



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

MARCUS VENICIUS CHAGAS RABELO FILHO

**HIDROGÊNIO VERDE: DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO PARA ELETRÓLISE DE ÁGUA NO CAMPUS DO PICI**

FORTALEZA

2023

MARCUS VENICIUS CHAGAS RABELO FILHO

HIDROGÊNIO VERDE: DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
PARA ELETRÓLISE DE ÁGUA NO CAMPUS DO PICI

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
2023 do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará como requisito para a
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar
Freire

Fortaleza

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R114h Rabelo Filho, Marcus Venicius Chagas.

Hidrogênio verde : dimensionamento de um sistema fotovoltaico para eletrólise de água no Campus do Pici / Marcus Venicius Chagas Rabelo Filho. – 2023.
35 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire .

1. Hidrogênio verde. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Eletrólise de água. I. Título.

CDD 621.042

MARCUS VENICIUS CHAGAS RABELO FILHO

HIDROGÊNIO VERDE: DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
PARA ELETRÓLISE DE ÁGUA NO CAMPUS DO PICI

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em **2023** do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

Aprovada em: 15 / 12 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Fabíola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Amanda Pereira Monteiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Marcus e Irtes pela resiliência de não medir esforços em dar um futuro melhor para mim.

À minha esposa, Letícia, por nunca me deixar desacreditar que esse momento seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nivaldo por aceitar conduzir este trabalho de conclusão de curso.

À Retec Jr. por ter sido um divisor de águas em meu crescimento pessoal e profissional.

À equipe de engenharia da Sou Energy Solar pela troca de experiências, compartilhamento de dificuldades e espírito de equipe também fundamentais para minha formação como um todo.

RESUMO

O presente estudo trata sobre esta temática buscando dimensionar um sistema de geração de energia solar fotovoltaica para geração de hidrogênio verde no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará. Para tanto, foi necessário consultar e analisar dados de irradiação solar no local proposta, determinar a potência-pico do sistema fotovoltaico necessária para suprir a demanda energética do eletrolisador comercial escolhido, determinar o arranjo de conexão de módulos fotovoltaicos e estimar a quantidade de hidrogênio verde gerado em um período de um ano pelo eletrolisador escolhido. A metodologia adotada baseia-se em estimar o consumo do eletrolisador Cummin Hy-STAT 10 através do tempo de operação em plena carga para determinar a potência-pico do sistema de geração fotovoltaica necessária para atender essa demanda energética considerando uma taxa de desempenho do sistema fotovoltaico de 70%. Para o arranjo fotovoltaico foi escolhido o módulo fotovoltaico DAH Solar DHM-72X10 de 540Wp de potência. Por fim, estimou-se a geração de hidrogênio verde tendo como base os dados técnicos fornecidos pelo fabricante do eletrolisador e o tempo de operação em plena carga. Diante disso, verificou-se que são necessários 770,57 kWp de potência-pico para alimentação do eletrolisador escolhido, mas sendo necessária instalação de 771,11 kWp (1428 módulos fotovoltaicos) devido adequações de arranjo de conexão e que a quantidade hidrogênio verde gerada estimada é de 21084,50 Nm³ em um intervalo de um ano. Concluiu-se que a metodologia adotada se mostrou assertiva, visto que a geração específica estimada apresentou desvio de apenas -3,48% em relação a um portal de dados de irradiação solar e que os objetivos propostos foram cumpridos, tornando o estudo relevante para fomentar discussões sobre hidrogênio verde no Ceará.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Energia solar fotovoltaica; Eletrólise de água.

ABSTRACT

The present study deals with this topic, seeking to design a photovoltaic solar energy generation system for the generation of green hydrogen on the Pici Campus of the Federal University of Ceará. To this end, it was necessary to consult and analyze solar irradiation data at the proposed location, determine the peak power of the photovoltaic system necessary to meet the energy demand of the chosen commercial electrolyzer, determine the photovoltaic module connection arrangement and estimate the amount of green hydrogen generated over a period of one year by the chosen electrolyzer. The methodology adopted is based on estimating the consumption of the Cummin Hy-STAT 10 electrolyzer through the operating time at full load to determine the peak power of the photovoltaic generation system necessary to meet this energy demand considering a performance rate of the photovoltaic system. of 70%. For the photovoltaic arrangement, the DAH Solar DHM-72X10 photovoltaic module with 540Wp power was chosen. Finally, the generation of green hydrogen was estimated based on the technical data provided by the electrolyzer manufacturer and the operating time at full load. In view of this, it was found that 770.57 kWp of peak power are needed to supply the chosen electrolyser, but it is necessary to install 771.11 kWp (1428 photovoltaic modules) due to adaptations to the connection arrangement and that the amount of green hydrogen generated estimated is 21084.50 Nm³ over an interval of one year. It was concluded that the methodology adopted proved to be assertive, since the estimated specific generation showed a deviation of only -3.48% in relation to a renowned solar irradiation data portal and that the proposed objectives were met, making the study relevant to encourage discussions about green hydrogen in Ceará.

Keywords: Green Hydrogen; Photoltaic Solar Energy; Water Electrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de Célula Fotovoltaica	13
Figura 2 - Conversão de Irradiação Solar Diária Para HSP	16
Figura 3 - Dados de Irradiação Solar Diária Média.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Técnicos do Eletrolisador.....	21
Tabela 2 - Trecho de Datasheet do Módulo FV DAH DHM-72X10 540Wp	24
Tabela 3 - Tempo de Operação do Eletrolisador em Plena Carga.....	26
Tabela 4 - Consumo Elétrico do Eletrolisador Mês a Mês.....	27
Tabela 5 - Hidrogênio Verde Gerado Mês a Mês.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
HSP	Horas de Sol Pleno
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambientetar
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell
STC	Standard Test Conditions

LISTA DE SÍMBOLOS

- ® Marca Registrada
- η Eficiência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	Efeito Fotovoltaico e Células Fotovoltaicas.....	13
3.2	Características Elétricas das Células Fotovoltaicas	14
3.3	Avaliação do Recurso Solar e Dimensionamento da Potência Pico	15
3.4	Eletrólise Da Água.....	17
3.5	Tecnologias De Eletrolisadores	17
3.6	Hidrogênio.....	19
4	METODOLOGIA	21
4.1	Consumo de Energia a Ser Suprido.....	21
4.2	Determinação da Potência-Pico do Sistema Fotovoltaico.....	23
4.3	Arranjo Dos Módulos Fotovoltaicos	23
4.4	Geração de Hidrogênio Verde.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Consumo a Ser Suprido	26
5.2	Potência-Pico do Sistema Fotovoltaico	28
5.3	Arranjo Fotovoltaico	28
5.4	Hidrogênio Verde Gerado	29
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
	REFERÊNCIAS	32
	ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO	34
	ANEXO B – DATASHEET ELETROLISADOR ESCOLHIDO	35

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da sociedade, a demanda energética está crescendo de forma contínua. Existem previsões de que, até 2040, a demanda global de energia crescerá de 25% a 30% (LARA e RICHTER, 2023). Atualmente, grande parte do consumo de energia no cenário global se dá por combustíveis fósseis como gás natural, carvão mineral, petróleo e derivados, entre outros. Uma vez que esse tipo de combustível é um dos maiores responsáveis pela crise climática atual e estão cada vez mais escassos, muito se tem discutido sobre a busca de fontes de energias renováveis e mais limpas.

Nesse contexto, o uso de hidrogênio para obtenção de energia ganhou destaque nesta discussão, uma vez que sua combustão apresenta um calor liberado maior que qualquer outro combustível e como não apresenta monóxido de carbono e dióxido de carbono como produto de sua combustão, que são grandes responsáveis pelo efeito estufa, não contribui para o agravamento do aquecimento global (SILVA, 2016).

Uma das formas mais comuns de obtenção de hidrogênio verde, tendo esta nomenclatura quando é obtido através de fontes renováveis de energia, é através do processo de eletrólise da água utilizando-se energia solar fotovoltaica e eólica. Como o Brasil apresenta grande disponibilidade de irradiação solar e velocidades de vento favoráveis à energia solar fotovoltaica e energia eólica, respectivamente, o país apresenta um grande potencial para participação no mercado de hidrogênio verde no mundo (PINHO e GALDINO, 2014). Diante deste cenário, o Governo do Estado do Ceará está discutindo políticas públicas de incentivo para implantação de um polo industrial, chamado de HUB de hidrogênio, para produção de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2023).

Atualmente, dentre as fontes de energias renováveis, a energia solar fotovoltaica atualmente, é a segunda fonte de maior potência instalada, representando 15,8% do total de fontes, perdendo apenas para a hídrica, que é o tipo tradicional no país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2023). Pode-se relacionar este crescimento à queda de preços significativa nos últimos anos, à facilidade de instalação, à grande disponibilidade de fornecedores e opções de marcas e modelos dos mais diversos componentes deste tipo de sistema.

Diante desse panorama, este trabalho tem por motivação trazer aplicações práticas sobre energia solar fotovoltaica e hidrogênio verde através do dimensionamento de um gerador

fotovoltaico para eletrólise de água no Campus do Pici, aproximando a academia de engenharia do mercado de engenharia, enriquecendo o acervo sobre a possibilidade de geração de hidrogênio verde no Campus do Pici.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Dimensionar um sistema de geração de energia solar fotovoltaica para alimentar um eletrolisador de água para geração de hidrogênio verde no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Consultar e analisar dados de irradiação solar no campus da Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) para entender a disponibilidade média de energia solar ao longo do ano;
- b) Determinar a potência-pico do sistema fotovoltaico necessária para suprir a demanda energética do eletrolisador comercial escolhido;
- c) Determinar o arranjo de conexão dos módulos fotovoltaicos;
- d) Estimar a quantidade de hidrogênio verde gerado anualmente para o eletrolisador comercial escolhido.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

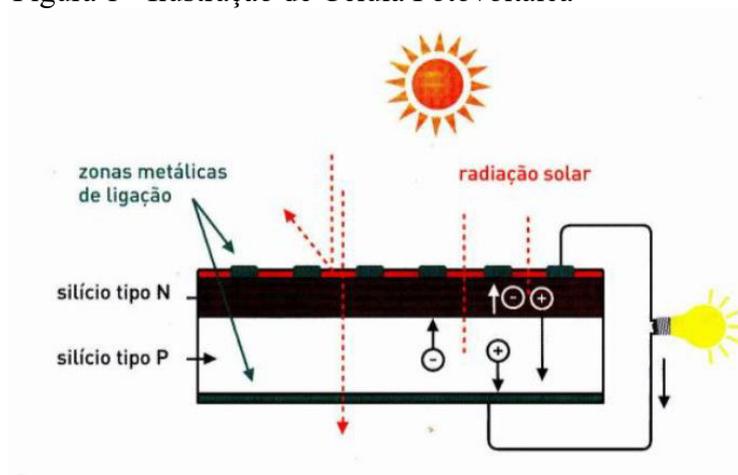
3.1 Efeito Fotovoltaico e Células Fotovoltaicas

Segundo Morais (2019), o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839. Neste fenômeno, surge uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor após absorção de luz. Os materiais semicondutores são caracterizados por possuírem bandas de energia, onde uma é preenchida por elétrons (banda de valência) e a outra composta por ausência de elétrons (banda de condução). A separação entre essas duas bandas é denominada *gap* de energia, e é de cerca de 1eV nesse tipo de material.

A célula fotovoltaica é composta por camadas de material semicondutor, geralmente de silício, que passam por um processo de dopagem, umas com material que apresenta elétrons livres (silício tipo N) e outras com material com cargas positivas livres (silício tipo P). Esses dois tipos de silícios são conectados por camadas, criando a junção P-N que gera um campo elétrico proveniente da interação entre o excesso de cargas livres do silício tipo P com as lacunas do silício tipo N (SILVA e ARAÚJO, 2022).

De acordo com Morais (2019), quando uma junção P-N é exposta a fótons com energia maior que a energia de *gap*, formam-se pares elétron-lacuna que geram corrente elétrica. Este é o efeito fotovoltaico: produção de energia elétrica através da conversão da radiação solar. Na figura 1, está ilustrada uma célula fotovoltaica.

Figura 1 - Ilustração de Célula Fotovoltaica



Fonte: MORAIS (2019)

Segundo Balfour, Shaw & Nash (2019), existem três tipos principais de semicondutores utilizados para fabricação de células fotovoltaicas: silício monocristalino, que é caracterizado por ter uma estrutura atômica ordenada e apresentar eficiências de 15% a 20%; silício policristalino, que é caracterizado por ter uma estrutura celular menos ordenada e apresentar eficiências de 13% a 16% e silício amorfo, que é caracterizado por ter uma estrutura atômica desordenada e apresentar valores de eficiência muito baixos.

3.2 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

Quando células fotovoltaicas são conectadas eletricamente em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para serem usadas em aplicações práticas, tem-se um módulo fotovoltaico, que é o componente unitário do gerador fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos comumente são identificados pela sua potência elétrica de pico: Watt-Pico (Wp). O valor desta potência-pico é adquirido realizando-se ensaios em condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*), onde considera-se irradiância solar de 1000W/m^2 , distribuição espectral padrão para massa de ar (*Air Mass – AM*) de 1,5 e temperatura de operação de célula de 25°C (PINHO e GALDINO, 2014).

Existem seis parâmetros elétricos que especificam um módulo fotovoltaico sob as condições de teste STC:

- a) Tensão de Circuito Aberto (V_{OC}): Tensão observada em um módulo desconectado exposto à luz. É a máxima tensão que o módulo fotovoltaico pode produzir;
- b) Corrente de Curto-Circuito (I_{SC}): Corrente observada em um módulo desconectado exposto à luz. É a máxima corrente que o módulo fotovoltaico pode produzir;
- c) Tensão de Máxima Potência (V_{MP}): Tensão gerada pelo módulo fotovoltaico no pico de potência de operação;
- d) Corrente de Máxima Potência (I_{MP}): Corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico no pico de potência de operação;
- e) Ponto de Máxima Potência (P_{MP}): Máxima potência produzida pelo módulo, ou seja, a potência gerada no ponto de tensão e corrente de máxima potência;
- f) Eficiência (η): Define o quão efetivo é o processo de conversão da energia solar em energia elétrica.

Ainda segundo Pinho & Galdino (2014), um dos ensaios mais completos para obtenção dos dados elétricos de um módulo fotovoltaico é o de traçado de sua curva de tensão versus corrente (IxV). Neste teste, o módulo é submetido às condições STC especificadas anteriormente e uma fonte de tensão variável alimenta os polos do módulo fotovoltaico com uma tensão negativa e aumenta gradativamente esta tensão aplicada até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico, extraindo todos os parâmetros elétricos necessários para caracterização deste módulo fotovoltaico. Outro parâmetro relevante a ser conhecido é o coeficiente de variação de tensão de circuito aberto por temperatura, visto que este parâmetro sofre alteração com a variação de temperatura de operação. O valor corrigido de V_{oc} para as variações de temperatura de operação é obtido com a equação 1:

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{STC}} * (1 + \beta * (T - 25)) \quad (1)$$

Onde β é o coeficiente de variação de tensão de circuito aberto com a temperatura e T é a temperatura de operação da célula fotovoltaica.

3.3 Avaliação do Recurso Solar e Dimensionamento da Potência Pico

Para o dimensionamento de sistemas de geração fotovoltaica, um passo fundamental é a avaliação do recurso solar no local escolhido para instalação, ou seja, a quantidade de energia proveniente dos raios solares.

Os dados de radiação solar podem ser apresentados como irradiância e irradiação, que são valores em termos de fluxo de potência e energia por unidade de área, respectivamente. Sendo a apresentação destes dados divulgados em valores médios mensais para a energia acumulada ao longo do dia a forma mais comum de apresentação (Pinho & Galdino, 2014).

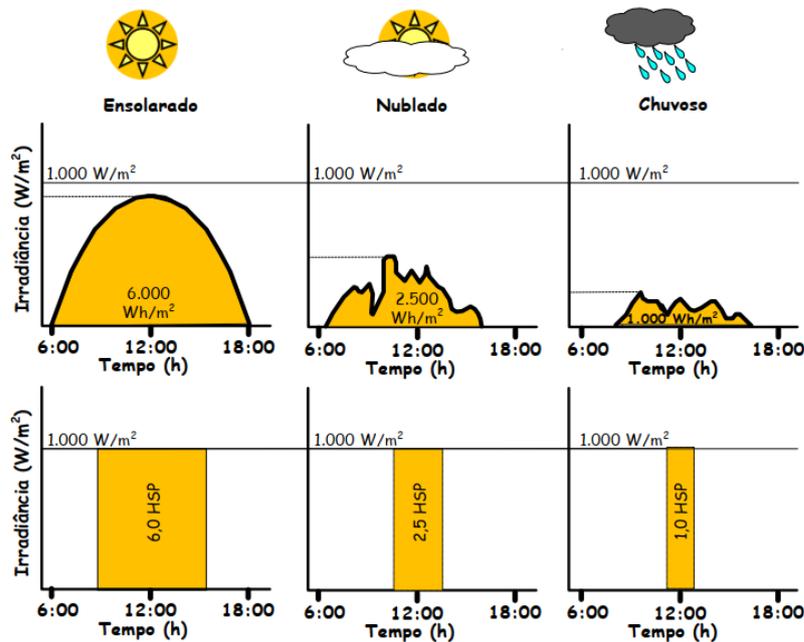
As características elétricas de um gerador fotovoltaico sofrem grande influência dos parâmetros de irradiância e temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos. Dentre esses dois parâmetros, a irradiância pode apresentar variações de grande magnitude em intervalos de segundos. Já a variação de temperatura de operação é filtrada pelas características térmicas dos módulos, apresentando menores oscilações no decorrer do tempo (Pinho & Galdino, 2014).

Devido a essa oscilação na irradiância solar, convém utilizar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia para estimar a produção de energia elétrica, ignorando os

efeitos de variação da irradiância instantânea. A este valor acumulado de energia ao longo de um dia se denomina Horas de Sol Pleno (HSP), que consiste no número de horas em que a irradiância solar apresenta valor de 1000 W/m². Para se obter esses valores, basta dividir o valor de energia acumulada ao longo de um dia por 1000 W/m², resultando em unidade de horas por dia (Pinho & Galdino, 2014).

O dado em HSP simboliza a compressão da curva de irradiância ao longo de um dia, tornando o processo de estimativa de geração mais prático e intuitivo. A figura 2 torna o conceito mais compreensível.

Figura 2 - Conversão de Irradiação Solar Diária Para HSP



Fonte: Pinho & Galdino (2014)

De posse dos dados de irradiação solar em HSP, segundo Pinho & Galdino (2014), pode-se aplicar a equação 2 para determinar a potência pico total necessária para atender um respectivo consumo de energia elétrica em um sistema de geração fotovoltaica isolado, ou seja, não conectado à rede elétrica de distribuição:

$$P_{FV} = \frac{E/TD}{HSP_{MA}} \quad (2)$$

Onde:

P_{FV} (Wp): Potência de pico do painel fotovoltaico

E (Wh/dia): Consumo diário médio anual a ser suprido

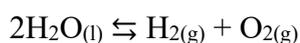
HSP(h): Média diária anual das Horas de sol pleno

TD (adimensional): Taxa de desempenho

A taxa de desempenho é o parâmetro de performance do sistema fotovoltaico em relação ao máximo desempenho teórico possível. Nessa taxa estão inclusas perdas gerais no sistema, como perdas por queda de tensão, temperatura de operação do módulo fotovoltaico, descasamento (*mismatch*) entre células e módulos fotovoltaicos de mesmo modelo, diodos, entre outras. Para instalações no Brasil, pelas condições de radiação solar que temos, é possível atingir taxas de desempenho entre 70% e 80% (Pinho & Galdino, 2014).

3.4 Eletrólise Da Água

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que envolve a quebra da molécula de água (H_2O) em seus componentes básicos, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Por meio da passagem de uma corrente elétrica contínua através de um meio aquoso, acontece a quebra das ligações covalentes entre os átomos de hidrogênio e oxigênio, formando íons H^+ e OH^- . Através de uma reação de redução, o íon H^+ é descarregado no cátodo, formando H_2 e através de uma reação de oxidação, o íon OH^- é descarregado no ânodo, produzindo O_2 . A reação global do processo é a seguinte (SILVA, 2016):



Existem diversas formas de se obter hidrogênio utilizando-se matérias-primas como água, biomassa, carvão, hidrocarbonetos e gás natural. Dentre esses, o processo de eletrólise alcalina se destaca como sendo um dos de maior eficiência energética, atingindo valores de 61% a 82% (LARA e RICHTER, 2023).

3.5 Tecnologias De Eletrolisadores

Um eletrolisador é um equipamento destinado à produção de hidrogênio por eletrólise de água. Segundo Souto & Nogueira (2022), quanto às formas de operação e eletrólito

utilizado, os eletrolisadores podem ser divididos em 3 tipos: alcalinos, com membranas de prótons (PEM) e de óxido de sódio (SOEC). As características de cada tipo estão descritas a seguir:

- a) Eletrolisador de Membrana de Troca de Prótons (PEM): Utiliza uma membrana polimérica que permite apenas a passagem de prótons como eletrólito. A água é decomposta no ânodo, formando oxigênio gasoso e íons H^+ . Estes íons atravessam a membrana polimérica e formam hidrogênio gasoso ao receber elétrons da camada catalisadora do cátodo. Este tipo de catalisador tem como destaque sua eficiência, um tempo de arranque baixo e altas densidades de corrente, tornando-o um excelente candidato para uso em energias renováveis, visto a intermitência de disponibilidade desse tipo de energia. Em contrapartida algumas desvantagens desse tipo de construção são o elevado custo, a existência de ácidos corrosivos e a vida-útil reduzida;
- b) Eletrolisador Alcalino: Usa uma solução alcalina, geralmente uma solução de potássio ou hidróxido de sódio como eletrólito e um diafragma que só permite a passagem de íons OH^- encontra-se entre o ânodo e o cátodo. Neste eletrolisador, a água é decomposta no cátodo, onde duas moléculas da solução do eletrólito são reduzidas a hidrogênio (H_2) tendo dois íons OH^- como produto. Estes íons são transferidos pelos poros do diafragma para o ânodo, onde serão oxidados, formando oxigênio (O_2) e quatro átomos de hidrogênio. É uma tecnologia mais antiga e menos eficiente em comparação com a PEM, mas apresenta um menor custo e maior vida útil, tornando-a ainda competitiva e amplamente utilizada no meio industrial;
- c) Eletrolisador de Oxigênio de Estado Sólido (SOEC): Este tipo de eletrolisador é caracterizado por operar em alta temperatura, utilizando água em estado gasoso, e utilizar materiais cerâmicos condutores de íons de oxigênio como eletrólito. Neste eletrolisador, o vapor é alimentado no cátodo, onde ocorre a produção de hidrogênio e íons O^{2-} . Estes íons passam pelo eletrólito sólido em direção ao ânodo onde forma oxigênio (O_2). Esta tecnologia é a mais atual das três mencionadas. Segundo Souto & Nogueira (2022), no momento ainda se encontra em fase laboratorial, sem grandes aplicações comerciais. Tem como vantagens baixo consumo de energia, baixo custo de aquisição e eficiência

elevada. Como desvantagens pode-se listar a baixa longevidade, dimensões elevadas e alta temperatura de operação.

3.6 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, mas não está disponível em sua forma pura. De forma combinada de hidrocarbonetos e derivados, é encontrado na água, nos minerais e nos seres vivos. Com isso, pode ser extraído de diversas fontes como gás natural, etanol, biomassa, gasolina, entre outras (SOUTO e NOGUEIRA, 2022).

Segundo Sá, Cammarota, & Ferreira-Leitão (2014), é possível dividir os métodos de produção de hidrogênio em três principais matérias-primas: combustíveis fósseis, tendo como métodos de produção a reforma a vapor do gás natural, oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados e gaseificação do carvão; água, tendo como métodos de produção a eletrólise da água, processos foto-eletróquímicos e termoquímicos; e a biomassa, tendo como métodos processos biológicos, gaseificação da biomassa, reforma a vapor do etanol e reforma em fase líquida.

Dentre as formas de aproveitamento do hidrogênio, destacam-se o uso como matéria-prima em processos industriais como a produção de fertilizantes, o uso como combustível para geração de energia através da combustão e o uso como armazenamento de energia, tendo aplicações em setores da indústria, transporte, energia, entre outros (BEZERRA, 2021).

No processo de combustão, observa-se que o calor liberado por unidade de massa na queima deste gás é maior que de qualquer outro combustível (141 kJ/g). Além disso, por ter apenas água como produto de sua combustão, ao invés de monóxido e dióxido de carbono como na queima do petróleo, pode ser considerado como uma fonte de energia limpa, não contribuindo para o agravamento do efeito estufa (SILVA, 2016).

Segundo Bezerra (2021), a Comissão Europeia criou um código de cores para classificação do tipo de hidrogênio baseado no teor de poluentes emitidos no processo de produção, sendo eles: hidrogênio marrom, cinza, azul, turquesa e verde, sendo este último o único livre totalmente de poluentes, já que é produzido através de eletrólise de água utilizando fontes de energia renovável tais como solar, eólica, hidráulica, marés, entre outras para fornecimento de energia elétrica ao eletrolisador.

Ainda de acordo com Bezerra (2021), um dos desafios para maior utilização de hidrogênio é o preço, sendo de duas a três vezes mais caro que o hidrogênio azul, mas estima-se que os custos de produção de hidrogênio possam cair 62% até 2030. Caso esta projeção se concretize, os preços de hidrogênio verde e hidrogênio cinza podem se equiparar entre 2028 e 2034. Essas projeções demonstram que o hidrogênio verde terá papel fundamental no processo de descarbonização dos processos de desenvolvimento global, sendo protagonista na transição energética esperada pelo mundo.

4 METODOLOGIA

4.1 Consumo de Energia a Ser Suprido

Para este trabalho, foi escolhido o eletrolisador alcalino da fabricante Cummins, modelo HySTAT-10, que apresenta as seguintes especificações técnicas disponibilizadas no site do fabricante:

Tabela 1 - Dados Técnicos do Eletrolisador

Especificação	Valores
Capacidade de produção de H ₂	10 Nm ³ /h
Potência	115 kVA
Consumo de energia	55-60 kWh/kg
Consumo de água	1,2-2 L/Nm ³
Faixa de operação	40%-100%
Qualidade do H ₂ na saída	>99,9% puro
Pressão de saída do H ₂	145 psig
Área ocupada de instalação	54,52 m ²

Fonte: Cummins, adaptado pelo autor

Neste trabalho, o fornecimento de água não será considerado como um fator limitante e o consumo de energia será considerado o maior possível, baseado na informação disponibilizada pelo fabricante do eletrolisador: 60 kWh/kg. Utilizando o fator de conversão de que 0,08989 kg/Nm³ consultado em NITROTEC (2020), o consumo do eletrolisador será 5,394 kWh/Nm³.

Para determinar o tempo de operação do equipamento em plena potência (t_{op}), os dados de irradiação solar, que são apresentados em unidade de kWh/m².dia, foram convertidos em Horas de Sol Pleno (HSP). Essa conversão é feita dividindo-se os dados por 1000 W/m², como explicado no tópico 3.3 deste estudo:

$$\frac{1000Wh}{m^2.dia} * \frac{m^2}{1000W} = \frac{h}{dia} = HSP \quad (3)$$

Esta representação de dados é bastante utilizada no mercado solar fotovoltaico e indica a compressão da curva de irradiação solar diária para 1000 W/m², facilitando os cálculos de dimensionamento de sistema, visto que os fabricantes de módulos fotovoltaicos fornecem dados elétricos de operação baseados em 1000 W/m² de irradiação.

Os dados históricos de irradiação solar média por dia que incide na região do Campus do Pici, da Universidade Federal do Ceará, foram consultados no banco de dados do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) utilizando coordenadas geográficas 3,745297° S de Latitude e 38,577821° O de Longitude, retornando os seguintes dados:

Figura 3 - Dados de Irradiação Solar Diária Média

Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
3,701° S	38,549° O	5,9	5,87	5,81	5,65	4,91	5,29	5,30	5,53	5,93	6,09	6,34	6,43	6,16	5,78	1,52
3,801° S	38,549° O	7,0	5,75	5,77	5,57	4,86	5,19	5,23	5,45	5,89	6,05	6,30	6,34	5,94	5,69	1,48
3,701° S	38,649° O	9,3	5,75	5,70	5,54	4,80	5,16	5,19	5,47	6,01	6,15	6,31	6,33	6,01	5,70	1,53

Fonte: CRESESB

As coordenadas mais próximas encontradas no banco de dados foram latitude de 3,701° S e longitude de 38,549° O. Neste estudo, será considerada como insignificante uma possível diferença de valores de irradiação para as coordenadas escolhidas no campus do Pici.

De posse dos dados de irradiação mês a mês da figura 3, foi feita a conversão de unidades para HSP e a multiplicação desses dados pela quantidade de dias de cada mês para determinar o tempo de operação à capacidade máxima do eletrolisador (t_{op}) de maneira mensal.

Com isso, temos o tempo de operação do eletrolisador em plena potência mês a mês durante o ano. Dessa forma, o consumo elétrico de eletrólise será dado pela seguinte relação:

$$Cons_{elet} = Cap_{prod} * Cons_{prod} * t_{op} \quad (4)$$

Onde:

$Cons_{elet}$ é o consumo elétrico diário de operação do eletrolisador (kWh/dia)

Cap_{prod} é a capacidade de produção de hidrogênio do eletrolisador (Nm³/h)

$Cons_{prod}$ é o consumo de energia elétrica por volume de hidrogênio produzido (kWh/Nm³)

t_{op} é o tempo de operação diário do eletrolisador à capacidade máxima (HSP)

4.2 Determinação da Potência-Pico do Sistema Fotovoltaico

Para determinar a potência-pico do sistema fotovoltaico, foi utilizada a equação (2) presente no tópico 3.2, ou seja:

$$P_{FV} = \frac{E/TD}{HSP_{MA}} \quad (2)$$

Nas substituições, utilizou-se o mês de maior consumo de energia elétrica como referência para garantir o atendimento dos meses de menor consumo e foi considerada uma taxa de desempenho de 70%, a menor possível na faixa recomendada por Pinho & Galdino (2014) com objetivo também de garantir uma maior potência-pico, dando margem para possíveis perdas não consideradas.

4.3 Arranjo Dos Módulos Fotovoltaicos

Foi utilizada a equação 6 para determinar a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para atender à potência-pico encontrada:

$$N_{mód} = \frac{P_{FV}}{P_{mód}} \quad (5)$$

Onde:

$N_{mód}$ é a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários

P_{FV} (kWp) é a potência-pico do sistema fotovoltaico necessária

$P_{mód}$ (kWp) é a potência-pico do módulo fotovoltaico selecionado

Para este estudo, foi escolhido o módulo fotovoltaico de marca DAH, modelo DHM-72X10 e 540 Wp de potência-pico, que conta com os seguintes dados técnicos fornecidos pelo fabricante:

Tabela 2 - Trecho de Datasheet do Módulo FV DAH DHM-72X10 540Wp
STC-Electrical Characteristics

Module Type	DHM-72X10			
Maximum Power (P_{max}/W)	540	545	550	555
Open-circuit Voltage (V_{oc}/V)	49.8	50.0	50.2	50.4
Maximum Power Voltage (V_{mp}/V)	42.0	42.2	42.4	42.6
Short-circuit Current (I_{sc}/A)	13.66	13.72	13.78	13.84
Maximum Power Current (I_{mp}/A)	12.86	12.91	12.97	13.03
Module Efficiency (%)	20.89	21.09	21.30	21.48
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.05%/°C			
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.31%/°C			
Temperature Coefficient of P_{max}	-0.35%/°C			

Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

Fonte: DAH Solar

Na tabela 2 estão evidenciadas, em seleção vermelha, os parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico selecionado nas condições STC.

Para determinação do arranjo de módulos, foi verificada a tensão máxima de operação do módulo fotovoltaico selecionado através da folha de dados (datasheet) do equipamento. A tensão máxima de operação é de 1500 V. Logo, a tensão de circuito aberto dos arranjos não pode ultrapassar 1500 V.

Nesse estudo, foi considerado que a menor temperatura possível para a região seria de 10°C, uma vez que a menor temperatura já registrada no estado foi de 12°C e ocorreu em 1963 (KARINY, 2020). Com isso, foi aplicada a equação (1) do tópico 4.2 considerando estas condições para determinação da maior tensão de circuito aberto possível de cada módulo e assim. Foi utilizada a seguinte expressão para determinar a quantidade máxima de módulos fotovoltaicos conectados entre si ($N_{mód.max}$), formando strings:

$$N_{mód.max} = \frac{1500 V}{V_{oc}(T)} \quad (6)$$

Após encontrado o número máximo de módulos conectados em uma só string, determinou-se a solução de arranjo desses módulos, isto é: a divisão da quantidade total de strings e quantos módulos teriam em cada string atentando-se à necessidade de que todas as strings tivessem a mesma quantidade de módulos, já que essas strings seriam interligadas em string box, para evitar o fenômeno de corrente reversa, onde a corrente de geração fotovoltaica flui de uma string com maior quantidade de módulos para uma com menor quantidade de módulos.

4.4 Geração de Hidrogênio Verde

Uma vez que o estudo tem como base o tempo de operação do eletrolisador em plena carga e que o consumo de água não é um fator limitante, foi considerado que a quantidade de hidrogênio gerado durante o tempo de operação em plena carga (t_{op}) foi o máximo informado pelo fabricante do equipamento, que é de 10 Nm³/h.

Com isso, a quantidade de hidrogênio verde gerado ($H_{2.grd}$) mês a mês foi determinado pela seguinte expressão:

$$H_{2.grd} = 10 \frac{Nm^3}{h} * t_{op} \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Consumo a Ser Suprido

Para o tempo de operação do eletrolisador em plena carga para o mês de janeiro, aplicou-ser a equação 8:

$$t_{op} = I * d = 5,87 \text{ HSP} * 31 \text{ dias} = 181,97 \text{ h/mês} \quad (8)$$

Onde:

t_{op} é o tempo de operação em plena carga (h)

I é a irradiação do mês (HSP)

d é a quantidade de dias do mês

Para os demais meses, obteve-se os resultados da tabela 3:

Tabela 3 - Tempo de Operação do Eletrolisador em Plena Carga

Mês	Irradiação (HSP)	Dias do mês	t_{op} (h/mês)
Janeiro	5,87	31	181,97
Fevereiro	5,81	28	162,68
Março	5,65	31	175,15
Abril	4,91	30	147,30
Mai	5,29	31	163,99
Junho	5,3	30	159,00
Julho	5,53	31	171,43
Agosto	5,93	31	183,83
Setembro	6,09	30	182,70
Outubro	6,34	31	196,54
Novembro	6,43	30	192,90
Dezembro	6,16	31	190,96

Fonte: Autor

De posse dos dados t_{op} mês a mês, aplicou-se a equação (3) para determinar o consumo de energia elétrica esperado mês a mês no processo de eletrólise. O cálculo para o mês de janeiro se dá como:

$$Cons_{elet} = Cap_{prod} * Cons_{prod} * t_{op} = 10 \frac{Nm^3}{h} * 5,393 \frac{kWh}{Nm^3} * 181,97 h = 9814,37 kWh$$

Para os demais meses, tem-se os resultados da tabela 4:

Tabela 4 - Consumo Elétrico do Eletrolisador Mês a Mês

Mês	Consumo elétrico mensal (kWh)
Janeiro	9814,37
Fevereiro	8773,98
Março	9446,54
Abril	7944,48
Maio	8844,64
Junho	8575,51
Julho	9245,91
Agosto	9914,69
Setembro	9853,74
Outubro	10600,19
Novembro	10403,87
Dezembro	10299,24
TOTAL	113717,14

Fonte: Autor

Uma vez que os valores de irradiação solar são variáveis mês a mês, percebe-se que o consumo de energia elétrica do eletrolisador acompanha os dados de irradiação de cada mês, sendo o pico de consumo registrado no mês de outubro, com valor de 10600,19 kWh. Embora o mês de maior irradiação solar absoluta seja novembro, apresentando 6,43 kWh/m².dia, outubro apresenta um maior consumo de energia elétrica por ter um dia a mais que o mês de novembro, mesmo apresentando irradiação solar média diária de 6,34 kWh/m².dia.

Podemos observar que o somatório de consumo mês a mês resulta em um consumo elétrico total da ordem de grandeza de 113 MWh, valor bastante expressivo, evidenciando que este é um projeto porte considerável.

5.2 Potência-Pico do Sistema Fotovoltaico

A aplicação da equação (2) utilizando taxa de desempenho de 70%, consumo elétrico de 10600,19 kWh e o tempo de operação de 196,54 h, ambos de outubro, resultou no seguinte:

$$P_{FV} = \frac{E/TD}{HSP_{MA}} = \frac{10600,19}{\frac{0,70}{196,54}} = 77,05 \text{ kWp}$$

Ou seja, para suprir o eletrolisador nas condições de operação consideradas é necessário uma potência-pico de 77,05 kWp.

Com a previsão de 77,05 kWp atingirem geração de 10600,19 kWh no mês de outubro, tem-se uma relação de energia gerada por potência pico, comumente chamada de geração específica, de 137,57 kWh/kWp.

Levando em consideração que o banco de dados Global Solar Atlas estima uma geração específica de 142,55 kWh/kWp mensal para a localização proposta, pode-se considerar que o valor de geração específica alcançado com a metodologia está próximo à realidade, apresentando erro de cerca de -3,49% da referência citada, apenas. Com isso, podemos considerar que a metodologia de dimensionamento é válida.

5.3 Arranjo Fotovoltaico

A quantidade de módulos fotovoltaicos necessária foi determinada através da equação (6), apresentada no tópico 4.3:

$$N_{mód} = \frac{P_{FV}}{P_{mód}} = \frac{77,05 \text{ kWp}}{0,540 \text{ kWp}} = 142,68 \text{ módulos}$$

Como não existe sentido um número de módulos que não seja inteiro, teve-se como resultando um total de 143 módulos

Substituindo-se os valores de tensão de circuito aberto nas condições STC declarados pelo fabricante e o fator de correção da tensão de circuito aberto por temperatura na equação (1), determinou-se a máxima tensão de circuito aberto corrigida pela temperatura:

$$V_{oc}(T) = 49,80 \text{ V} * \left(1 + \left(-\frac{0,31}{100} * (10 - 25) \right) \right) = 52,12 \text{ V}$$

Com isso, o número máximo de módulos fotovoltaicos que podem se conectar entre si teve o seguinte resultado, aplicando-se a equação (7) teve-se a quantidade máxima de módulos por string:

$$N_{mód.max} = \frac{1500 \text{ V}}{V_{oc}(T)} = \frac{1500 \text{ V}}{52,12 \text{ V}} = 28,78 \text{ módulos}$$

Novamente, como não faz sentido um valor para a quantidade de módulos que não seja inteiro, temos que a quantidade máxima de módulos conectados entre si é de 28 módulos.

De posse desses resultados, diante das possibilidades de arranjo, chegou-se à solução de adicionar mais um módulo fotovoltaico no total para dividir o sistema em 6 strings de 24 módulos, totalizando 144 módulos fotovoltaicos de 540 Wp, somando 77,76 kWp.

5.4 Hidrogênio Verde Gerado

Seguindo com as estimativas de geração, aplicou-se a equação (8), apresentada no tópico 4.4, para estimativa da quantidade de hidrogênio verde a ser gerado mês a mês, resultando-se nos valores da tabela 4 a seguir:

Tabela 5 - Hidrogênio Verde Gerado Mês a Mês

Mês	t_{op} (h/mês)	$H_{2,grd}$ (Nm ³ /mês)
Janeiro	181,97	1819,70

Fevereiro	162,68	1626,80
Março	175,15	1751,50
Abril	147,3	1473,00
Maio	163,99	1639,90
Junho	159,00	1590,00
Julho	171,43	1714,30
Agosto	183,83	1838,30
Setembro	182,70	1827,00
Outubro	196,54	1965,40
Novembro	192,9	1929,00
Dezembro	190,96	1909,60
TOTAL	2108,45	21084,50
MÉDIA	175,70	1757,04

Fonte: Autor

Na tabela 4 pode-se ver que, com a metodologia adotada, espera-se um total de 21084,50 Nm³ de hidrogênio verde gerado no intervalo de um ano, com média de geração mensal de 1757,04 Nm³/mês.

Este hidrogênio gerado pode ser utilizado de diversas formas dentro da universidade, desde insumos para experimentos, armazenamento para futuros trabalhos ou geração de energia como um todo, desenvolvendo ainda mais a discussão sobre o tema na academia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o eletrolisador Cummins HySTAT-10, foi estimado um consumo máximo de 10600,19 kWh no mês de outubro com tempo de operação em plena carga de 196,54 h neste mês, sendo necessária uma potência-pico de 77,05 kWp, considerando uma taxa de desempenho de 70% do sistema, apresentando geração específica de 137,57 kWh/kWp, com erro de -3,49% da referência de previsão de geração específica do portal Global Solar Atlas.

Por outro lado, na análise do arranjo de conexão de módulos, determinou-se a quantidade total de módulos fotovoltaicos de 143 módulos DAH Solar DHM-72X10 540 Wp, somando uma potência-pico total de 77,76 kWp para atender a necessidade de formar strings de mesma quantidade de módulos fotovoltaicos visando evitar o efeito de corrente reversa entre strings e não ultrapassar a tensão máxima de operação suportada pelos módulos fotovoltaicos. Com essa potência-pico, o sistema fotovoltaico deve atender a demanda energética do mês de maior consumo do ano, sendo suficiente para os demais meses do ano.

Ademais, considerando o tempo de operação em plena carga do eletrolisador escolhido, estimou-se uma geração de hidrogênio verde anual de 21084,50 Nm³, sendo o mês de maior geração também o de outubro, apresentando estimativa de 1965,40 Nm³ de geração de hidrogênio verde.

Assim, conclui-se que esse estudo contribui para a discussão sobre a geração de hidrogênio verde no Brasil, especialmente no Ceará, trazendo aspectos práticos sobre o processo, aproximando o meio acadêmico do mundo real.

É importante ressaltar que a metodologia adotada não se limita aos equipamentos escolhidos. Diante disso, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de comparativos de estimativas de geração de hidrogênio verde utilizando diferentes tecnologias, assim como estimar a geração em um intervalo de tempo maior que um ano, visto que os módulos apresentam perda de rendimento com o passar dos anos.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**, 14 Novembro 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 30 Novembro 2023.

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao Projeto de Sistemass Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BARROSO, A. M. R. et al. Obtenção do Hidrogênio Verde A Partir de Energias Renováveis. **Revista Arte, Ciência e Tecnologia**, Teresina, 2021.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio Verde: Nasce Um Gigante No Setor de Energia. **Caderno Setorial Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE)**, 2021.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia Fotovoltaica: Conversão de Energia Solar em Eletricidade. **O instalador**, 2006.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SERGIO DE S. BRITO. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**, 11 Junho 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 03 Dezembro 2023.

CUMMINS. **HySTAT@Alkaline Electrolyzers**. Disponível em: <<https://mart.cummins.com/imagelibrary/data/assetfiles/0070333.pdf>>. Acesso em: 10 Setembro 2023.

DAH SOLAR. **DHM-72X10-540~555W**. Disponível em: <https://www.dahsolarpv.com/dhm-72x10-540-555w_p179.html>. Acesso em: 10 Setembro 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 07 Dezembro 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2022, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 09 Setembro 2023.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **GLOBAL SOLAR ATLAS**, Setembro 2023. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map?s=-3.745297,-38.577821&m=site&c=-4.302591,-39.245911,9>>. Acesso em: 07 Dezembro 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Investment 2023, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>>. Acesso em: 07 Dezembro 2023.

KARINY, I. **Sabia que Ceará já teve temperatura de 12º? Veja onde e quando foi**, 31 Julho 2020. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/noticias/fortaleza/2020/07/31/sabia-que-ceara-ja-teve-temperatura-de-12-----veja-onde-e-quando-foi.html>>. Acesso em: 04

Dezembro 2023.

LARA, D. M. D.; RICHTER, M. F. Hidrogênio Verde: A Fonte de Energia do Futuro. **Novos Cadernos NAEA**, 2023.

MORAIS, J. L. **Sistemas Fotovoltaicos: Da Teoria À Prática**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

NITROTEC. **Tabela de Gases (Conversão)**, 2020. Disponível em: <<https://nitrotec.com.br/global/wp-content/uploads/2020/10/11-002535-Ebook-tabela-de-gases-1920-x-1080-2.pdf>>. Acesso em: 15 Dezembro 2023.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Ceará**, 14 out. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-no-ceara>>. Acesso em: 30 Novembro 2023.

SÁ, L. R. V. D.; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. Produção de Hidrogênio Via Fermentação Anaeróbia - Aspectos Gerais e Possibilidade de Utilização de Resíduos Agroindustriais Brasileiros. **Química Nova**, 03 Abril 2014. 857-867.

SEMACE. **Potencial da Hub de Hidrogênio Verde do Ceará é apresentado à Comissão Especial do Senado**, 27 Junho 2023. Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/2023/06/27/potencial-da-hub-de-hidrogenio-verde-do-ceara-e-apresentado-a-comissao-especial-do-senado/>>. Acesso em: 30 Novembro 2023.

SILVA, H. M. F. D.; ARAÚJO, F. J. C. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, 2022.

SILVA, I. A. D. Hidrogênio: Combustível do Futuro. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas**, 2016.

SOUTO, H. J. D. C.; NOGUEIRA, T. A. F. M. P. O Hidrogênio Como Vetor Energético do Futuro. **Neutro À Terra**, 19 Janeiro 2022.

URSÚA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen Production from Water Electrolysis. **Proceedings of the IEEE**, 2012.

VARGAS, R. A. et al. Hidrogênio: O Vetor Energético do Futuro? **Congresso de Administração da Faculdade Alficastelo**, 2006.

VIDAS, L. A.; CASTRO, R. Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. **Applied Sciences**, 01 Dezembro 2021.

ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO

DHM-72X10-540~555W

Design	Mechanical Specification	
	Cells Type Mono 182×91mm	Dimension (L×W×T) 2279×1134×35mm
	Weight 29kg	Packing 31pcs/pallet, 620pcs/40HQ
	Output Cable (Including connector) 4.0mm ² , 300/400mm in length, length can be customized	
	No. of Cells 144 (6×24)	
	Glass 3.2mm High Transmission, Antireflection Coating	
	Junction box IP68, 3 Bypass Diodes	
	Connector MC4 Compatible	
Operating Parameters		
	Maximum system voltage 1500V DC	
	Operating Temperature -40 ~ +85°C	
	Maximum series fuse rating 25A	
	Snow load, frontside 5400Pa	
	Wind load, backside 2400Pa	
	Nominal operating cell temperature 45°C±2°C	
	Application level Class A	

STC-Electrical Characteristics

Module Type	DHM-72X10			
Maximum Power (P _{max} /W)	540	545	550	555
Open-circuit Voltage (V _{oc} /V)	49.8	50.0	50.2	50.4
Maximum Power Voltage (V _{mp} /V)	42.0	42.2	42.4	42.6
Short-circuit Current (I _{sc} /A)	13.66	13.72	13.78	13.84
Maximum Power Current (I _{mp} /A)	12.86	12.91	12.97	13.03
Module Efficiency (%)	20.89	21.09	21.30	21.48
Temperature Coefficient of I _{sc}			0.05%/°C	
Temperature Coefficient of V _{oc}			-0.31%/°C	
Temperature Coefficient of P _{max}			-0.35%/°C	

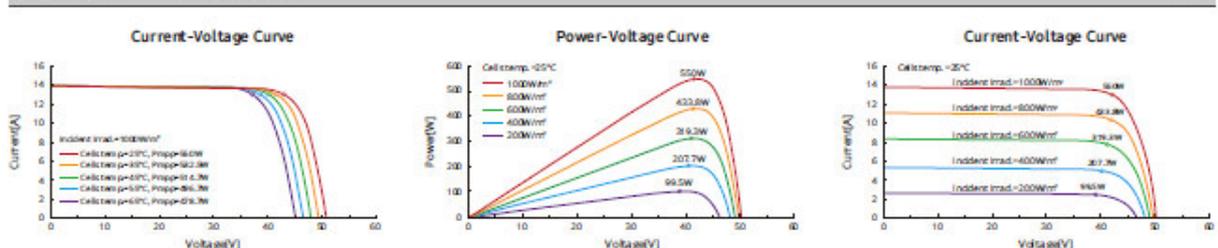
Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

NOCT-Electrical Characteristics

Maximum Power (P _{max} /W)	402	405	409	413
Open-circuit Voltage (V _{oc} /V)	46.7	46.9	47.1	47.3
Maximum Power Voltage (V _{mp} /V)	39.4	39.6	39.8	40.0
Short-circuit Current (I _{sc} /A)	11.04	11.09	11.13	11.18
Maximum Power Current (I _{mp} /A)	10.20	10.24	10.29	10.33

Standard Test Environment : Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

I-V Curve DHM-72X10-550W



ANEXO B – DATASHEET ELETROLISADOR ESCOLHIDO

FEATURES

	HySTAT® - 10	HySTAT® - 15	HySTAT® - 30
Technology	Alkaline		
Hydrogen production	10 Nm ³ /h (21 kg/day)	15 Nm ³ /h (32 kg/day)	30 Nm ³ /h
H ₂ delivery pressure	10 bar _g (145 psig) without a compressor		10 bar _g
H ₂ quality max impurities	99.998% O ₂ < 2 ppm, N ₂ < 12 ppm (higher purities optional); Atm. Dew point: -75°C		99.998% O ₂ < 2 ppm; Atm. Dew point: -75°C

Reprinted with the permission of Hydrogenics Corporation;
Copyright © Hydrogenics Corporation 2020. All rights reserved.

cummins.com/hydrogen

TECHNICAL SPECIFICATIONS

	HySTAT® - 10	HySTAT® - 15	HySTAT® - 30
Operating range	40-100%		40-100% (optional 20-100%)
System specific consumption*	55-60 kWh/kg		
Utilities required to operate the plant	Electrical power, potable water, nitrogen for purging requirements		
Rectifier input and efficiency	3 X 400 VAC ± 10% 50/60 Hz		
Installed power	115 kVA	155 kVA	275 kVA
Potable water consumption	Scope of supply includes a water treatment plant with reverse osmosis that requires 1.2 to 2 L/Nm ³ [13 to 17 L/kg of H ₂] (varies depending potable water quality) to produce 0.8 L/Nm ³ of demin water for the electrolysis process		
Total footprint (including maintenance area)	9.4 m x 5.8 m (~ 54 m ²)		
Product setup	Outdoor (20ft ISO container) / Indoor (skidded setup)		
Installation environment	Outdoors -20°C to 40°C / -4°F to 104°F		

*System specific consumption considers: the standard scope of supply refers to the outdoor version of this product (refer to BOS and BOP tables); 100% Load capacity; Beginning Of Life; 1% increase per annum (at >8500 hours operation); Range for indoor and outdoor setup