplicidade, finalizando a amostra com 14 artigos, como mostra a Figura 11.

Figura 11: Fluxograma do processo de seleção dos artigos



Fonte: próprias autoras (2023)

Ao finalizar a amostra com quatorze artigos, iniciou-se o processo de leitura e análise das informações. Nessa etapa, 8 artigos foram eliminados por não atenderem à pergunta norteadora e 3 foram classificados como “perdas” por não ser possível acessar esses artigos. Foram realizadas tentativas de acesso por meio das bases em que estavam publicados e sites que abrem documentos pagos. Constataram como inexistentes.

Na terceira fase, os dados foram coletados utilizando um instrumento de extração de dados pré-elaborado. Nele, constam as seguintes características: título do artigo, periódico de publicação, autores, país de origem do estudo, idioma, ano de publicação, tipo de estudo, nível de evidência Melnyk e Fineout-Overholt (2005), objetivo ou questão da pesquisa, variáveis de interesse, intervenção realizada, “o que a produção traz sobre a obtenção do hidrogênio verde e

sua associação com a energia solar (modelo híbrido)?”, dificuldades de implementação da geração de energia através do hidrogênio verde, principais resultados do estudo e por fim conclusões do estudo. Os resultados obtidos foram digitados em planilha eletrônica para melhor visualização.

Na quarta fase, os resultados foram analisados de forma estatística descritiva e também análise bibliográfica que consiste em compilar o conhecimento proveniente de cada produção observando, de forma crítica, as informações que cada autor traz sobre o assunto. A partir do instrumento de extração, utiliza-se as informações nele presente para apresentar os resultados em quadros, sínteses e gráficos. Por fim, na quinta e sexta fases, os dados foram confrontados com as produções científicas encontradas, possibilitando a síntese do conteúdo de maneira acessível.

3.2. Reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica em situação problema

A segunda etapa da produção desta monografia é construída através da reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica. Para isto, usa-se como base a tese de doutorado “Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula à Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia” (SILVA, Sergio; 2010), desenvolvido na Universidade de Brasília, pelo departamento de engenharia elétrica. O intuito dessa reprodução é demonstrar a aplicabilidade da metodologia de cálculo da tese para diferentes localidades.

Tendo em vista o ano de desenvolvimento da produção, nota-se que houve uma melhora significativa na eficiência dos módulos fotovoltaicos graças aos avanços tecnológicos. Levando isso em consideração, atualizar os valores de eficiência e verificá-los com os encontrados em SILVA, Sergio (2010), possibilita uma análise sobre como a eficiência dos componentes envolvidos no processo pode interferir no dimensionamento no sistema como um todo.

Para o dimensionamento dos componentes do sistema híbrido de geração distribuída é necessário conhecer as características da curva de carga e da radiação do local de instalação. A curva de carga é indispensável para entender as características do consumo, nela é representado o consumo de energia pelo tempo, possibilitando analisar os horários com maior e menor consumo de energia. Associando as informações de consumo e radiação local, pode-se dimensionar a capacidade máxima de energia do gerador fotovoltaico (SILVA, Sergio; 2010).

A quantidade total de energia produzida, que engloba o sistema fotovoltaico, a célula a combustível e a descarga das baterias, deve ser igual a quantidade de energia consumida que seria a carga do usuário, o eletrolisador, a carga das baterias e as perdas envolvidas (SILVA, Sergio; 2010).

Para reprodução deste estudo, considera-se, assim como na tese, que a geração e carga estão próximas e, por isso, as perdas nos condutores não serão aqui abordadas. O dimensionamento do gerador fotovoltaico é feito a partir de (1), sendo: A_{FV} , área requerida de módulos fotovoltaicos (m^2); $E_{cons\ dia}$ a média diária da energia consumida (kWh/dia); η_{total} o rendimento global do sistema híbrido de geração distribuída novo, levando em consideração a eficiência dos módulos fotovoltaicos, do sistema de hidrogênio e as conversões CC/CA; e $E_{s\ dia}$, a média diária da energia solar disponível no local (kWh/ m^2 /dia).

$$A_{FV} = \frac{E_{cons\ dia}}{\eta_{total} E_{s\ dia}} \quad (1)$$

A partir de (1), obtendo-se a área requerida de módulos fotovoltaicos, usa-se (2) para descobrir a potência total do sistema fotovoltaico, sendo: P_{FV} a potência total do sistema fotovoltaico nas condições padronizadas (kWp); G_o a radiação solar nas condições padronizadas ($1kW/m^2$); e η_{FV} o rendimento do módulo fotovoltaico em condições padronizadas.

$$P_{FV} = G_o \eta_{FV} A_{FV} \quad (2)$$

Em seguida, inicia-se o dimensionamento da célula a combustível. Para tal, adota-se que a potência nominal da CaC deverá ser prevista de acordo com a demanda máxima da carga acrescida de 10%, porcentagem essa que é devido às perdas nos inversores. O cálculo de P_{CaC} é feito como descrito em (3), sendo: P_{CaC} a potência nominal da CaC, em kW; e $P_{carga.máx}$ a potência máxima requerida pela carga.

$$P_{CaC} = 1,1 P_{carga.máx} \quad (3)$$

O próximo passo é o dimensionamento do eletrolisador. Para Labbé (2006), a potência nominal do eletrolisador deverá ser a diferença entre a potência máxima do sistema fotovoltaico em condições padrões e a potência mínima da carga multiplicado por um fator k , que depende do tipo de armazenamento do sistema. Caso o sistema possua seu armazenamento utilizando o

sistema de hidrogênio (que possui o eletrolisador e a célula a combustível) e o banco de baterias, esse fator k será de 0,8, para um sistema onde o armazenamento é feito apenas pelo hidrogênio o fator k utilizado é 1,0. Dessa forma, a potência nominal do eletrolisador é calculada em (4), sendo: P_{Elet} a potência nominal do eletrolisador, em kW; $P_{carga.máx}$ a potência mínima consumida pela carga, em kW; P_{FV} a potência nominal do sistema fotovoltaico, em kWp; e k , o fator de multiplicação do tipo de armazenamento do sistema.

$$P_{Elet} = k(P_{FV} - P_{carga.máx}) \quad (4)$$

Parte-se, agora, para o dimensionamento do reservatório de hidrogênio, para o tal deve-se descobrir o quanto de hidrogênio é necessário para o funcionamento do sistema quando o sistema fotovoltaico está em repouso (momento em que não há radiação solar). O mínimo de hidrogênio necessário para manter o consumo de energia está ligado à quantidade de energia consumida nesse período sem radiação solar, como representa (5), em que Γ_{H_2} é a quantidade de hidrogênio consumido diariamente (m^3H_2/dia); $\varepsilon_{Cons.Noite}$ é a energia consumida no período noturno (kWh); η_{CaC} é a eficiência da CaC; e PCI_{H_2} é o poder calorífico inferior do hidrogênio.

$$\Gamma_{H_2} = \left(\frac{\varepsilon_{Cons.Noite}}{\eta_{CaC}} \right) / PCI_{H_2} \quad (5)$$

$$PV = \eta RT \quad (6)$$

A pressão do reservatório pode ser calculada utilizando a equação dos gases ideais (6), em que P é a pressão, em atm; T é a temperatura, em Kelvin; V é o volume do reservatório, em litros; n é o número de mols; e R é a constante específica do hidrogênio, igual a 0,0821 J/K/mol.

Por fim, dimensiona-se o banco de baterias que vai ser utilizado junto à célula a combustível. Por ser um sistema de armazenamento híbrido, o banco de baterias pode ser reduzido se comparado a um sistema puramente fotovoltaico. As baterias aqui são também utilizadas para a inicial energização da CaC.

Para o dimensionamento do banco de baterias necessário ao sistema utilizou-se a norma NBR 14298/1999: Sistemas Fotovoltaicos – Banco de baterias – Dimensionamento e NBR 15254/2005: Acumuladores Chumbo ácido estacionário – Diretrizes para

dimensionamento. Inicia-se, então, os cálculos dos parâmetros que são 8 (oito) no total, conforme equações (7 a 14).

3.2.1. Capacidade diária demandada pela carga

A capacidade diária demandada pela carga é dada em (7), sendo C_{Ah} a capacidade ampère-hora diária demandada pela carga; e V_b a tensão nominal do banco de baterias.

$$C_{Ah} = \frac{E_{cons.dia}}{V_b} \quad (7)$$

3.2.2. Capacidade ajustada em função da autonomia

A capacidade ajustada em função da autonomia é dada em (8), sendo: $C_{Ah.a}$ a capacidade ampère-hora diária ajustada devido a autonomia do sistema; e D_A o número de dias de autonomia.

$$C_{Ah.a} = C_{Ah} D_A \quad (8)$$

3.2.3. Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga máxima permitida das baterias ($PD_{máx}$)

A ($PD_{máx}$) é dada em (9), sendo: $C_{Ah.a}$ a capacidade de ampère-hora diária ajustada devido a $PD_{máx}$ das baterias.

$$C_{Ah.PDmáx} = \frac{C_{Ah.a}}{PD_{máx}} \quad (9)$$

3.2.4. Capacidade ajustada em função da $PD_{máx}$ diária

A capacidade ajustada em função da $PD_{máx}$ diária é dada em (10), sendo: $PD_{máx.diária}$, a máxima profundidade de descarga admitida das baterias diariamente.

$$C_{Ah.PDmáx.diária} = \frac{C_{Ah.a}}{PD_{máx.diária}} \quad (10)$$

3.2.5. Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim da vida das baterias

A capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida das baterias é dada em (11), sendo: $PC_{Ah.pfv}$ a capacidade ampère-hora diária ajustada em função do percentual de capacidade em fim de vida; e pfv o percentual de capacidade em fim de vida das baterias.

$$C_{Ah.pfv} = \frac{C_{Ah.a}}{pfv} \quad (11)$$

3.2.6. Capacidade ajustada em função da PD (profundidade de descarga) (maior valor entre “9”, “10” e “11”)

A capacidade ajustada em função da PD (profundidade de descarga) (maior valor entre “9”, “10” e “11”) é dada em (12).

$$C_{Ah.PD} = maior[C_{Ah.PD_{máx}}, C_{Ah.PD_{máx.diária}}, C_{Ah.pfv}] \quad (12)$$

3.2.7. Capacidade ajustada em função da temperatura média de operação

A capacidade ajustada em função da temperatura média de operação é dada em (13), conforme Tabela 1, sendo $C_{Ah.T}$ a capacidade ampère-hora diária ajustada em função da temperatura; e F_T o fator de correção da capacidade associado à temperatura.

$$C_{Ah.T} = \frac{C_{Ah.PD}}{F_T} \quad (13)$$

Tabela 1 - Valores do fato de correção da capacidade de baterias chumbo-ácido em função da temperatura (NBR 14298/1999)

Temperatura do eletrólito °C	Fator de correção
-1,1	1,43
1,7	1,35
4,4	1,30
7,2	1,25
10	1,19
12,8	1,15
15,6	1,11
18,3	1,08
21,1	1,04
25,0	1,00
26,7	0,98
29,4	0,96
32,2	0,94
35	0,93
37,8	0,91
40,6	0,89
43,3	0,88
46,1	0,87
48,9	0,86
51,7	0,85

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14298: Sistema fotovoltaicos – Banco de baterias - Dimensionamento. Rio de Janeiro. 1999.

3.2.8. Capacidade ajustada em função do fator de segurança

A capacidade ajustada em função do fator de segurança é dada em (14), sendo $C_{Ah.S}$ a capacidade ampère-hora ajustada em função do fator de segurança; e F_S o fator de segurança da capacidade associado à temperatura.

$$C_{Ah.S} = \frac{C_{Ah.T}}{F_S} \quad (14)$$

Após o entendimento de como proceder com os cálculos, utiliza-se o *software Excel* para reproduzir os cálculos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos estudos

A análise dos 03 estudos selecionados permitiu identificar que 100% destes são de origem estrangeira, sendo 33,3% do continente europeu, 33,3% da Oceania e 33,3% do continente asiático. Em relação ao ano de publicação dos estudos, constatou-se que, no quinquênio em análise, 66,7% foram produzidos em 2022 e 33,3% em 2021, com o quantitativo respectivo de 2 e 1 trabalhos. Todos os documentos foram disponibilizados em língua inglesa (100%).

No que se refere à formação acadêmica do autor principal, a maioria foi desenvolvida por engenheiros mecânicos (66,7%) e, apenas 1 artigo incluído por engenheiro eletricitista (33,3%). Em relação ao tipo de revista científica, 1 estudo foi publicado em revista cujo tema cerne é engenharia e tecnologia (33,3%), os outros 2 estudos foram publicados em revistas com temas diversos (66,7%)

Ao analisar o delineamento de pesquisa dos estudos selecionados, foi verificado que nenhum segue um delineamento cientificamente reconhecido, por mais que um dos estudos traga uma abordagem experimental, não segue o delineamento desse tipo de produção.

No que concerne aos objetivos dos estudos, foram incluídas produções que abordassem o processo de obtenção do hidrogênio verde em associação com a energia solar (modelo híbrido de geração), impactos ambientais relacionados a esse processo e dificuldades de implementação. Os resultados desses estudos foram agrupados em três categorias: processo de obtenção do hidrogênio verde, impactos ambientais e dificuldades na implementação do sistema de produção.

4.2. Processo de obtenção do hidrogênio verde

Sobre o processo de obtenção do hidrogênio verde 100% citam apenas os processos de eletrólise de água alcalina, eletrólise membrana de polímero-eletrólito (PEM) e eletrólise de água de óxido de sólido. Duas produções (66,66%) trazem a tecnologia de eletrólise membrana de polímero-eletrólito (PEM) como a mais adequada para utilização na produção do hidrogênio advindo de fontes renováveis. Conforme PATEL et al.(2021):

O PEM é o eletrolisador mais usado para produção de hidrogênio renovável porque é mais confiável ao usar fontes de energia intermitentes e tem menor permeabilidade ao gás. Além disso, possui maior condutividade de prótons e menor espessura de membrana, quando comparado aos demais. Por fim, o PEM tem a faixa operacional de pressão mais alta e produz mais de 99% de hidrogênio puro, que é ainda maior quando combinado com um absorvedor de oscilação de pressão (PATEL et al., 2021, p. 202).

Sobre o processo de eletrólise de água alcalina, dois artigos (66,66%) trazem informações quanto ao seu uso. Para KARAYEL Kubilay G., JAVANI Nader (2021) e HERMESMANN M., MULLER TE (2022), essa tecnologia é a mais desenvolvida atualmente e conseqüentemente mais relevante comercialmente. Para KARAYEL Kubilay G., JAVANI Nader (2021) uma das vantagens da eletrólise de água alcalina é fornecer uma pressão de saída mais alta, além disso, sua eficiência é maior quando comparada ao eletrolisador PEM.

Todas as produções são consensuais quando se referem ao grau de pureza do hidrogênio obtido pelo eletrolisador PEM. Ele é o de maior pureza em relação aos outros processos.

Quadro 1 - Quadro-síntese dos métodos de obtenção do hidrogênio verde identificadas na Revisão Integrativa da Literatura

Autores e ano de publicação	Método de obtenção do hidrogênio
Hermesmann M.; Muller T.E.; 2022	Eletrólise de água alcalina, eletrólise membrana de eletrólito de polímero e eletrólise de água de óxido de sólido;
Harshal V. Patel; Saman A. Gorji; Shahrzad S. M. Shah; Jonathan G. Love; 2021	Eletrólise de água alcalina, eletrólise membrana de eletrólito de polímero e eletrólise de água de óxido de sólido;
G. Kubilay Karayel; Nader Javani; Ibrahim Dincer; 2022	Eletrólise de água alcalina, eletrólise membrana de eletrólito de polímero e eletrólise de água de óxido de sólido;

Fonte: próprias autoras.

4.3. Dificuldades na implementação do sistema de produção

Duas produções (66,66%) comentam sobre a dificuldade de implementação desse sistema de produção. HERMESMANN M., MULLER TE (2022) explica que, caso a energia

proveniente para alimentação da geração de hidrogênio venha de fontes renováveis, é necessário prever grandes quantidades de armazenamento de energia devido às interrupções temporárias de fornecimento que são atreladas à geração de fontes renováveis. Devido ainda a geração por energias renováveis, geralmente é necessário um superdimensionamento do eletrolisador, o que conseqüentemente pode acarretar aumento de custos. (HERMESMANN M., MULLER TE, 2022)

Uma outra dificuldade é citada por PATEL et al. (2021) que trata sobre a baixa eficiência dos eletrolisadores, reduzindo assim a eficiência geral do sistema.

4.4. Impactos ambientais relacionados

Como o processo de obtenção do hidrogênio verde é livre de emissão de CO₂, poucos trabalhos comentam sobre os impactos ambientais atrelados a esse processo. Dentro das produções incluídas apenas HERMESMANN M., MULLER TE (2022) discorre sobre questões ambientais associadas. Pela utilização de água no processo, haverá um aumento na demanda por água caso essa geração seja implantada em larga escala, necessitando de implantação de novas plantas de infraestrutura.

Além disso, no processo de eletrólise por meio de PEM segundo HERMESMANN M., MULLER TE (2022, p. 8) utiliza “materiais críticos escassos e caros, como platina, irídio e titânio, são necessários devido à sua resistência a altos potenciais no lado do ânodo e ao ambiente ácido corrosivo causado pelo ionômero condutor de prótons”. Isso em larga escala, poderia gerar um cenário de crise de fornecimento desses componentes e vindo a intervir na confiabilidade do sistema além de uma possível resistência na sua implantação.

Quadro 2 - Quadro-síntese das dificuldades de implementação da geração de energia através do hidrogênio verde

Autores e ano de publicação	Dificuldades de implementação da geração de energia através do hidrogênio
Hermesmann M.; Muller T.E.; 2022	<p>-A PEMEL produz uma proporção de hidrogênio para oxigênio de 1:8, o que significa que apenas 11,11% da massa do produto é atribuída ao produto principal desejado H₂. O aproveitamento do subproduto, portanto, será crucial para a viabilidade econômica, bem como para o desempenho ambiental do processo.</p> <p>-No caso de fornecer diretamente ao PEMEL 100% de eletricidade renovável, são necessárias capacidades significativas de</p>

<p>Harshal V. Patel; Saman A. Gorji; Shahzad S. M. Shah; Jonathan G. Love; 2021</p> <p>G. Kubilay Karayel, NaderJavani; Ibrahim Dince; 2022</p>	<p>armazenamento de energia para lidar com a intermitência das energias renováveis. Além disso, um fornecimento direto de eletricidade a partir de usinas de energia renovável geralmente requer um superdimensionamento do eletrolisador, o que pode induzir custos e impactos ambientais mais altos.</p> <p>-O sofrimento da escassez de água, bem como a alta demanda de materiais escassos para eletrolisadores e usinas de energia renovável precisam ser superados para justificar plenamente a implementação de uma infraestrutura de hidrogênio verde.</p> <p>-Eficiência do sistema de geração do hidrogênio verde que está ligada diretamente ao rendimento do eletrolisador.</p> <p>-O transporte convencional de eletricidade não é viável para ser integrado com a geração flexível de eletricidade a partir de fontes renováveis, pois pode levar à instabilidade da rede.</p> <p>-O transporte de hidrogênio pode se tornar um ponto de gargalo para países que não possuem uma infraestrutura de gasodutos.</p>
---	---

4.5. Reprodução de cálculos para o dimensionamento do sistema híbrido de geração fotovoltaica em uma situação problema

Com o desenvolvimento tecnológico na produção dos painéis fotovoltaicos percebe-se um importante aumento no seu rendimento. Com o intuito de perceber se há influência desse aumento de rendimento para dimensionamento de um sistema de geração híbrido de geração fotovoltaica e célula à combustível, reproduziu-se os cálculos da produção “Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula à Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia” (SILVA, Sergio; 2010), aplicando o que foi apresentado para a cidade de Goiânia no estado de Goiás.

Para uma melhor análise, utilizou-se valores de rendimento fornecidos pela tese de doutorado “Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia” (SEVERINO, Mauro; 2008) que apresenta para os componentes do sistema uma faixa de valores de rendimento. Os cálculos aqui reproduzidos utilizaram o pior (mínimo) e o melhor (máximo) valor desses rendimentos.

Para compreender o sistema de geração aqui reproduzido matematicamente, é necessário entender o funcionamento do sistema e como os componentes estão correlacionados.

Os painéis solares são responsáveis pela geração de energia por meio da conversão de radiação solar. A energia fornecida pelos módulos é gerada em corrente contínua e, portanto, deve ser convertida para corrente alternada, esse trabalho é realizado pelo inversor de frequência.

A partir dessa energia em corrente alternada, o eletrolisador é alimentado. Nele ocorre o processo de eletrólise, responsável pela dissociação da água para obtenção do hidrogênio. Essa produção é iniciada quando o sistema percebe que a energia fornecida à carga é menor que a energia produzida pelos painéis, ou seja, com a energia excedente gerada é utilizada para produção do hidrogênio que em seguida é armazenado em cilindros adequados.

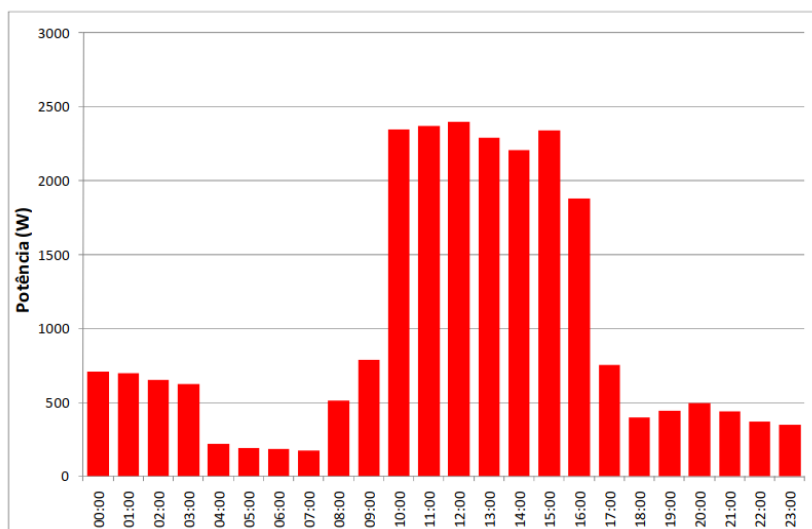
Ao ser percebido pelo sistema que o que está sendo consumido pela carga excede a produção do gerador fotovoltaico, o hidrogênio que estava armazenado começa a ser consumido pela célula à combustível responsável pela conversão do hidrogênio em energia elétrica em corrente contínua.

Por fim, tem-se o banco de baterias que é utilizado para fornecer energia nos períodos em que a geração de energia fotovoltaica foi interrompida por insuficiência de radiação solar e o estoque de hidrogênio foi totalmente consumido. O banco de baterias tem sua alimentação feita por meio de conversores bidirecionais de energia. Compreendido o funcionamento do sistema, inicia-se os cálculos para o dimensionamento dele.

4.5.1. Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Para dimensionar o gerador fotovoltaico, é necessário conhecer a curva de carga além da radiação solar do local de instalação. A curva de carga utilizada está apresentada na Figura 12 (SILVA, Sergio; 2010). O valor referente a radiação média anual foi retirado da base do CRESESB conforme Tabela 2.

Figura 12: Curva de carga utilizada no estudo



Fonte: SILVA, Sergio (2010)

Tabela 3- Dados de radiação solar referente a cidade de Goiânia, Goiás

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia] Latitude: 16,701° S, Longitude 49,349° O												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	5,48	5,53	5,18	5,04	4,79	4,59	4,76	5,68	5,56	5,60	5,40	5,50	5,26
Ângulo igual a latitude	17° N	5,05	5,29	5,23	5,48	5,57	5,55	5,67	6,42	5,79	5,45	5,02	5,01	5,46
Maior média anual	19° N	4,98	5,24	5,22	5,50	5,64	5,64	5,75	6,48	5,79	5,41	4,96	4,93	5,46
Maior mínimo mensal	10° N	5,26	5,43	5,25	5,34	5,29	5,19	5,34	6,17	5,74	5,55	5,21	5,24	5,42

Fonte: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito: CRESESB

Conhecida a curva de carga e o valor médio de radiação solar, prossegue-se com o dimensionamento sistema fotovoltaico. É necessário obter a área que será ocupada pelo gerador

fotovoltaico que é obtida de consumo diário de 23,84 kWh (Figura 12) e radiação média diária anual e 5,46 kWh/m²/dia, conforme dados obtidos pelo CRESESB para a cidade de Goiânia.

Para obter o rendimento global do sistema (η_{total}), é necessário multiplicar os rendimentos da CaC, do eletrolisador e dos módulos fotovoltaicos. Os valores máximos e mínimos de rendimento utilizados são de SEVERINO, Mauro; 2008 para a CaC e o eletrolisador e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 4 - Rendimento do eletrolisador e CaC

	Eletrolisador	CaC
Valor mínimo	62,87%	37,12%
Valor máximo	75,18%	43,40%

Fonte: SEVERINO, Mauro; 2008

Já para os módulos fotovoltaicos foi escolhido o modelo HiKu6 Mono CS6W-545MS do fabricante CanadianSolar que utiliza células monocristalinas, as especificações técnicas estão descritas na Tabela 4 e foram retiradas do *datasheet* do fabricante.

Tabela 5 - Informações técnicas do módulo fotovoltaico utilizado

Descrição	Características Elétricas
Potência Máxima (P _{máx})	545 W
Tolerância	+ 10W
Tensão de máxima potência (V _{mp})	41,2 V
Corrente de máxima potência (I _{mp})	13,23 A
Voltagem de circuito aberto (V _{oc})	49,4 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	13,95 A
TNOC	-40°C ~ +85°C
Eficiência	21,3%

Fonte: CanadianSolar

Com estas informações, obtêm-se o rendimento global do sistema mínimo ($\eta_{total.mín}$) de 4,97% e máximo ($\eta_{total.máx}$) de 6,95%. Para esses valores aplicados na equação (1), a área para $\eta_{total.mín}$ e $\eta_{total.máx}$ requerida de módulos são, respectivamente, 92,90 m² e 62,81 m².

Com essa informação, dá-se seguimento para encontrar a potência total necessária para o sistema fotovoltaico. A potência total para $\eta_{total.mín}$ encontrada é de 19,79 kW e $\eta_{total.máx}$

é de 13,38 kW, aplicando os resultados da área requerida de módulos na equação (2). Prossegue-se agora com o dimensionamento da célula à combustível. Para tal, os valores referentes ao $\eta_{total.mín}$ e $\eta_{total.máx}$ geram uma potência nominal da CaC, respectivamente, de 21,77 kW e 14,72 kW. Tais valores são obtidos aplicando as potências totais encontradas na equação (3).

Agora, inicia-se o dimensionamento do eletrolisador. O fator k de 0,8 é utilizado por se tratar de um sistema que utiliza o armazenamento de hidrogênio e banco de baterias. Os valores de potência nominal do eletrolisador obtidos para $\eta_{total.mín}$ é de 13,91 kW e 8,79 kW para $\eta_{total.máx}$, obtidos através da aplicação dos valores na equação (4).

Utilizando o valor do consumo máximo noturno diário de SILVA, Sergio; 2010 que é de 5,6 kWh aplicado na equação (5), dimensiona-se a quantidade de hidrogênio necessária para manter o sistema operante quando não houver radiação solar. O valor do poder calorífico inferior (PCI) usando é de 3,0 kWh/m³ para o hidrogênio (SEVERINO, Mauro; 2008). O resultado obtido vai estar na unidade de m³ e, portanto, é necessário converter o resultado para quilograma multiplicando este valor pela densidade do hidrogênio de 0,08988 kg/m³ (nas condições normais de temperatura e pressão). Após obter o valor em quilograma, considera-se para o sistema uma autonomia mínima de dois dias (SILVA, Sergio; 2010) e para tal, o consumo a ser considerado será igual a 47,68 kWh. Realiza-se os mesmos cálculos anteriores para obter a quantidade de hidrogênio para esse novo consumo.

O cilindro utilizado possui volume de 49 litros, pressão máxima suportável de 170 bar e a temperatura média de 30° (SILVA, Sergio; 2010). Aplicando esses parâmetros na equação (6) encontra-se a quantidade mol presente para o volume, pressão e temperatura informados.

Em 1 mol de gás de hidrogênio é ocupado o volume de 23,43 litros (SILVA, Sergio; 2010). Sabendo a densidade do hidrogênio, multiplicando esses dois valores encontra-se a quantidade que cada cilindro de hidrogênio armazena.

Dividindo a quantidade diária de hidrogênio que a carga precisa, quando não há radiação, pela quantidade de hidrogênio que cada cilindro de hidrogênio armazena, obtem-se a quantidade necessária de cilindros. Repete-se esses mesmos passos para saber quantos cilindros são necessários para que o sistema possua autonomia de dois dias. Na Tabela 5 estão os valores obtidos ao se utilizar o rendimento mínimo e máximo da CaC para esse dimensionamento.

Tabela 6 - Valores obtidos através do dimensionamento

	Eficiência mínima da CaC (37,12%)	Eficiência máxima da CaC (43,40%)
Quantidade de hidrogênio consumido por dia (kgH ₂ /dia)	0,45	0,39
Quantidade de hidrogênio consumido por dia (kgH ₂ /dia) (para autonomia de 2 dias)	3,85	3,29
Quantidade de hidrogênio por cilindro (kg)	0,066	0,066
Quantidade de cilindros necessária	~ 7	~ 6
Quantidade de cilindros necessária (para autonomia de 2 dias)	~ 59	~ 50

Fonte: Próprias autoras.

Por último, chegou a vez de iniciar o dimensionamento do banco de baterias. Primeiramente calcula-se a capacidade diária demandada pela carga. A tensão nominal do banco de baterias adotada foi de 48 Vcc. Logo com para o consumo diário de 23,84 kWh a capacidade ampér-hora diária será de 496,66 Ah, utilizando a equação (7). A capacidade ajustada em função da autonomia também será de 496,66 Ah pois o número de dias de autonomia aplicado para equação (8) será de 1 dia.

A capacidade ajustada em função da profundidade de descarga máxima permitida das baterias foi calculada utilizando $PD_{máx}$ igual a 70% (SILVA, Sergio; 2010). Substituindo na equação (9) obtém-se o valor 709,52 Ah.

Dando seguimento, o próximo passo é calcular a capacidade em função da $PD_{máx}$ diária. Aqui o valor utilizado para $PD_{máx.diária}$ foi de 60% (SILVA, Sergio; 2010). Ao substituir na equação (10) o valor encontrado é de 827,78 Ah.

A capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida das baterias é de 620,83 Ah, obtido utilizando pfv igual a 80% (SILVA, Sergio; 2010) e aplicando na equação (11).

Já a capacidade ajustada em função da profundidade de descarga (PD) será de 827,78 Ah, pois é o maior valor entre ($C_{Ah.PD_{máx}}$, $C_{Ah.PD_{máx.diária}}$, $C_{Ah.pfv}$).

Para a capacidade ajustada em função da temperatura média de operação, recorre-se a Tabela 1 para encontrar o fator de correção da capacidade associado à temperatura do local. Aqui foi utilizado fator de 0,93 referente a temperatura de 35°. Aplicando os valores na equação (13) obtém-se $C_{Ah,PD}$ de 890 Ah.

Por fim, para a capacidade ajustada em função do fator de segurança, o fator utilizado foi de 10% a mais em relação a PD (SILVA, Sergio; 2010). Aplicando as informações na equação (14), obtém-se então o valor de 979 Ah.

Como a capacidade da bateria utilizada é de 220 Ah (SILVA, Sergio; 2010), dividindo 979 Ah por essa capacidade, encontrou-se a quantidade de baterias em série que é de, aproximadamente, 4,45 baterias. Para encontrar a quantidade de baterias em paralelo basta dividir a tensão nominal do banco de baterias (48Vcc) pela tensão da bateria que está sendo utilizada. Aqui a tensão da bateria é 12 Vcc (SILVA, Sergio; 2010) e para tal encontra-se o valor de 4 baterias em paralelo. Por fim, para encontrar a quantidade total de baterias a serem utilizadas basta multiplicar a quantidade de baterias em série pelo número de baterias em paralelo, possibilitando chegar no valor de 18 baterias.

5 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento desta monografia, pode-se concluir que os métodos de obtenção de hidrogênio verde mais citados nas referências pesquisadas são eletrólise de água alcalina, eletrólise membrana de polímero-eletrólito (PEM) e eletrólise de água de óxido de sólido. A tecnologia mais desenvolvida é a eletrólise de água alcalina, porém, o processo que entrega maior grau de pureza é a tecnologia PEM. Ele também é apontado como o método mais adequado para ser associado com fontes de energia renováveis.

Os pontos de gargalos referentes à implantação do hidrogênio verde estão relacionados ao desenvolvimento tecnológico e sistema de armazenamento. É necessário desenvolver os eletrolisadores para se obter o aumento da eficiência deles, pois comprometem a eficiência global do sistema de geração de energia. Devido a intermitência da geração solar, para que o sistema possa ser confiável é necessário prever grandes quantidades de energia armazenada, para possibilitar o fornecimento energético contínuo à carga.

Quando se trata dos impactos ambientais relacionados a esse tipo de geração, o mais relevante está associado à utilização da água. Isso porque é necessário implementar uma infraestrutura adequada para captação de água. Locais que possuem pouca disponibilidade de recursos hídricos podem vir a ter dificuldades.

Em relação aos principais desafios que o Brasil enfrentará para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio estão as questões regulatórias, tecnológicas e de infraestrutura (MME/EPE, 2020a, p. 188-189). Nos aspectos regulatórios, há necessidade de criação de normatização nacional para o armazenamento, a distribuição e a conversão do hidrogênio (CGEE, 2017). Questões de certificação e padronização quanto à origem do hidrogênio (fóssil e renovável) e dos demais processos relacionados também são relevantes quando considerados os aspectos econômicos e de comercialização do gás. Ao analisar os aspectos tecnológicos, diversas temáticas ainda precisam evoluir para apresentação de soluções tecnológicas economicamente viáveis. No entanto, de acordo com a EPE (2021, p. 19), “para além da normatização de condições de segurança e do desenho e regulação de mercado, o principal desafio para o desenvolvimento do uso energético do hidrogênio é alcançar os níveis de competitividade com outras fontes a partir da redução de seus custos”.

Um maior comprometimento socioambiental por parte dos governos e demais instituições, assim como da iniciativa privada contribui para alcançar um ambiente favorável ao desenvolvimento de economias de hidrogênio, inclusive para viabilização da atração de investimentos qualificados.

Por fim, conclui-se que é possível a reprodução da metodologia de cálculo utilizada nessa produção para demais localidades com o intuito de dimensionar os componentes associados à geração de energia elétrica através do hidrogênio verde e a energia solar. Para obtenção dos dados referentes à radiação solar, a plataforma CRESESB pode ser consultada como fonte, pois sua base possui dados referentes a diversas regiões brasileiras. É importante frisar a importância da eficiência dos componentes envolvidos no processo tais como módulos fotovoltaicos, célula a combustível e eletrolisador, pois cada um deles influencia nos resultados da eficiência global do sistema e consequente, na viabilidade de implantação. Tendo visto a importância do fator eficiência, uma sugestão para implementação, é que a célula a combustível forneça energia diretamente em corrente alternada para evitar perdas inerentes às conversões CC/CA.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14298: Sistema fotovoltaicos – Banco de baterias - Dimensionamento.** Rio de Janeiro. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15254: Acumuladores Chumbo-ácido estacionário – Diretrizes para dimensionamento.** Rio de Janeiro. 2005.

AMBROSIO, Renato Canha; TICIANELLI, Edson Antonio. Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio. **Química Nova**, v. 24, n. 2, p. 243-246, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NcSrLNz7h6fbmySd3Lfchzz/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. Large-scale storage of hydrogen. **International journal of hydrogen energy**, v. 44, n. 23, p. 11901-11919, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195>. Acesso em: 10 jan. 2023.

BEZERRA, D. Francisco. **Hidrogênio Verde: Nasce um Gigante no Setor de Energia.** Fortaleza, 2021.

BNDES. **O Papel das Fontes Renováveis de Energia no Desenvolvimento do Setor Energético e Barreiras à Sua Penetração no Mercado.** Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%2021%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%C3%A1veis_P.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

BRITO. S, Sérgio. **Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica: CRESESB.** Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 27 jan. 2023.

CARDOSO. C. C, Hérica. **Estudo de Sistemas Híbridos de Energia Solar Fotovoltaica e Células a Combustível: Um Estudo de Caso Aplicado ao Instituto Federal de Goiás-Câmpus Itumbiara.** Itumbiara, 2019.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **UFSCar pesquisa novos materiais para armazenagem de hidrogênio.** 2019. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/18272-ufscar-pesquisa-novos-materiais-para-armazenagem-de-hidrogenio. Acesso em: 10 jan. 2023.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025.** Brasília. 2010.

CUMMINS. **Eletrolisadores 101:** o que são, como funcionam e onde entram em uma economia verde. Disponível em: <https://www.cummins.com/pt/news/2020/11/16/electrolyzers-101-what-they-are-how-they-work-and-where-they-fit-green-economy>. Acesso em: 02 fev. 2023.

DRIEMEIER, H, Luís. **Geração Distribuída.** Porto Alegre, 2009.

Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília. MME/EPE. 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-pne>. Acesso em 12 de janeiro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. 97p,** 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-dimprensa/noticias/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

FCHEA, Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (2019). **Unlocking the Potential of Hydrogen Energy Storage.** Disponível em < <http://www.fchea.org/intransition/2019/7/22/unlocking-the-potential-of-hydrogen-energy-storage>> Acesso em: 10 jan. 2023

HERMESMANN, M.; MÜLLER, T. E. Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 90, p. 100996, 2022.

IBERDROLA. **O que é um eletrolisador e por que é essencial para o fornecimento de hidrogênio verde?.** Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>. Acesso em: 02 fev. 2023.

IEA – International Energy Agency. **Tracking Clean Energy Progress**. 2017a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/580c0f94-0db8-4dc8-9947-66720737cb3a/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

JÚNIOR, F.C, Juarez. **Análise da Integração Hidro-Solar Auxiliada por Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio junto a Usinas Hidrelétricas**. Campinas, 2021.

KARAYEL, G. Kubilay; JAVANI, Nader; DINCER, Ibrahim. Green hydrogen production potential for Turkey with solar energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 45, p. 19354-19364, 2022.

LIMA, C. Gabriel. **Eficiência Energética e Energia Solar Fotovoltaica em Prédios Públicos no Setor de Educação no Nordeste do Brasil: O caso da Expansão do IFRN**. Rio de Janeiro, 2019.

MAHAN, B. H.. **Química, um curso universitário**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda,1980.

Ministério de Minas e Energia. **Capacidade de geração de energia no Brasil supera os 180GW**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/capacidade-de-geracao-de-energia-no-brasil-supera-os-180-gw>. Acesso em: 10 jan. 2023.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. TD 2787 - Panorama do hidrogênio no Brasil. **Texto Para Discussão**, [S.L.], p. 1-59, 4 ago. 2022. Instituto de Pesquisa Economica Aplicada - IPEA. <http://dx.doi.org/10.38116/td2787>.

PINTO, Carolina Pinto. **Estudos sobre o uso de células combustível movidas a hidrogênio solar em projetos de arquitetura residencial**. 2014. 280f. Trabalho de Mestrado São Carlos, 2014.

PATEL, Harshal V. et al. Implementation of a Lab-Scale Green Hydrogen Production System with Solar PV Emulator and Energy Storage System. **In: 2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)**. IEEE, 2021. p. 201-208.

REVISTA BRASIL ALEMANHA. **ABC do hidrogênio Verde**. Disponível em: <https://www.ahkbrasiliem.com.br/publicacoes/revista-brasilalemanha>. Acesso em: 10 jan. 2023.

RIEDEL, F. Vitor. **Análise técnica de um sistema de Armazenamento de Energia Elétrica Produzida por Fontes Renováveis Utilizando Sistemas de Baterias e Células a Combustível a Hidrogênio**. Campinas, 2019.

RUTHER, R. **Experiences and operational results of the first grid-connected, building integrated, thin film photovoltaic installation in Brazil**. In: Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna, Austria, 1998.

SANTOS, Ana Maria Resende. **Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural**. 2008. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. **Abastecendo com hidrogênio: O desafio de armazenar hidrogênio em veículos com célula a combustível numa quantidade que permita viagens longas**. Disponível em: <https://sciam.com.br/abastecendo-com-hidrogenio/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

SILVA, E.P.. **Introdução à Economia de Hidrogênio**, Editora da Unicamp, 204 p., 1991.

SILVA, Lucas Macedo da; SILVA, Vitor de Almeida; BELCHIOR, Fernando Nunes; FONSECA; Nunes Fonseca. **BATERIAS, CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E HIDROGÊNIO: ALTERNATIVAS PARA O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA, Engenharia 4.0: a era da produção inteligente**, Editora Pascal, 2023. pp 15 - 26.

SILVA, Sergio Batista da. **Dimensionamento ótimo de sistemas híbridos, com geração fotovoltaica e célula a combustível, para atendimento a comunidades isoladas na Amazônia**. 2010.

SEVERINO, Mauro Moura. **Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para o atendimento a comunidades isoladas da Amazônia**. 2008.

SOUTO, H. J.; NOGUEIRA, T. A. **O Hidrogênio Como Vetor Energético do Futuro Neutro à Terra**, p. 47–53, 2022.

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, v. 8, p. 102-106, 2010.

TAVARES, Amanda. **Ensaio Energético: O papel do transporte de gás natural na transição energética**. 2021. Disponível em: https://ensaioenergetico.com.br/o-papel-do-transporte-de-gas-natural-na-transicao-energetica/?utm_source=mailpoet&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter-post-title_1. Acesso em: 28 jan. 2023.

APÊNDICE

INSTRUMENTO DE EXTRAÇÃO DE DADOS

1. IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO

REFERÊNCIA DO ESTUDO	
TÍTULO DO ESTUDO	
PERIÓDICO DO ESTUDO	
AUTORES	
PAÍS DE ORIGEM DO ESTUDO	
IDIOMA DE PUBLICAÇÃO	<input type="checkbox"/> Português <input type="checkbox"/> Inglês <input type="checkbox"/> Espanhol <input type="checkbox"/> Outros:
ANO DE PUBLICAÇÃO	

2. CARACTERÍSTICAS METODOLÓGICAS DO ESTUDO

TIPO DE ESTUDO	<input type="checkbox"/> Abordagem quantitativa <input type="checkbox"/> Delineamento experimental <input type="checkbox"/> Delineamento quase-experimental <input type="checkbox"/> Delineamento não experimental <input type="checkbox"/> Abordagem qualitativa
NÍVEL DE EVIDÊNCIA Melnik e Fineout-Overholt (2005)	<input type="checkbox"/> Nível 1 : Revisão sistemática ou metanálise de todos os ensaios clínicos randomizados relevantes; <input type="checkbox"/> Nível 2: Pelo menos um ensaio clínico randomizado bem delineado <input type="checkbox"/> Nível 3: Ensaios clínicos bem delineados sem randomização; <input type="checkbox"/> Nível 4: Estudos de caso-controle e de coorte bem delineados; <input type="checkbox"/> Nível 5: Revisão sistemática de estudos descritivos ou qualitativos; <input type="checkbox"/> Nível 6: único estudo descritivo e qualitativo; <input type="checkbox"/> Nível 7: Opinião de autoridades e/ou relatório de comitê de especialistas.
OBJETIVO OU QUESTÃO DE PESQUISA	
AMOSTRA	Amostragem: <input type="checkbox"/> Probabilística

	() Não probabilística Critérios de inclusão: Critérios de exclusão:
VARIÁVEIS DE INTERESSE	Variável dependente (desfecho):
INTERVENÇÃO REALIZADA	() Não () Sim Qual intervenção? Grupo controle: () Sim () Não Randomização: () Sim () Não
O QUE A PRODUÇÃO TRAZ SOBRE OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE E SUA ASSOCIAÇÃO COM A ENERGIA SOLAR (MODELO HÍBRIDO)	Processo de obtenção : Hidrogênio verde associado a energia solar:
DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO HIDROGÊNIO VERDE	() Econômica () Tecnológica () Incidência de radiação solar () Outro

3. RESULTADOS DO ESTUDO

PRINCIPAIS RESULTADOS	
-----------------------	--

4. IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA

CONCLUSÕES DO ESTUDO	
----------------------	--