



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDENIZIO OLIVEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE DE MÉDIA ESCALA**

FORTALEZA

2024

EDENIZIO OLIVEIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE DE MÉDIA ESCALA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientadora: Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão

Coorientador: Prof. PhD. Domenico Sgrò

FORTALEZA

2024

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)

- S579a Silva, Edenizio Oliveira da.
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE DE MÉDIA ESCALA / Edenizio Oliveira da Silva. – 2024.
81 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão.
Coorientação: Prof. Dr. Domenico Sgrò.
1. Produção de hidrogênio. 2. Eficiência. 3. Fonte solar fotovoltaica. 4. Eletrolisador. 5. H2V. I. Título.
CDD 621.3
-

EDENIZIO OLIVEIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE DE MÉDIA ESCALA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Domenico Sgrò (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais, esposa, filhos, irmãos, professores e amigos que me apoiaram ao longo deste curso de mestrado em todos os momentos com as formas mais honrosas de ajuda que cada um pode contribuir.

AGRADECIMENTOS

Aos meus filhos Davi Moura Oliveira, Levi Moura Oliveira e Ravi Moura Oliveira, para que este título os incentive em suas trajetórias acadêmicas.

À minha esposa, Janaina Moura, pela compreensão e dedicação em me apoiar nesta jornada.

Aos meus pais, Maria Ivaldene (in memoriam) e Francisco Edenizar e meus irmãos por fazerem todo esforço possível para me incentivar e apoiar nos estudos ao longo de minha trajetória estudantil.

Aos meus amigos do trabalho pelo apoio necessário durante esta jornada.

À Prof^ª. Ruth Pastôra, por suas orientações e apoio no desenvolvimento deste trabalho enriquecedor para a sociedade.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, que contribuíram direta e indiretamente com esta conquista.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O hidrogênio verde (H_2V), produzido pelo processo de eletrólise a partir da água e de energia renovável, desempenhará um papel proeminente na descarbonização do planeta a longo prazo. Para que os países consigam alcançar a neutralidade climática, o H_2V é visto como essencial para zerar as emissões líquidas de carbono até 2050, sendo uma solução promissora capaz de impulsionar a transição energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A produção de H_2V tem o potencial de proporcionar flexibilidade ao sistema elétrico através da oferta de vários serviços diferenciados em escala de tempo, a exemplo de: regulação, balanço, reserva operacional e arbitragem de energia sazonal. Os serviços de flexibilidade permitem a integração mais suave de fontes de energia intermitentes, como solar fotovoltaica e eólica, podendo converter excedentes de eletricidade em H_2 através da eletrólise, bem como produzir eletricidade por meio de uma célula de combustível ou motor de combustão. O potencial de uso do H_2V abrange diferentes setores, incluindo transporte, indústria e residências, demonstrando assim sua importância para o surgimento de uma economia sustentável. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma planta industrial real de produção de H_2V composta de usina solar fotovoltaica com capacidade instalada de cerca de 3 MWp e eletrolisador com capacidade de 1,2 MW. Compreender a eficiência global e de cada etapa de produção de H_2V é fundamental para tomada de decisões mais assertivas sobre a implantação e integração de H_2V na rede elétrica. Adicionalmente, o trabalho analisa a eficiência da produção de eletricidade a partir do H_2V através do uso de célula combustível e turbina a gás. Com base em medições, os valores obtidos de eficiências dos estágios de produção de H_2V foram: usina fotovoltaica 22,06%, retificadores 94,61% e eletrolisador PEM 73,67%. Além disso, foi computado o valor de perda pelo consumo integrado de utilidades demandadas no processo de produção de H_2 , denominado Balance of Plant (BoP), com valor, 10,65% e um consumo específico de 63,04 kWh/kg. A eficiência global obtida para o sistema de produção de H_2V de 61,70%. A eficiência no processo de reconversão H_2 em eletricidade, a partir da combustão do gás hidrogênio em uma turbina a gás, 29,86%, e em célula de combustível, 37,32%. Em um contexto de desenvolvimento da economia do hidrogênio, o estudo e avaliação da eficiência de um sistema industrial de produção de H_2V pretende contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis para a produção de hidrogênio verde, e impulsionar assim a transição para um futuro energético mais limpo.

Palavras-chave: Produção de hidrogênio; Eficiência; Fonte solar fotovoltaica; Eletrolisador; Retificador; Célula a combustível; H₂V.

ABSTRACT

Green hydrogen (H_2V), produced by the process of electrolysis from water and renewable energy, will play a prominent role in long-term planet decarbonization. H_2V is considered a promising solution capable of driving the energy transition and reducing dependence on fossil fuels. H_2V is seen as essential for the world to achieve net-zero carbon emissions by 2050. The production of H_2V has the potential to provide flexibility to the electrical system through the provision of various differentiated services over time, such as regulation, balancing, operational reserve, and seasonal energy arbitrage. Flexibility services allow for smoother integration of intermittent energy sources, such as solar photovoltaic and wind, by converting electricity surpluses into H_2 through electrolysis and producing electricity through a fuel cell or combustion engine. The potential use of H_2V spans different sectors, including transportation, industry, and power system, demonstrating its importance for the emergence of a sustainable economy. The objective of this work is to evaluate the performance of a real industrial H_2V production plant composed of a solar photovoltaic power plant with an installed capacity of about 3 MWp and an electrolyzer with a capacity of 1.2 MW. Understanding the overall efficiency and each stage of H_2V production is fundamental for making more assertive decisions regarding the implementation and integration of H_2V into the electrical grid. Additionally, the work analyzes the efficiency of electricity production from H_2V through the use of a fuel cell and gas turbine. Based on measurements, the efficiency values obtained for the stages of H_2V production were: photovoltaic plant 22.06%, rectifiers 94.61% and PEM electrolyzer 73.67%. Furthermore, the loss value due to the integrated consumption of utilities demanded in the H_2 production process, known as Balance of Plant (BoP), was calculated at 10.65%, with a specific consumption of 63.04 kWh/kg. The overall efficiency obtained for the H_2V production system was 61.70%. The efficiency in the process of reconverting H_2 into electricity, from burning the hydrogen gas in a gas turbine, 29.86% and for the hydrogen cell, 37.32%. In the context of developing the hydrogen economy, the study and evaluation of the efficiency of an industrial H_2V production system aim to contribute to the development of more effective and sustainable solutions for green hydrogen production, thus driving the transition to a cleaner energy future.

Keywords: Hydrogen production; Efficiency; Solar photovoltaic source; Electrolyzer; Rectifier; Fuel cell; H_2V .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da temperatura média global da superfície.	18
Figura 2 – Vetor H_2V	20
Figura 3 – Gráfico de publicações sobre produção de hidrogênio com eletrolisador PEM.	21
Figura 4 – Gráfico participação de energias renováveis no consumo total de energia.	25
Figura 5 – Vantagens do uso de energia renovável para produção de H_2V	26
Figura 6 – Classificação do hidrogênio por cores.	28
Figura 7 – Aranjo simples processo de eletrólise.	29
Figura 8 – Tecnologia de Eletrólise Alcalina da Água.	31
Figura 9 – Tecnologia de Eletrólise PEM.	32
Figura 10 – Tecnologia de Eletrólise SOE.	33
Figura 11 – Tecnologia de Eletrólise AEM.	34
Figura 12 – Eletrólise PEM - Arraste de Protons H_2	36
Figura 13 – Pilha PEM.	37
Figura 14 – Fluxograma simplificado produção de água de processo.	38
Figura 15 – Tanque de armazenamento de H_2V	40
Figura 16 – Vista aérea da usina fotovoltaica no Ceará.	42
Figura 17 – Total Diário da Irradiação Global Horizontal.	42
Figura 18 – Módulo Fotovoltaico.	43
Figura 19 – Inversor Sungrow 250 kW.	44
Figura 20 – Transformador elevador 0,8/6,6 kV.	44
Figura 21 – Gráfico geração mensal de energia elétrica da UFV.	45
Figura 22 – Retificador de 12 pulsos.	46
Figura 23 – Conversor CA/CC.	47
Figura 24 – Contentor eletrolisador PEM.	47
Figura 25 – Diagrama do Eletrolisador PEM.	49
Figura 26 – Diagrama de potência elétrica da planta de produção de H_2 de 1,2 MW.	50
Figura 27 – Gráfico eficiência real da UFV.	52
Figura 28 – Amostragem da tensão de saída do retificador.	53
Figura 29 – Gráfico eficiência do retificador.	54
Figura 30 – Multimedidor de energia.	54
Figura 31 – Gráfico eficiência da Pilha A.	57

Figura 32 – Gráfico perdas por consumo <i>BoP</i>	58
Figura 33 – Siemens Energy SGT-400.	60
Figura 34 – Simulação no Acomb.	61
Figura 35 – Gráfico curvas de eficiência com a variação de produção de H_2V	62
Figura 36 – Gráfico da eficiência x corrente do Stack A	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado da arte tecnologias disponíveis de eletrólise da água AE, PEM, SOE, AEM.	22
Tabela 2 – Propriedades do Hidrogênio	27
Tabela 3 – Fontes de Energia e suas Participações	27
Tabela 4 – Considerações para uso nos cálculos de eficiência da UFV - Dados técnicos e constantes.	52
Tabela 5 – Variáveis e constantes da equação de eficiência.	57
Tabela 6 – Dados nominais do Eletrolisador	58
Tabela 7 – Valores reais de eficiência e perdas nas etapas de produção de H_2V	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AE</i>	<i>Alkaline Electrolyzer</i>
<i>BoP</i>	<i>Balance of Plant</i>
<i>CCM</i>	<i>Catalyst-Coated Membrane</i>
<i>HHV</i>	<i>Higher Heating Value</i>
<i>LHV</i>	<i>Lower Heating Value</i>
<i>PEM</i>	<i>Proton Exchange Membrane</i>
AEM	Anion Exchange Membrane
C.E	Consumo Específico de Energia
CC	Corrente Contínua
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CP	Capacidade de Produção
GEE	Gases de Efeito Estufa
PCS	Poder Calorífico Superior
PTL	Camadas Porosas de Transporte
REH	Reação de Evolução do Hidrogênio
REO	Reação de Evolução do Oxigênio
SOE	Solid Oxide Electrolysis
UFV	Usina Fotovoltaica
UV	Ultra Violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Gás hidrogênio
O_2	Gás oxigênio
IrO_2	Dióxido de Irídio
$US\$$	Dólar Americano
MW	Megawatt
MWp	Megawatt-pico
MWh	Megawatt-hora
$kWh/m^2/dia$	Kilowatt-hora/ m^2 /dia
μm	Micrômetro
$\mu S/cm$	Condutividade elétrica
Bar	Bar
Nm^3	Normal metro cúbico
Nm^3/h	Normal metro cúbico por hora
Kg/h	Quilogramas por hora
kJ/mol	Quilojoule por mol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Revisão Literária - Estado da Arte	20
1.2	Objetivos	23
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	23
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	23
1.3	Estrutura do trabalho	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Fontes Renováveis	25
2.2	O Hidrogênio	26
2.3	Eletrólise	28
2.3.1	<i>Eletrólise alcalina</i>	30
2.3.2	<i>Eletrólise membrana de troca de prótons - PEM</i>	31
2.3.3	<i>Eletrólise de Óxido Sólido - SOE</i>	32
2.3.4	<i>Membrana de Troca de Ânions - AEM</i>	33
2.4	Pilha PEM	34
2.5	Água de processo	37
2.6	Secagem e purificação do H_2	38
2.7	Armazenamento de H_2	39
2.8	Considerações finais	40
3	METODOLOGIA	41
3.1	Especificação da planta solar fotovoltaica	41
3.1.1	<i>Módulos Fotovoltaicos</i>	43
3.1.2	<i>Inversor de Frequência</i>	43
3.1.3	<i>Transformadores Elevadores</i>	44
3.1.4	<i>Retificador CA/CC</i>	45
3.2	Especificação da planta de produção de H_2	47
3.3	Diagrama de potência elétrica da planta de produção de H_2	50
3.4	Análise da eficiência do processo de produção de H_2V	50
3.4.1	<i>Eficiência de conversão da UFV</i>	50
3.4.2	<i>Eficiência do sistema retificador</i>	53

3.4.3	<i>Eficiência do sistema eletrolisador</i>	55
3.4.4	<i>Eficiência de conversão de eletrólise com Balance of Plant (BoP)</i>	58
3.5	Eficiência de reconversão utilizando Célula de hidrogênio e Turbina a Gás	59
3.5.1	<i>Célula de Hidrogênio</i>	59
3.5.2	<i>Turbina a gás</i>	60
4	RESULTADOS	62
4.1	Eficiência e capacidade de produção	62
4.2	Eficiência individualizada dos sistemas	63
4.3	Comparativo e diferenciais do estudo apresentado em relação ao apresentado por outros autores	64
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
5.1	Trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	71
	ANEXOS	71
	ANEXO A – Amostragem de dados da UFV	71
	ANEXO B – Datasheet Módulos Bifacial HC 72M -JINKO	74
	ANEXO C – Amostragem de dados do Eletrolisador	77
	ANEXO D – Datasheet do Inversor	79

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os combustíveis fósseis têm dominado o cenário energético global. Apesar da finitude, distribuição geográfica desigual e impactos climáticos consideráveis, como o aquecimento global e a poluição atmosférica causada pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) os recursos fósseis têm garantido o suprimento energético mundial por séculos (IRENA, 2021).

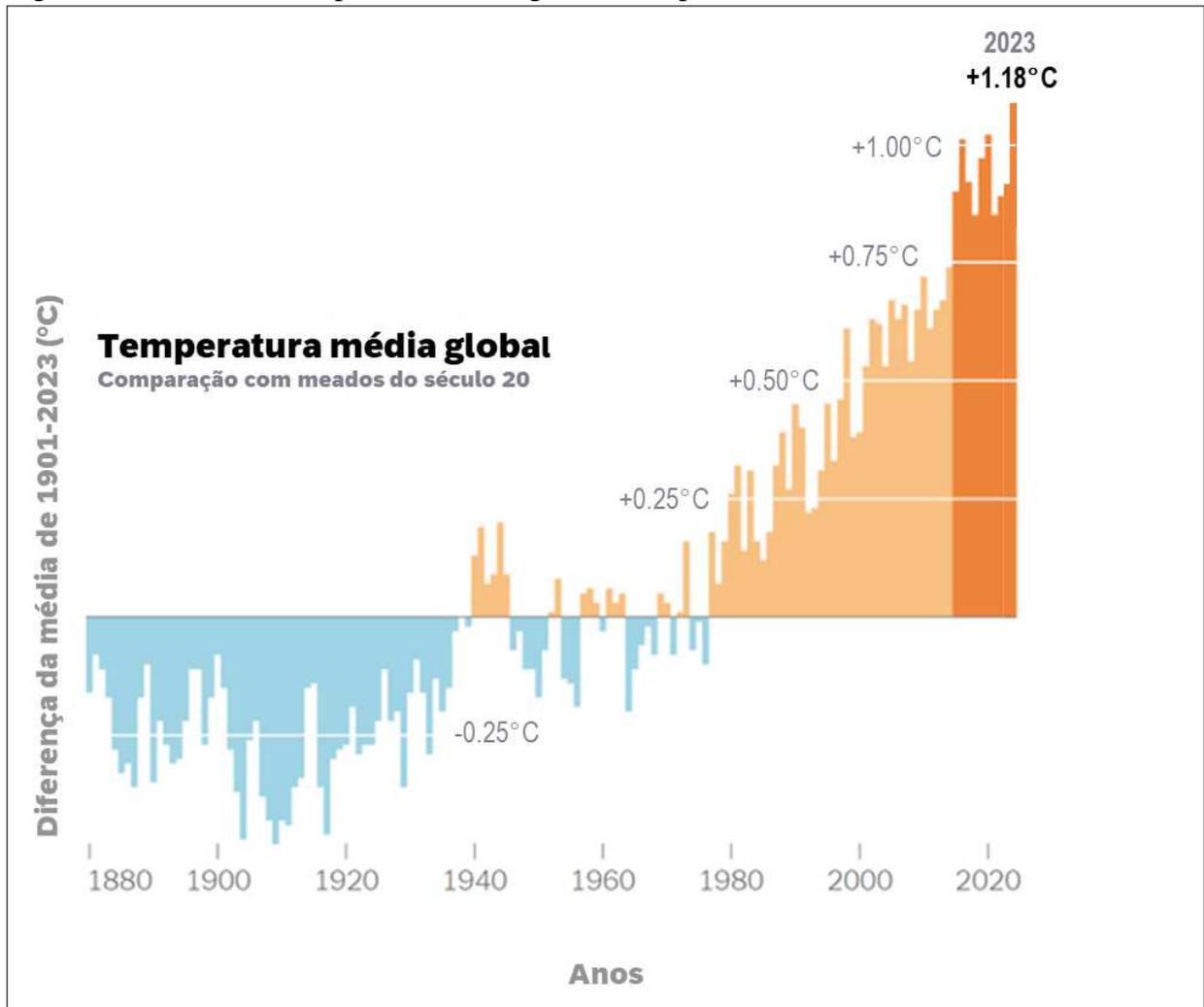
Em meio aos efeitos adversos do uso intensivo dos recursos fósseis, o panorama energético está passando por uma transformação significativa, impulsionada por uma série de mudanças de caráter técnico, econômico e ambiental em escala global. A ascensão das energias renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, abre caminho para um futuro energético mais sustentável, mas também exige soluções para garantir a segurança energética e a continuidade do fornecimento de energia limpa (IRENA, 2020).

O hidrogênio verde emerge como um catalisador essencial para a descarbonização gradual dos setores de transporte, industrial e elétrico. Sua versatilidade e potencial para reduzir as emissões de carbono têm despertado um interesse global crescente. Prevê-se um aumento significativo na demanda mundial por hidrogênio nos próximos anos, impulsionado por iniciativas de sustentabilidade e políticas energéticas. Até 2025, estima-se que o consumo global atinja a marca de 50 milhões de toneladas (FRAILE *et al.*, 2015), destacando o papel crucial que o hidrogênio desempenhará na construção de um futuro mais limpo e sustentável.

As profundas mudanças climáticas que o planeta está enfrentando despertam a necessidade urgente de ações concretas e abrangentes para mitigar os impactos negativos causados pela emissão de poluentes. De acordo com Climate (2024), a temperatura média da Terra aumentou em média 0,06 °C por década, desde 1850. No entanto, a partir de 1982, a taxa de aquecimento acelerou, chegando a 0,20 °C por década, uma taxa três vezes mais rápida do que antes. No ano de 2023 observou o aumento da temperatura da superfície terrestre, atingindo a marca de 1,18 °C acima da média do século XX (1901 a 2000) que era de 57,0 °F (13,89 °C). Foi o ano mais quente desde 1850, período que se iniciou o acompanhamento dos registros. Nessa tendência, o planeta Terra atingiu a marca histórica dos 10 anos mais quentes na última década (2014-2023) (CLIMATE, 2024).

O gráfico visto na Figura 1 mostra uma comparação das diferenças das médias das temperaturas do século XX de 1880–2023. As barras azuis indicam anos mais frios do que a média; as barras laranjas mostram anos mais quentes que a média.

Figura 1 – Gráfico da temperatura média global da superfície.



Fonte: NASA:Goddard Institute for Space Studies (2022).

Nesse contexto, o Acordo de Paris, assinado em 2015, representa um marco na mitigação da mudança climática e na consolidação do desenvolvimento sustentável como objetivo das principais economias do mundo. Nas deliberações da 21ª Conferência das Partes (COP21) realizada em Paris, 195 países acordaram acerca da manutenção do aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C e, preferencialmente, abaixo de 1,5 °C dos níveis pré-industriais (1850-1900). Para tal, são necessárias reduções significativas nas emissões GEE, através da descarbonização dos sistemas energéticos e maior participação de fontes renováveis, ampliação da eletrificação da oferta energética, que em conjunto poderiam representar cerca de 75% da redução de emissões (IRENA, 2019).

Dado que as emissões de GEE associadas ao setor energético correspondem a cerca de dois terços das emissões globais, estima-se que, para o alcance das metas globais de descarbonização, as emissões relacionadas à energia precisam estar 52% abaixo do nível de

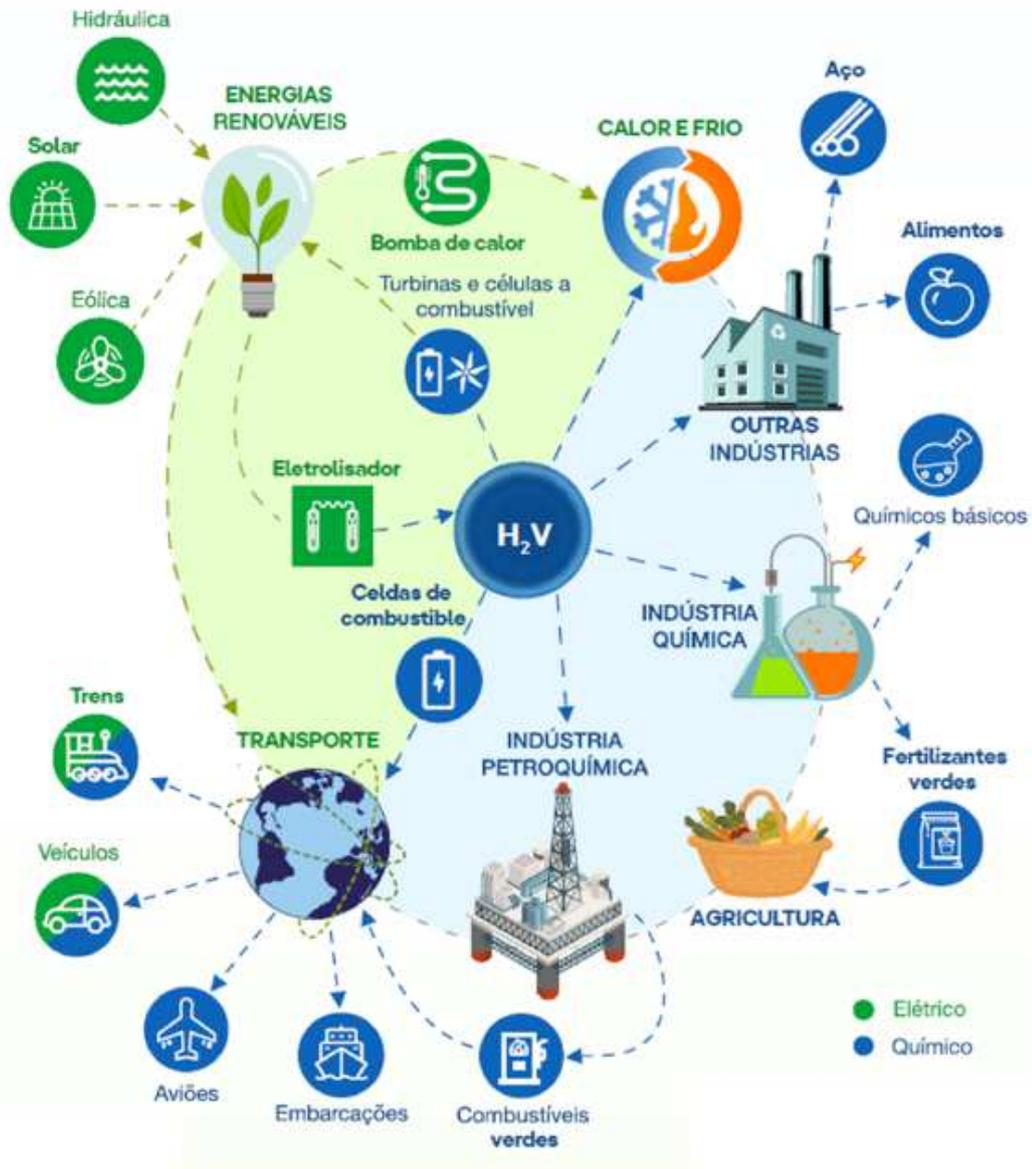
2019, até 2040 (IRENA, 2019; IEA, 2019). Dessa maneira, a descarbonização é considerada o elemento central do processo de transição, fundamentada pelo esforço coordenado das economias em direção ao desenvolvimento sustentável.

Para enfrentar esta série de desafios exige superação, destacando-se a variabilidade e a intermitência inerentes às Fontes Renováveis Variáveis (FRV), assim como a necessidade de equilibrar o suprimento e a demanda energética. A solução para essa equação consiste na adoção de um vetor energético de alto potencial, que possibilite a desvinculação entre produção e consumo de energia, além de oferecer soluções viáveis para o armazenamento e transporte, tanto para uso direto quanto como matéria-prima e geração de energia.

O hidrogênio (H_2) é um combustível universal, leve e muito reativo, obtido por meio de um processo químico de eletrólise da água, por meio de uma corrente elétrica para separar o hidrogênio do oxigênio. Sendo a origem desta energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica, que não resulta na emissão líquida de dióxido de carbono (CO_2) ou outros gases de efeito estufa durante o processo de produção, é considerado Hidrogênio Verde (H_2V).

Sob essa ótica, torna-se evidente que o hidrogênio Verde (H_2V) atende a todos os critérios para emergir como o vetor energético chave na transição para um modelo energético integralmente baseado em fontes renováveis, com aplicações em diversos setores da economia energética mundial; sua aplicação se distribui desde a eletricidade, a agricultura, a indústria química, a indústria petroquímica, outras indústrias, o transporte, a agricultura, entre outras, conforme ilustrado na Figura 2 (IBERDROLA, 2022). Essa transição é identificada como economia do hidrogênio, um termo técnico que se refere à capacidade do hidrogênio de atuar como portador de energia versátil, cujas raízes remontam à década de 70, durante a crise do petróleo (EPE, 2022).

Figura 2 – Vetor H2V.

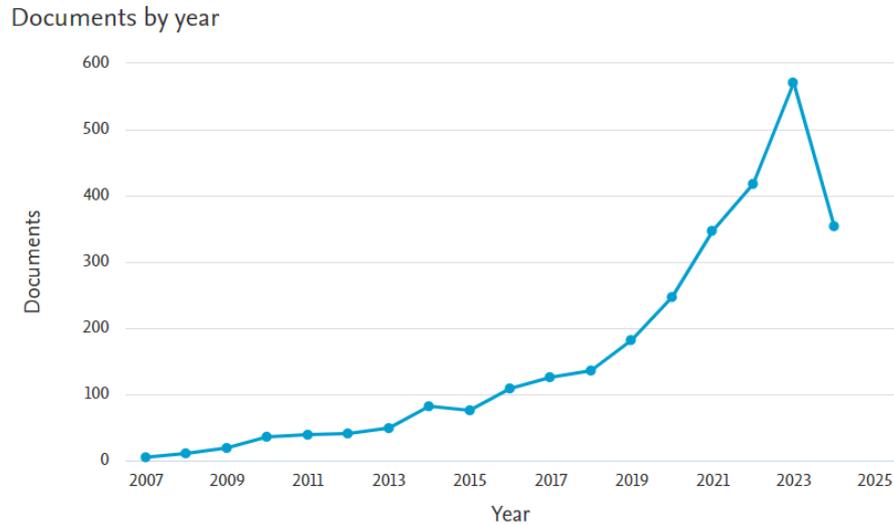


Fonte: (IBERDROLA, 2022).

1.1 Revisão Literária - Estado da Arte

O estado da arte da pesquisa está centrada nos eletrolisadores de hidrogênio tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*), bastante vasto e diversificado, abrangendo desde estudos fundamentais sobre os mecanismos de transporte iônico e reações eletroquímicas, até o desenvolvimento de tecnologias avançadas de fabricação e implementação em larga escala. Uma análise abrangente da literatura atual revela uma série de avanços significativos e desafios persistentes neste campo. O impacto da cadeia de valor do hidrogênio verde e seu crescimento são objeto de estudos intensivos, conforme mostrado na Figura 3, de publicações recentes sobre estudos relacionados a produção, eficiência e viabilidade técnica dos eletrolisadores de hidrogênio.

Figura 3 – Gráfico de publicações sobre produção de hidrogênio com eletrolisador PEM.



Fonte: O Autor.

O hidrogênio é o elemento químico mais simples e mais leve da Tabela Periódica. É encontrado no meio terrestre combinado com outras substâncias químicas, como a água e o gás natural. A densidade do gás é $0,0899 \text{ kg/Nm}^3$, valor 15 vezes mais leve do que a densidade do ar. É um gás incolor, inodoro e não tóxico, embora bastante reativo. Os limites de inflamabilidade no ar são de 4 a 75% em volume, e no oxigênio de 4 a 95% em volume. O hidrogênio é o combustível com maior quantidade de energia por unidade de massa, com poder calorífico superior de $3,54 \text{ kWh/Nm}^3$ ($39,42 \text{ kWh/kg}$). A energia liberada na combustão do gás por unidade de massa é de 2 a 3 vezes maior do que a fornecida por outros combustíveis como biodiesel, metanol, etanol, gás natural e gás liquefeito de petróleo. (URSÚA *et al.*, 2012; FUKUROZAKI, 2011; SULEMAN *et al.*, 2015).

O hidrogênio está cada vez mais reconhecido como uma fonte de combustível fundamental globalmente, e a geração de hidrogênio a partir da energia solar está desempenhando um papel crucial nessa tendência. A eletricidade gerada dentro do sistema foi utilizada ativamente para a produção de hidrogênio em um processo de eletrólise de membrana de troca de prótons para gerar hidrogênio, simulações utilizando software com equações de engenharia específico obteve-se os resultados para eficiência energética máxima para PEM de 70,01%, 69,98%, 69,95% e 69,92%. (ATIZ; KARAKILÇIK, 2024).

O consumo de energia ativa e da taxa de produção de H_2 obtida para diferentes modelos de eficiência da pilha, nomeadamente como um valor constante igual ao seu mínimo (ou seja, 48 kWh/kgH_2), ao seu máximo (ou seja, 40 kWh/kgH_2) e um variável dependendo do

ponto de ajuste do eletrolisador de Hidrogênio (HE), em que superestima a capacidade do (HE) na produção de H_2 ao assumir uma eficiência máxima constante. Isso destacaria a importância da consideração da eficiência variável na modelagem do HE em estado estacionário (CORATO; DOZEIN, 2020).

De acordo com Bareib *et al.* (2019), a partir de resultados estequiométricos, são necessários o fornecimento de 9 kg de água (H_2O) para produzir 1 kg de hidrogênio (H_2). Além disso, 55 kWh de eletricidade são necessários para a divisão da água com uma eficiência de 60%, em relação ao poder calorífico inferior (PCI). A escolha das fontes de energia tem um impacto importante nos resultados, essas fontes determinam as emissões de gases de efeito estufa, bem como a demanda de energia cumulativa (CED) de todo o ciclo de vida.

A eficiência e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos estão ligados à temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos. Conforme a temperatura aumenta, a eficiência dos sistemas fotovoltaicos diminui, impactando a produção de eletricidade. Os módulos de silício cristalino PV apresentam uma redução na eficiência de aproximadamente 0,5% para cada aumento de 1 °C na temperatura de operação das células fotovoltaicas.(SANTOS *et al.*, 2021).

Com base em dados técnicos coletados de fabricantes de eletrólise, foi realizado estudo do estado da arte das tecnologias *Alkaline Electrolyzer (AE)*, *PEM Electrolyzer*, *Solid Oxide Electrolysis (SOE)*, *Anion Exchange Membrane (AEM)*, Tabela 1.

Tabela 1 – Estado da arte tecnologias disponíveis de eletrólise da água AE, PEM, SOE, AEM.

Especificação	Alcalina	PEM	SOEC	AEM
Maturidade da tecnologia	Madura	Comercial	P&D	P&D
Temperatura da célula, °C	65–100	70–90	900–1000	50–70
Pressão da célula, bar	25–30	30–80	<30	-30
Densidade de corrente, mA/cm ²	200–500	800–2500	300–1000	200–500
Voltagem da célula, V	1.8–2.4	1.8–2.2	0.95–1.3	1.8–2.2
Eficiência da voltagem, %	50–70.8	48.5–65.5	81–86	39.7
Consumo específico de energia do sistema, kWh/Nm ³	4.5–7.5	5.8–7.5	2.5–3.5	4.8–5.2
Produção de hidrogênio, Nm ³ /h	<760	0.265–30	-	0.25–1
Vida útil do stack, h	10,000	<20,000	<40,000	NA
Eletrolito	20–30% KOH	Ácido perfluorosulfonado (PFSA)	Zircônia estabilizada com itria (YSZ)	Suporte de polímero DVB com KOH ou NaHCO
Separador	Amianto, NiO, ZrO, estabilizado com malha PPS	PFSA (e.g., Nafion)	Eletrolito sólido	Polissulfona de amônia quaternária (QAPS)
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻	OH ⁻
Catalisador OER	Aço inoxidável perfurado revestido com Ni	Óxido de Ir/Ru	Tipo perovskita	COO
Catalisador HER	Ni	Platina	Ni/YSZ	Ni
Pureza do hidrogênio, (vol%)	99.3–99.9	99.999	-	99.99
Custo de capital (€/kW _{el})	1000–1200	1860–2320	>2000	NA

Fonte: (EL-SHAFIE, 2023).

Ao analisar a Tabela 1, observa-se que os eletrolisadores PEM são tecnologias competitivas em relação às tecnologias alcalinas, pois podem oferecer eficiência de voltagem celular e eficiência energética do sistema semelhantes. Além disso, a eficiência energética do sistema inclui a eficiência dos acessórios, como conversores AC-DC, principalmente baseados em transformadores, que apresentam alta eficiência energética (cerca de 97%). Portanto, o aprimoramento da eficiência energética para ambas as tecnologias é uma questão desafiadora. Além disso, a

corrente contínua necessária (cerca de 1000 amperes) e a voltagem (100 volts) são obtidas usando conversores AC-DC, que podem ser baseados em tiristores ou retificador trifásico conectado a um choppeador DC. Ambos os tipos de conversores AC-DC apresentam vantagens, desvantagens. Em termos de vida útil, os eletrolisadores alcalinos oferecem mais perspectivas em comparação com os eletrolisadores PEM. Por outro lado, a compreensão das interações entre os conversores AC-DC e os eletrolisadores é uma questão-chave, especialmente do ponto de vista da vida útil, (YODWONG *et al.*, 2020).

A eficiência do processo de eletrólise pode ser definida de várias maneiras. De acordo com Zeng e Zhang (2010), são apresentadas 6 formas de cálculo distintas. Outras propostas foram encontradas nos trabalhos de (GAMBETTA, 2010; WANG *et al.*, 2014; DJAFOUR *et al.*, 2011; AHMAD; SHENAWY, 2006), que definem que a eficiência energética de um eletrolisador é a relação entre o poder calorífico superior do hidrogênio formado e a energia elétrica fornecida ao sistema. A forma mais comum relaciona o poder calorífico do hidrogênio em função da tensão operacional, energia elétrica ou potência elétrica inseridas no sistema.

Os eletrolisadores PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*, destacam-se por suas eficiências energéticas superiores, taxas de produção mais elevadas e um perfil compacto. No entanto, sua implementação implica custos de investimento significativos, especialmente devido aos materiais utilizados nas membranas e eletrodos, e também tendem a apresentar uma vida útil mais limitada (ZENG; ZHANG, 2010; URSÚA *et al.*, 2012).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar a avaliação de viabilidade técnica em termos de eficiência elétrica de uma planta de hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água por meio de fonte solar fotovoltaica.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência da fonte fotovoltaica até a entrada do retificador;
- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência do conversor

eletrônico de frequência CA/CC;

- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência do eletrolisador de hidrogênio de membrana polimérica (PEMEL);
- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência de conversão de eletrólise com *Balance of Plant (BoP)* (consumo de energia serviço auxiliar);
- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência global da planta de produção de hidrogênio verde;
- Apresentar a metodologia de cálculo e os resultados da avaliação da eficiência de reconversão utilizando célula de hidrogênio e turbina a gás;
- Apresentar análise comparativa entre as eficiências obtidas neste trabalho e as de referência literária;

1.3 Estrutura do trabalho

O restante do trabalho está dividido em quatro capítulos adicionais descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, onde são apresentados os principais conceitos sobre a produção de hidrogênio verde, e os equipamentos que compõem uma planta de produção de hidrogênio sustentável, e as referências técnicas de equações da eficiência de projeto.

O capítulo 3 descreve a Metodologia, envolvendo a coleta de dados de medições reais da geração da usina solar fotovoltaica, da energia consumida no retificador, da energia elétrica entregue às pilhas do eletrolisador, do consumo de energia elétrica do sistema auxiliar (*BoP*) e da produção de hidrogênio da planta. Adicionalmente, abrange a eficiência energética em todas as etapas que envolve a conversão de H_2V , assim como as equações empregadas para a determinação destas variáveis.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises para avaliar e compreender o desempenho de cada etapa da planta de produção do hidrogênio verde estudada. Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

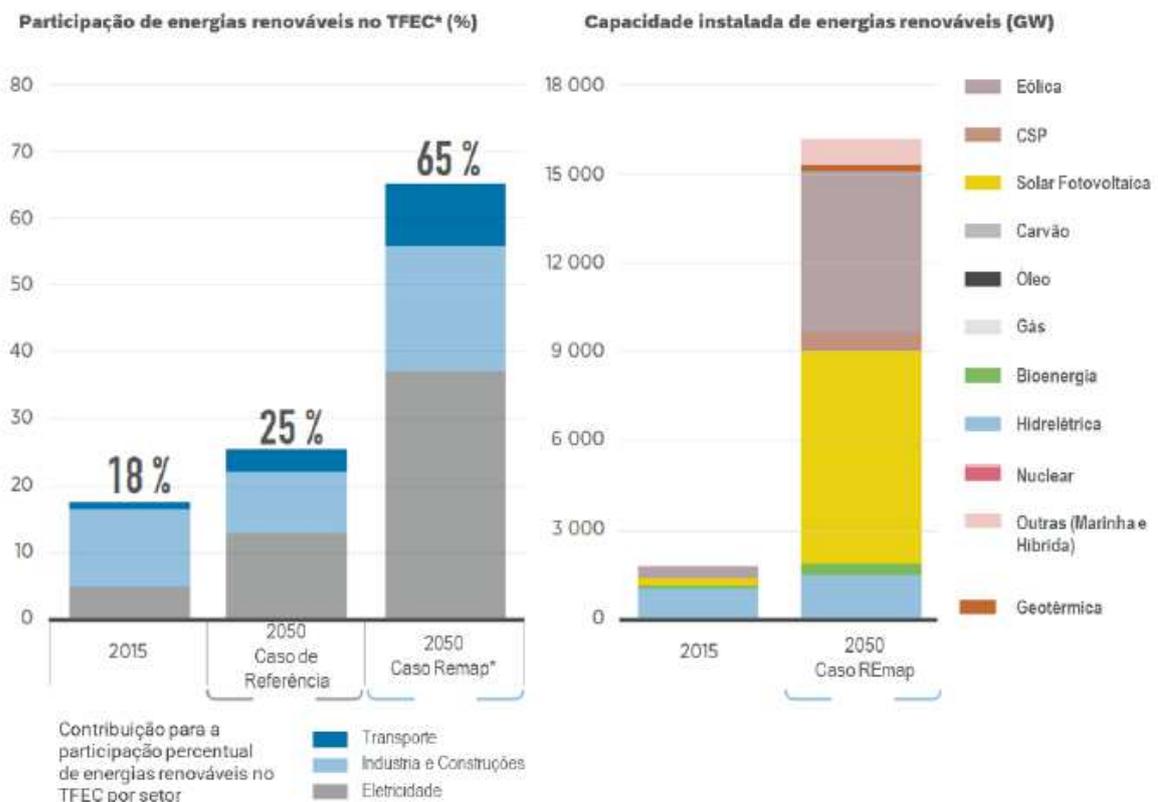
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão abordados conceitos e referenciais teóricos relevantes de toda à cadeia de produção de hidrogênio verde, desde a geração de energia renovável solar fotovoltaica até a obtenção do hidrogênio por eletrólise da água. Por fim, são expostos os conceitos fundamentais para a análise de eficiência de conversão.

2.1 Fontes Renováveis

De acordo com análises da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2018), mais de 90% das reduções necessárias nas emissões globais de CO_2 será a partir do uso energia renovável e para alcançar esse objetivo, a participação da energia renovável no consumo global final de energia precisa aumentar de 18% hoje para 65% em 2050. Particularmente eólica e solar, representarão a grande maioria da capacidade de geração cerca de 60% de toda a geração de eletricidade, Figura 4.

Figura 4 – Gráfico participação de energias renováveis no consumo total de energia.

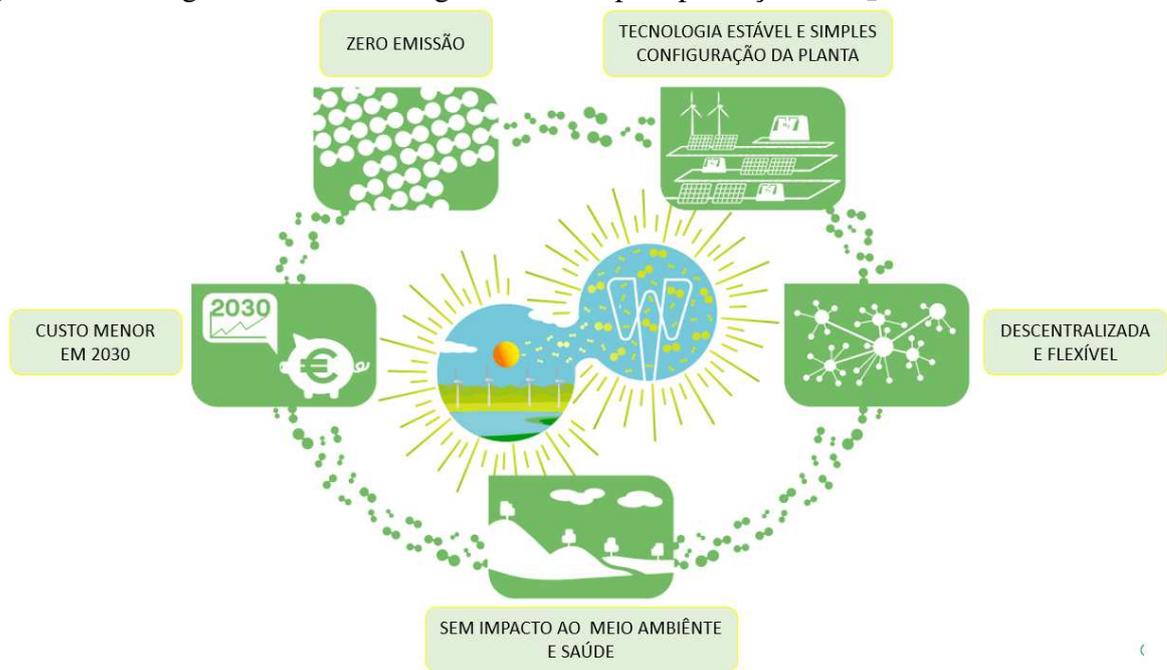


* Nota 1: CSP = energia solar concentrada; GW = gigawatt; TFEC = consumo de energia final.

** Nota 2: Notas: REmap refere-se ao roteiro da IRENA para aumentar rapidamente as energias renováveis nas próximas décadas; o Caso de Referência refere-se ao caminho traçado pelos planos e políticas atuais; CO_2 = dióxido de carbono; Gt/ano = gigatoneladas por ano; c/ER = com energia renovável.

A Figura 5, ilustra os principais motivos para uso de fontes renováveis, entre os quais estão entre suas vantagens mais significativas, o fato desta energia provir de recursos de fontes praticamente inesgotáveis (solar e eólico), aplicação de tecnologias amplamente já difundidas e utilizadas, instalações descentralizadas e rápidas, com custos que tendem a reduzir ao longo do tempo e avanço tecnológico. Associados a isto o baixo impacto ambiental de instalação e operação, associado a zero emissões de gases de efeito estufa.

Figura 5 – Vantagens do uso de energia renovável para produção de H_2V .



Fonte: (ENEL, 2023).

2.2 O Hidrogênio

O hidrogênio é encontrado predominantemente na forma molecular H_2 , sendo notável por sua natureza gasosa, inodora, insípida, incolor, insolúvel em água, mais leve que o ar e extremamente inflamável à temperatura e pressão normais de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 atm . Para ser mantido em estado líquido, deve ser armazenado em temperaturas criogênicas abaixo de $(-253\text{ }^{\circ}\text{C})$. Caso a temperatura seja maior que esse limite, permanecerá em forma de gás, podendo ser armazenado em cilindros de alta pressão na forma de gás comprimido (BURTON *et al.*, 2021), na Tabela 2, podemos observar as características físicas do hidrogênio.

Tabela 2 – Propriedades do Hidrogênio

Propriedade	Valor
Poder Calorífico Superior (PCS)	141.880 kJ/kg
Poder Calorífico Inferior (PCI)	119.960 kJ/kg
Densidade (0 °C, 1 bar)	0,08987 kg/m ³
Densidade (líquido, -253 °C)	70,8 kg/m ³
Densidade (sólido, -262 °C)	70,6 kg/m ³

Fonte: Sano (2009)

Segundo Balat (2008), a vasta maioria da produção de hidrogênio, atualmente, origina-se de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, essa predominância levanta preocupações sobre a sustentabilidade e os impactos ambientais associados a essa prática. Detalhes sobre a produção global de hidrogênio, incluindo a distribuição por tipo de fonte, volume, bem como vantagens e desvantagens, estão disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3 – Fontes de Energia e suas Participações

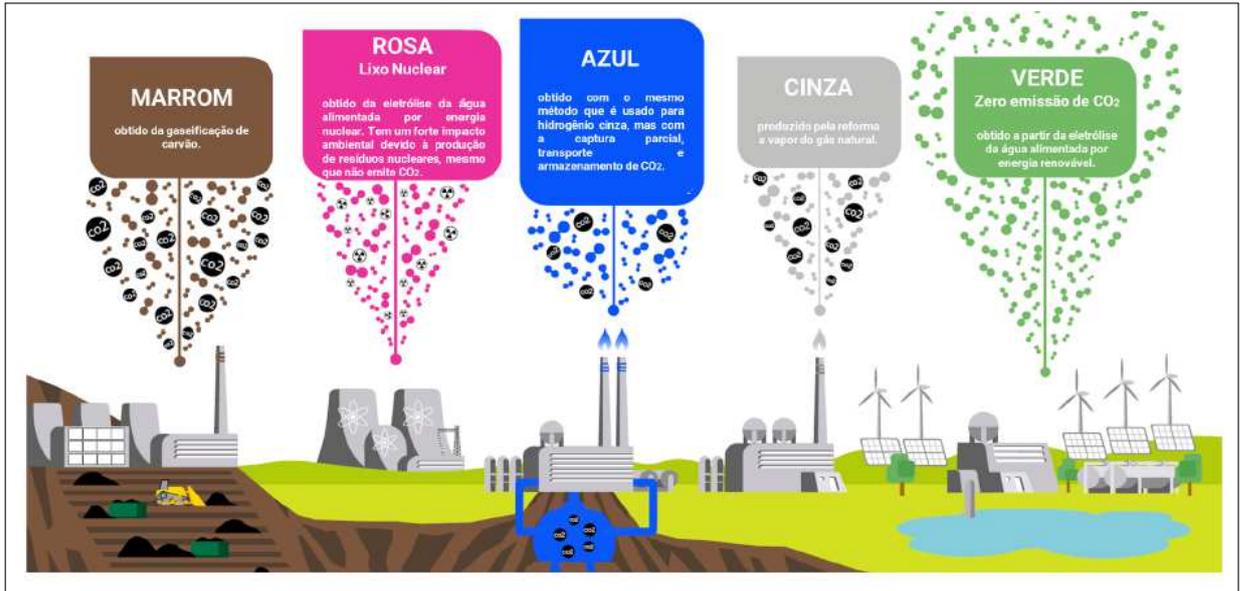
Fonte de Energia	Bm³/ano*	Participação (%)
Gás Natural	240	48
Petróleo	150	30
Carvão	90	18
Eletrólise	20	4
Total	500	100

Fonte: El-Shafie (2023)

*Bm³: bilhão de metros cúbicos.

De acordo com Nelson *et al.* (2020) para determinar o tipo de produção de hidrogênio, considera-se, a matéria-prima de hidrogênio, a entrada de energia no processo de produção e o tratamento das emissões de carbono que possam surgir. Para distinguir esta classificação, foi criando um código internacional com as principais cores consideradas pela academia conforme Figura 6.

Figura 6 – Classificação do hidrogênio por cores.

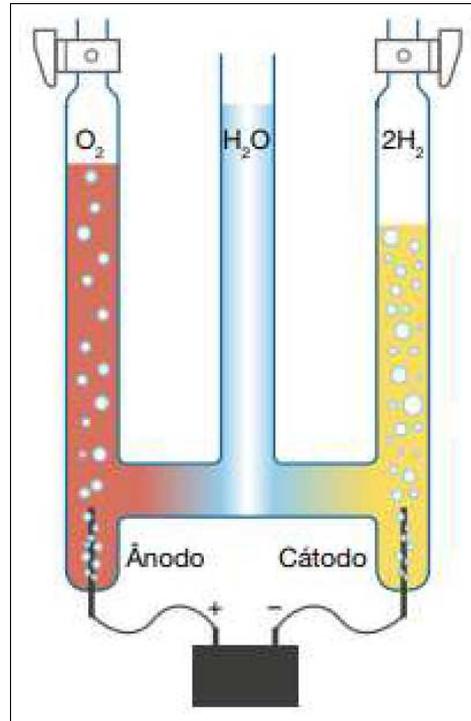


Fonte: (ENEL, 2023).

2.3 Eletrólise

O eletrolisador é o equipamento responsável pelo processo de eletrólise da água. Neste processo, a eletricidade é fornecida para ocorrer a quebra da molécula de água, em que a diferença de potencial teórico mínimo para ocorrer esse processo é de 1,48 Volts. Sabe-se que nos processos reais, o potencial necessário é maior devido à existência de perdas, inerentes ao sistema, na forma de calor. Em geral, a eficiência dos eletrolisadores modernos variam de 60% a 90% (SANTOS; SEQUEIRA, 2013). Na Figura 7 é possível observar a esquematização do processo de eletrólise onde, o volume de hidrogênio é aproximado ao dobro do volume de oxigênio (SILVA, 2014).

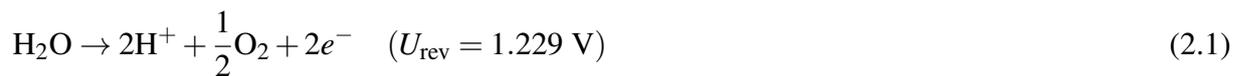
Figura 7 – Aranjo simples processo de eletrólise.



Fonte: (SILVA, 2014).

O processo de decomposição eletroquímica da água ocorre conforme as seguintes reações de evolução no ânodo e no cátodo. As reações de ânodo e cátodo e seus respectivos potenciais reversíveis em uma célula eletrolítica de água podem ser expressos da seguinte forma:

Anodo:



Catodo:



Resultado da Reação:



A tensão da célula reversível (U_{rev}) pode ser derivada como uma função da energia livre de Gibbs, (EL-SHAFIE, 2023).

A água purificada ou desionizada pode ser usada como matéria-prima, a energia renovável pode fornecer eletricidade contínua e estável para eletrolisadores de hidrogênio. A

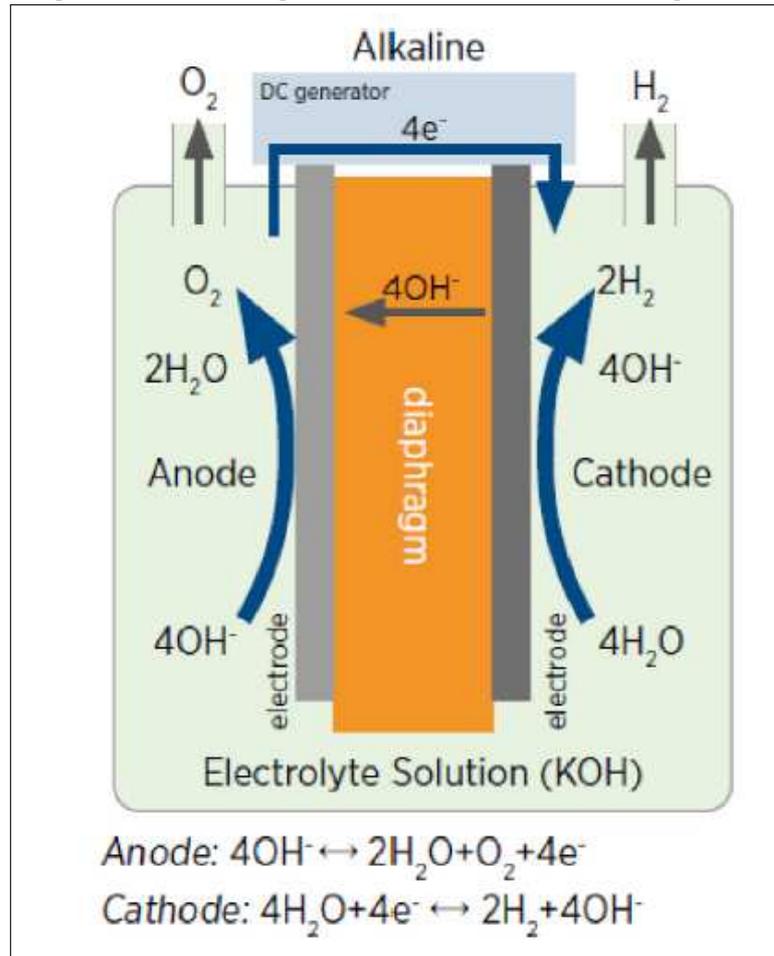
aplicação de armazenar o excesso de energia eólica ou solar como hidrogênio posteriormente, usá-lo para carregar carros e abastecer casas com o uso de células a combustível, ou como combustível em turbinas a gás. Devido à importância do consumo de energia em eletrolisadores de hidrogênio, entender os principais tipos de eletrolisadores, sua termodinâmica do processo eletroquímico é fundamental para domínio desta fonte de energia.

A maioria das tecnologias de eletrólise da água gera hidrogênio e oxigênio a partir da água em temperaturas operacionais mais baixas. Os principais tipos de eletrólise da água para geração de hidrogênio são a eletrólise alcalina, a eletrólise PEM, a eletrólise de óxido sólido (SOE) e a eletrólise com membrana de troca de ânions de polímero (AEM). (URSÚA *et al.*, 2012; IRENA, 2020). Esses tipos de eletrólises, serão abordados nas subseções seguintes.

2.3.1 Eletrólise alcalina

As eletrólises alcalinas da água são comumente usadas para produzir hidrogênio em aplicações em larga escala. Óxidos de níquel (Ni) e cobalto são utilizados para formar os materiais do ânodo e do cátodo, respectivamente. Além disso, o eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) é o mais utilizado, com 30–40% de concentração, e a alcalinidade é gerada circulando o eletrólito por meio de ambos os eletrodos (URSÚA *et al.*, 2012). A Figura 8 mostra um diagrama esquemático de uma célula de eletrólise alcalina da água. As reações de ânodo e cátodo ocorrem para produzir hidrogênio e oxigênio. O diafragma poroso separador é instalado entre os dois eletrodos, e os íons hidroxila (OH^-) são gerados e passam através dos materiais de diafragma poroso, feitos de materiais cerâmicos oxídicos como amianto e polímeros. O hidrogênio e a hidroxila são produzidos no cátodo a temperaturas operacionais moderadas de 65–100 °C; o oxigênio é então gerado no ânodo pela reação com o hidróxido. A eficiência de conversão dos eletrólitos alcalinos da água é de 60–80%, e a tensão operacional da célula é de 1,8 – 2,4 V. As vantagens dos eletrólitos alcalinos são que eles podem operar em baixas temperaturas e não necessitam de catalisadores para ativar e produzir hidrogênio. Em contraste, a corrosão do eletrodo do eletrólito alcalino é considerada o principal desafio devido à presença de uma solução alcalina. (JENSON *et al.*, 2008; EL-SHAFIE, 2023).

Figura 8 – Tecnologia de Eletrólise Alcalina da Água.



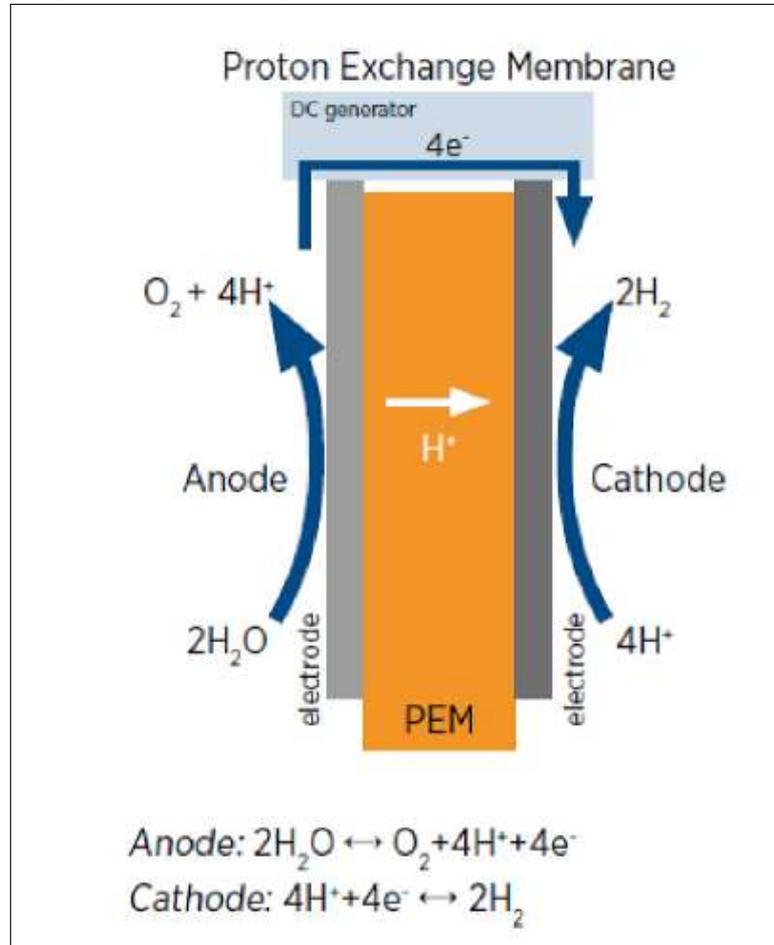
Fonte: (IRENA, 2020).

2.3.2 Eletrólise membrana de troca de prótons - PEM

As eletrólises da água PEM podem produzir hidrogênio de alta pureza em faixas de temperatura mais baixas de 70–90 °C. IrO_2 e Pt são usados como materiais de catalisador do ânodo e do cátodo, respectivamente. A membrana de Nafion é tipicamente utilizada para conduzir os íons hidrogênicos (H^+); ela é aplicada como eletrólito sólido, em oposição ao eletrólito líquido nas eletrólises alcalinas. Um diagrama esquemático da célula eletrolítica PEM e um mecanismo de reação são mostrados na Figura 9. Íons de hidrogênio migram através da membrana sólida para formar moléculas de hidrogênio. Devido à natureza ácida do eletrólito e às superfícies metálicas dos eletrodos, a cinética de reação dos eletrólitos PEM é rapidamente induzida em comparação com a de uma célula alcalina (ROSSMEISL *et al.*, 2007). Como resultado, os eletrólitos PEM são mais seguros e podem operar à pressão atmosférica no lado do ânodo, enquanto o lado do cátodo é exposto a pressões mais altas (BESSARABOV *et al.*, 2016). Um desafio significativo dos eletrólitos PEM é a dificuldade em escalá-los para aplicações em grande

escala (MW). Portanto, uma análise extensiva deve ser realizada para validar as características da unidade em grande escala e a expectativa da vida útil dos eletrolisadores PEM.

Figura 9 – Tecnologia de Eletrólise PEM.

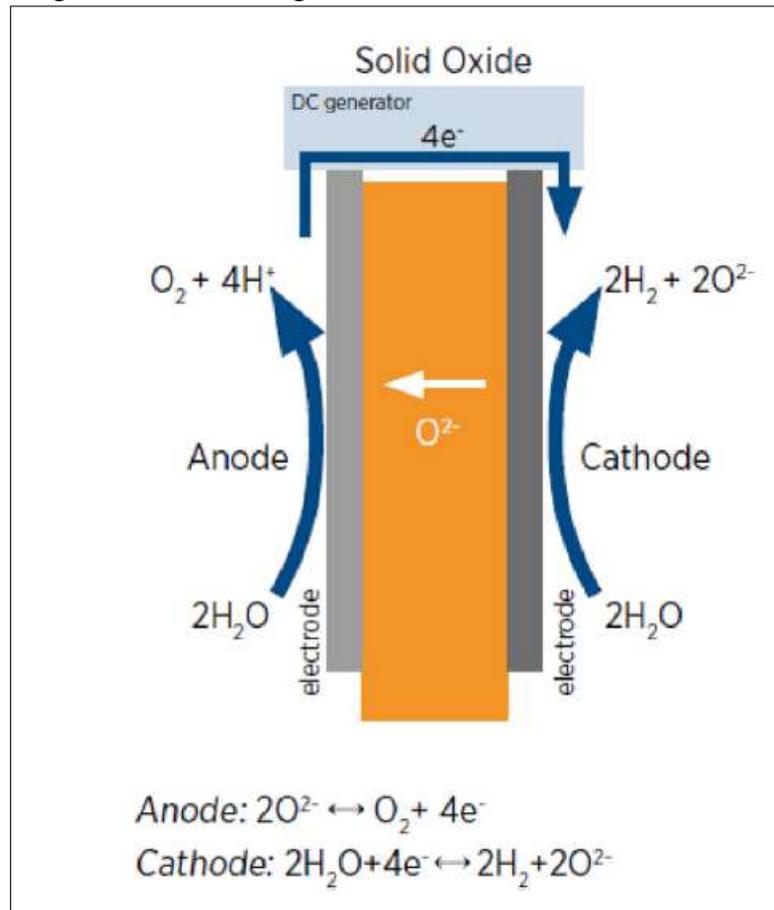


Fonte: (IRENA, 2020).

2.3.3 Eletrólise de Óxido Sólido - SOE

Nas eletrólises de óxido sólido, a célula opera em temperaturas substancialmente mais altas do que nas eletrólises alcalina e PEM, na faixa de 900–1000 °C. Os eletrodos da célula são feitos de níquel, e menos eletricidade é necessária para o processo de separação do hidrogênio, como ilustrado na Figura 10. Diferentes fontes de entrada de calor, como calor residual e energia nuclear, podem ser utilizadas para reduzir a dependência da eletricidade para o aquecimento. Além disso, a eficiência da célula aumenta com temperaturas operacionais mais altas. Infelizmente, as altas temperaturas também aumentam a taxa de degradação do eletrólito e reduzem a vida útil, além disso, as demonstrações existentes dessa tecnologia só pode operar na escala de quilowatts.

Figura 10 – Tecnologia de Eletrólise SOE.



Fonte: (IRENA, 2020).

2.3.4 Membrana de Troca de Ânions - AEM

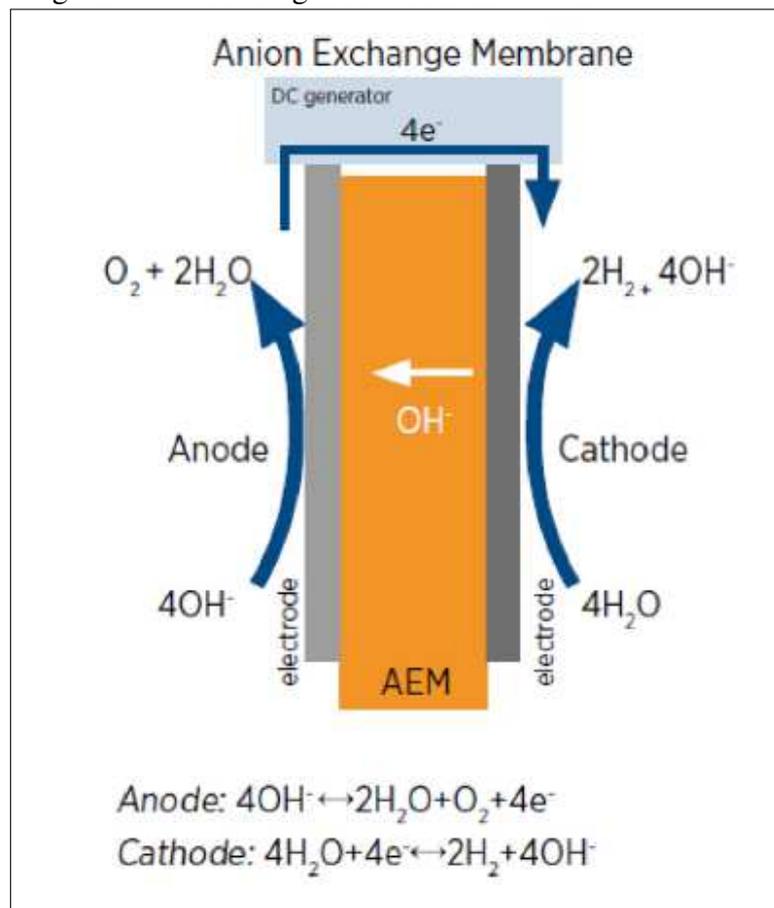
A AEM (Membrana de Troca de Ânions) é a tecnologia mais recente de eletrólise da água, impulsionada principalmente por aplicações eletroquímicas para produção de hidrogênio nos últimos anos. Os eletrólitos de AEM combinam as vantagens das eletrólises alcalina e PEM. O mecanismo de reação de uma célula de AEM é ilustrado na Figura 11. Como pode ser observado, o hidrogênio e o hidróxido são gerados no lado do cátodo.

Além disso, materiais catalisadores não nobres podem ser usados para células de AEM, resultando em custos mais baixos de produção de hidrogênio. No entanto, o desempenho da AEM ainda é baixo devido à atividade do catalisador deficiente e à menor condutividade da membrana de AEM. Portanto, a eletrólise da água com AEM requer investigações adicionais, especificamente em relação aos materiais de membrana, custo da célula e eficiência.

As condições operacionais mais importantes para os quatro tipos de eletrólise da água são resumidas na Tabela 1. É evidente que as eletrólises SOEC e AEM continuam na fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e são menos maduras em comparação com as

tecnologias alcalina e PEM. Além disso, os benefícios da AEM incluem custo total mais baixo e alta concentração de H_2 estabilidade de produção. No entanto, a tecnologia AEM requer um desenvolvimento significativo para ser utilizada na produção de H_2 em escala industrial a curto prazo (LENG *et al.*, 2012). Além disso, as diferentes tecnologias de eletrólise da água enfrentam diferentes desafios, como desempenho da célula, durabilidade, materiais de membrana, catalisadores e custo da célula.

Figura 11 – Tecnologia de Eletrólise AEM.



Fonte: (IRENA, 2020).

2.4 Pilha PEM

O Módulo PEM, foco do estudo desta pesquisa, compreende o eletrolisador de água propriamente dito, é idealizado tendo o *stack* PEM como elemento central. A produção de H_2 e O_2 ocorre através da passagem de corrente elétrica contínua (DC) através do *stack*, o que é viabilizado pelo retificador de processo, eletrônica de potência destinada à retificação da eletricidade disponível na rede de distribuição AC para DC. A produção dos gases é diretamente

proporcional ao valor da corrente elétrica que atravessa o *stack*, sendo, o controle instantâneo de produção oriundo da integração do retificador ao controlador lógico programável (CLP) de processo.

A tecnologia PEM de eletrólise da água prioriza em sua essência a qualidade da água de processo, a qual é primordial para seu funcionamento otimizado. A garantia de água desmineralizada de baixa condutividade é assegurada por meio da integração de dois subsistemas fundamentais integrados ao eletrolisador, que operam em conjunto para fornecer água de alta qualidade. A tecnologia de eletrólise da água tipo PEM (Proton Exchange Membrane) é composta por células zero-gap, onde os eletrodos são diretamente empilhados ou depositados sobre a membrana de troca de prótons, resultando no *Catalyst-Coated Membrane (CCM)*, e os gases resultantes (H_2 e O_2), que são eliminados na parte traseira das camadas mencionadas.

O núcleo da célula eletroquímica é a membrana condutora de prótons, cuja hidratação é essencial para manter a condutividade protônica, limitando assim a relação "temperatura x pressão" de operação.

As nanopartículas de platina são comumente empregadas no cátodo para a Reação de Evolução do Hidrogênio Reação de Evolução do Hidrogênio (REH), enquanto o Dióxido de Irídio IrO_2 é predominante no ânodo para a Reação de Evolução do Oxigênio Reação de Evolução do Oxigênio (REO). Essas camadas catalíticas microscópicas são porosas, permitindo a evolução dos gases, e contêm uma mistura de partículas de catalisadores, partículas de suporte e ionômeros, que agem como ligantes e promovem um contato iônico mais eficaz com a membrana.

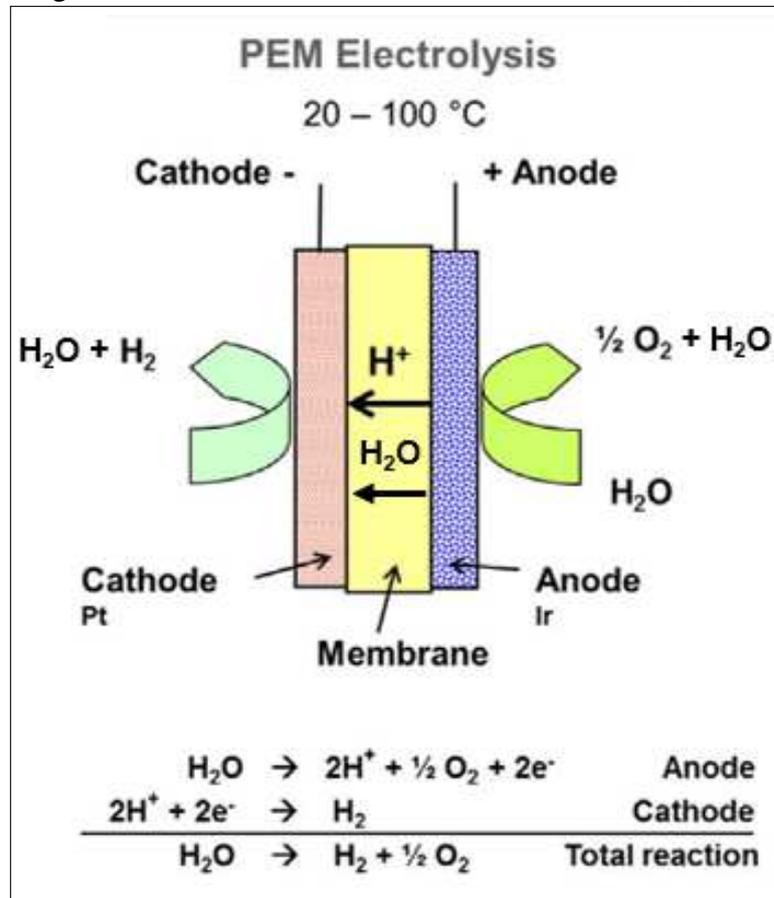
O CCM é posicionado entre as Camadas Porosas de Transporte (PTL), responsáveis pela distribuição de água e remoção de gás. Enquanto discos de titânio sinterizado são usados no ânodo, especialmente em células de operação sob pressão diferencial, o PTL carbonáceo é preferido no cátodo (região de alta pressão). No entanto, o PTL é suscetível à degradação devido a gradientes de temperatura, pontos quentes, ambiente ácido, devido à natureza da eletrólise do PEM e à degradação da membrana, também associada à liberação de Ácido Fluorídrico e a degradação mecânica causada por efeitos de ciclos de pressão.

Espaçadores de células, malhas ou grades podem ser inseridos entre as placas bipolares e os PTLs. Essas estruturas abertas permitem o fluxo de água deionizada através da célula, alimentando o processo e gerenciando o calor gerado e a remoção de gás da célula.

Durante a operação, os prótons hidratados (H_3O_+) migram do ânodo para o cátodo através da membrana, onde são reduzidos a gás hidrogênio, Figura12. Durante essa migração, e

devido às altas densidades de corrente da tecnologia PEM, os prótons "arrastam" moléculas de água do ânodo para o cátodo, apesar do gradiente de pressão positiva, em um processo conhecido como arraste osmótico iônico.

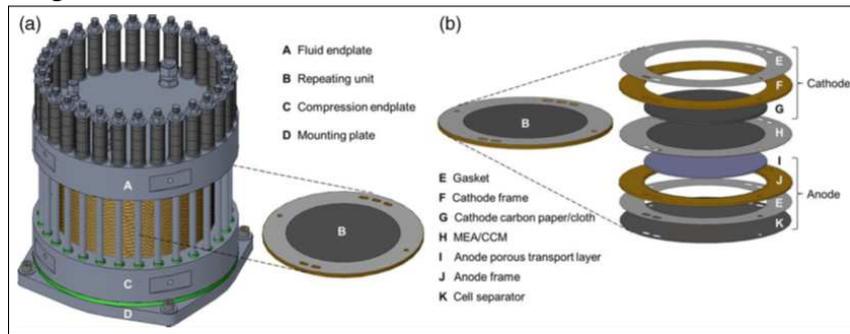
Figura 12 – Eletrólise PEM - Arraste de Protons H_2 .



Fonte: Adaptado (STOLTEN; EMONTS, 2016).

Para aumentar as taxas de produção de hidrogênio, várias células individuais são conectadas eletricamente em série (ânodo de uma célula conectado ao cátodo de outra célula) e hidraulicamente em paralelo (a água atravessa transversalmente todas as células) em um empilhamento *stack*, Figura 13. As placas bipolares separam células adjacentes e atuam simultaneamente como ânodo de um lado e cátodo para a célula adjacente. Os flanges das extremidades garantem uma montagem estanque ao longo do tempo, mesmo sob ciclos de pressão, utilizando parafusos, molas-prato e porcas roscadas.

Figura 13 – Pilha PEM.



Fonte: (STOLTEN; EMONTS, 2016).

2.5 Água de processo

O primeiro subsistema, conhecido como Módulo de Produção de Água de Processo, é encarregado do tratamento inicial da água bruta proveniente da fonte local. Este processo envolve várias etapas sequenciais para garantir a pureza da água.

Inicialmente, a água bruta passa por uma pré-filtração para remover partículas maiores, com um filtro de 10 μm . Em seguida é submetida a um leito de carvão ativado para a remoção de cloro e outras substâncias orgânicas. Posteriormente, a água é filtrada novamente com um filtro de 1 μm para uma limpeza mais profunda. Esta água pré-tratada é então pressurizada e alimenta a osmose reversa por meio de uma bomba para remoção de sais dissolvidos, impurezas e contaminantes da água.

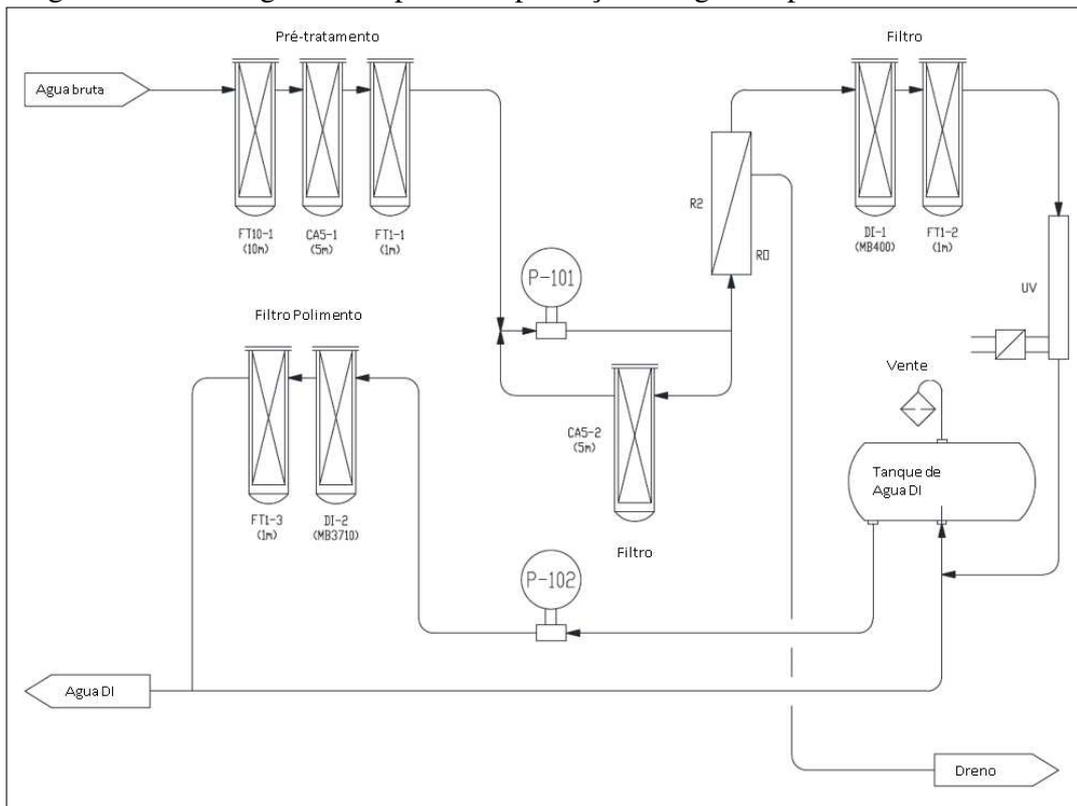
A água purificada resultante da osmose reversa é encaminhada para a deionização, onde íons remanescentes são removidos para garantir uma condutividade mínima. Em certos casos, antes da deionização, são adicionados leitos de ultrafiltração para prolongar a vida útil, removendo impurezas como ferro e sílica. Além disso, durante a produção de água de processo, a água passa por um leito Ultra Violeta (UV) para esterilização bacteriana e inibição do crescimento de biofilme.

A água tratada é armazenada no Tanque de Água de Processo, localizado na Área de Processo, onde é mantida em constante polimento através da deionização. Esse circuito fechado de polimento é crucial para manter a qualidade da água, utilizada como o insumo mais importante para o processo de eletrólise.

Para garantir a qualidade contínua da água de processo, é implementado um circuito de gerenciamento térmico e tratamento contínuo. Este circuito é responsável por manter a qualidade da água no Vaso Separador de Oxigênio (O_2 -GLS), que por sua vez abastece o Módulo PEM e os módulos eletrolíticos *stack*. A água de processo é submetida a um Trocador de Calor

(TC) para resfriamento e, em seguida, passa por seis leitos de deionização em paralelo para garantir uma condutividade estável inferior a $0,13 \mu\text{S}/\text{cm}$. Estas etapas de processo garantem a qualidade da água necessária para o funcionamento eficiente do sistema de eletrólise da água tipo *Proton Exchange Membrane (PEM)*, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma simplificado produção de água de processo.



Fonte: O Autor.

2.6 Secagem e purificação do H_2

Devido às suas características intrínsecas, destacando-se a composição do eletrólito e o funcionamento sob pressão diferencial, a tecnologia de eletrólise da água do tipo PEM demonstra a capacidade de gerar hidrogênio bruto com uma pureza excepcionalmente alta, superior a 99,9% (em volume), diretamente a partir do stack. Para atender às exigências de aplicações que demandam purezas ainda mais elevadas, é incorporado ao Módulo PEM um componente adicional dedicado à purificação catalítica da corrente de hidrogênio, seguido por um processo de secagem por adsorção.

É importante considerar que a corrente de hidrogênio resultante de um *stack* PEM pode conter como substâncias contaminantes, o oxigênio e água residual. Esta fase do processo

de purificação é realizada de forma catalítica, para converter o oxigênio contaminante em água, fazendo uso de uma fração do próprio hidrogênio produzido. Esse processo é conduzido através da reação inversa, que ocorre em um reator de catálise heterogênea conhecido como Reator Deoxo. Além da presença dos catalisadores adequados, o pré-aquecimento da corrente que entra no reator (originária do Módulo PEM) a uma temperatura de aproximadamente 80°C é essencial para garantir que a reação ocorra espontaneamente. Vale ressaltar que esta reação é exotérmica por natureza.

Após a etapa de purificação catalítica, que converte os contaminantes em água, a única substância residual na corrente de hidrogênio é, portanto, água. Para alcançar níveis de pureza igual ou superior a 99,999% (em volume), é necessário remover essa água residual. Isso é realizado por um secador por adsorção composto por duas colunas de secagem, garantindo um fornecimento contínuo de hidrogênio para a aplicação desejada. Durante o processo de purificação, a operação é monitorada por um analisador de oxigênio e um medidor de ponto de orvalho na saída do sistema, garantindo a qualidade do produto final.

2.7 Armazenamento de H_2

Em geral, o armazenamento de H_2 pode ser necessário para equilibrar a produção e a demanda. Os sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio criam numerosos benefícios potenciais em termos de descarbonização. Ao armazenar energia renovável na forma de hidrogênio, é possível reduzir o consumo de outros combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de gases tóxicos para a atmosfera e para a saúde da população. O armazenamento de H_2 ajuda a enfrentar o desafio do armazenamento de energia, permitindo a utilização posterior da energia quando necessário. Sua versatilidade o torna uma opção atraente para diversos setores, desde o transporte até processos industriais. O difícil desafio de flexibilidade do setor elétrico com alta penetração de geração renovável variável pode ser enfrentado com a geração de eletricidade a partir do hidrogênio. Então, no futuro, a capacidade de armazenar energia utilizando hidrogênio será vital para garantir a estabilidade do fornecimento de eletricidade, e contribuir para a redução dos custos energéticos e para uma utilização mais eficiente das energias renováveis. Além disso, o hidrogênio armazenado pode ser utilizado em sistemas de gasodutos de gás natural, contribuindo assim para um menor consumo de combustíveis fósseis convencionais.

A forma mais comum de armazenamento do hidrogênio é como um gás comprimido. Neste estudo de caso, o gás hidrogênio, produzido é direcionado para um sistema de tratamento

para garantir sua pureza e, em seguida, passa pelo processo de secagem e purificação. O hidrogênio purificado é então armazenado em estado gasoso em um tanque de armazenamento (Figura 15) com capacidade padrão de aproximadamente 200 Nm^3 a 40 bar de pressão e 35°C de temperatura, de gás. Esse armazenamento é fundamental para garantir a disponibilidade contínua de hidrogênio, mesmo quando a produção excede a demanda imediata, permitindo assim um fornecimento estável para as aplicações subseqüentes, como a geração de energia ou processos industriais.

Figura 15 – Tanque de armazenamento de H_2V .



Fonte: O Autor.

2.8 Considerações finais

Nesta secção foram introduzidos as teorias de produção de hidrogênio verde utilizando processo de eletrólise da água a partir do uso de fontes de energia renovável. Como elemento central a tecnologia tipo PEM que é foco do estudo deste trabalho, onde será explorado seu processo de produção avaliando suas eficiências.

3 METODOLOGIA

Considerando o escopo principal deste estudo que se concentra na análise do desempenho da eficiência de conversão ao longo das etapas de produção de hidrogênio verde (H_2V), a metodologia de análise pode ser subdividida em três fases distintas. Primeiramente, é essencial coletar dados referentes à produção da planta, incluindo a geração de energia, o consumo de energia do sistema auxiliar (*BoP*), o consumo de energia nos equipamentos de eletrólise *stack* e a produção total de H_2 . Na segunda etapa, é crucial realizar uma avaliação comparativa entre os dados obtidos experimentalmente e os valores teóricos calculados para cada processo envolvido. Por fim, na terceira etapa, é avaliada a viabilidade do rendimento dessa conversão, levando em consideração a possibilidade de reverter este vetor de energia H_2V em energia elétrica.

O sistema teórico modelo adotado como referência de estudo e comparação utilizado como foi (CORATO; DOZEIN, 2020) para o sistema do eletrolisador.

3.1 Especificação da planta solar fotovoltaica

A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica, entre outras, é o primeiro passo para permitir que haja produção de hidrogênio verde. É importante considerar um bom dimensionamento, a disponibilidade e confiabilidade dessas fontes de energia, para garantir uma produção sustentável de hidrogênio verde.

Neste trabalho foi definida como objeto de estudo uma Usina Fotovoltaica (UFV) para produção de hidrogênio, com capacidade instalada de 3 MWp, situada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Figura 16.

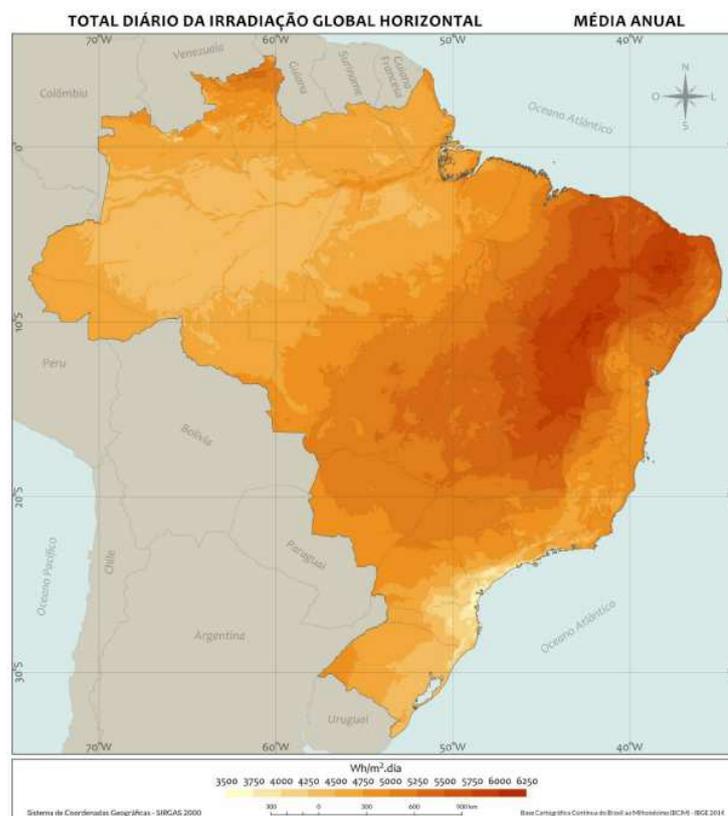
Figura 16 – Vista aérea da usina fotovoltaica no Ceará.



Fonte: O Autor.

Considerada uma das fontes mais importantes no processo de transição energética, a fonte solar, se adapta muito bem à georreferência da instalação, onde a capacidade média diária de irradiação solar é de $5,919 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, Atlas (2024), conforme observado na Figura 17.

Figura 17 – Total Diário da Irradiação Global Horizontal.



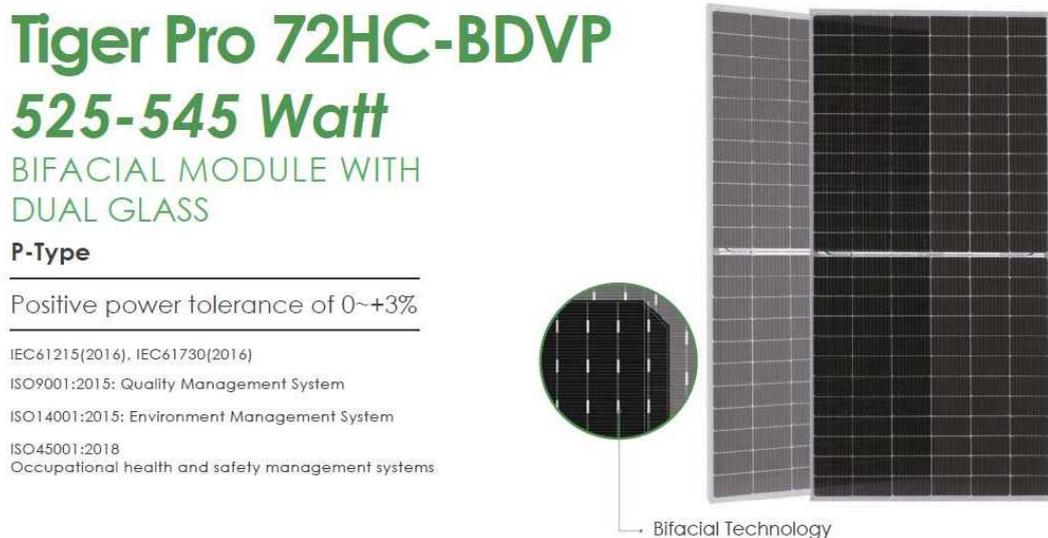
Fonte: (ATLAS, 2024).

Com base na potência do sistema de eletrólise a ser instalado, e a necessidade de utilização de compensação dos créditos de geração de energia desta planta, a UFV de 3 MW_p, foi projetada com as seguintes especificações:

3.1.1 Módulos Fotovoltaicos

A UFV é composta por 5.568 módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) fabricante Jinko, modelo Tiger Pro JKM535M-72HL4-BDVP, tecnologia bifacial, com potência de 535 Wp cada, totalizando 3 MWp de potência instalada, ilustrado na Figura 18. Os módulos instalados no terreno, são divididos em 192 fileiras (strings) de 29 módulos, em que cada fileira tem a potência de 15,51 kWp. Cada módulo, por sua vez, possui 144 células em série, totalizando uma tensão de circuito aberto (Voc) de 49,54 V e corrente de curto-circuito (Isc) de 13,83 A, conforme dados do fabricante (Anexo B).

Figura 18 – Módulo Fotovoltaico.



Fonte: *Datasheet* Jinko Solar.

3.1.2 Inversor de Frequência

São utilizados 10 inversores Sungrow, modelo: SG250HX, (Anexo D) de 250 kW/800 V, conforme observado na Figura 19, totalizando 2.500 kW de potência CA. As fileiras (strings) são conectadas diretamente nos inversores via terminal tipo MC4 para uma tensão de até 1.500 Vcc. Dos 10 inversores, 6 têm 20 fileiras (strings) conectadas (total de 310,2 kWp) e 4 possuem 18 fileiras (strings) conectadas (total de 279,18kWp).

Figura 19 – Inversor Sungrow 250 kW.



Fonte: *Datasheet* SUNGROW.

3.1.3 Transformadores Elevadores

A UFV é composta por dois transformadores de potência, a seco, com potência de 1400 kVA, tensão 0,8/6,6 kV, fabricante CONTRAFO (Figura 20), é responsável pela transferência de energia da usina solar ao barramento comum de 6,6 kV passando pela medição de entrada do Alimentador.

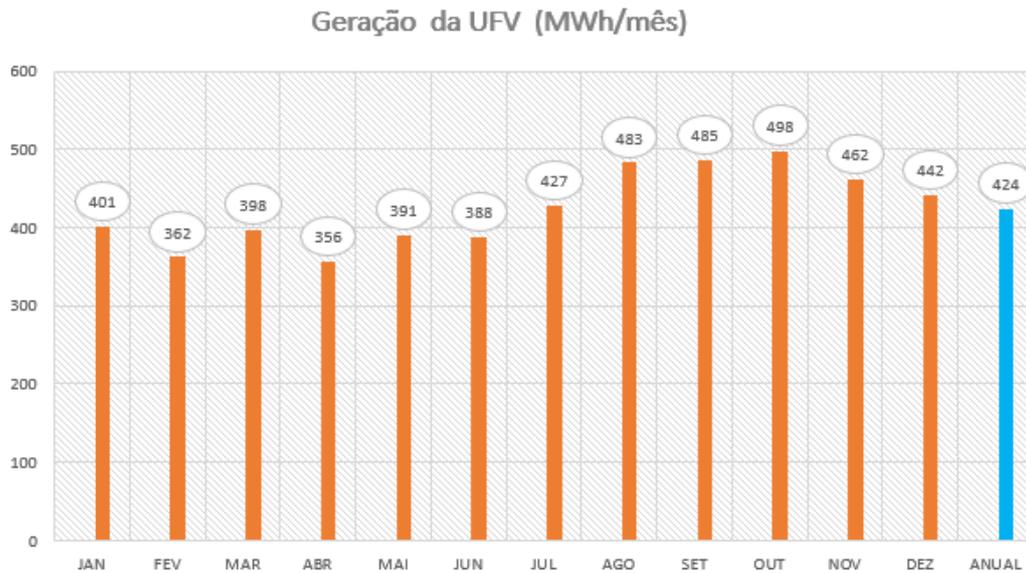
Figura 20 – Transformador elevador 0,8/6,6 kV.



Fonte: O Autor.

Ademais, também compõem os itens da usina solar: *trackers*, estação meteorológica, e circuito fechado de televisão (CFTV). Que juntos garantem uma geração média mensal de 424 *MWh*, pode ser observado na Figura 21, para atender ao balanço de consumo de energia do sistema de eletrólise.

Figura 21 – Gráfico geração mensal de energia elétrica da UFV.



Fonte: O Autor.

3.1.4 Retificador CA/CC

Para ocorrer o aproveitamento da energia elétrica gerada por fontes renováveis, neste caso a (UFV), é essencial converter a tensão alternada produzida em corrente contínua. Essa conversão é fundamental para tornar a energia compatível com o processo de eletrólise, utilizado na produção de hidrogênio a partir da água. Para realizar essa etapa, são empregados retificadores controlados de 12 pulsos, com configuração como ilustrada na Figura 22, que usa chaves eletrônicas tipo transistor, dispositivos eletrônicos com controle para ajustar a tensão conforme exigido durante o processo de eletrólise. A eficiência dessa retificação é de suma importância, não apenas para otimizar o desempenho do sistema, mas também para minimizar perdas energéticas e garantir uma produção estável e consistente de hidrogênio verde.

Neste processo, está presente a eletrônica de potência necessária para a conversão da energia elétrica disponível na rede local (6,6 kV – 3F+T, 60 Hz) para o padrão demandado pelo processo de eletrólise da água em Corrente Contínua (CC). Neste caso, o retificador regula a saída em modo de corrente constante operam em modo “Corrente Constante”, ou seja, o valor de

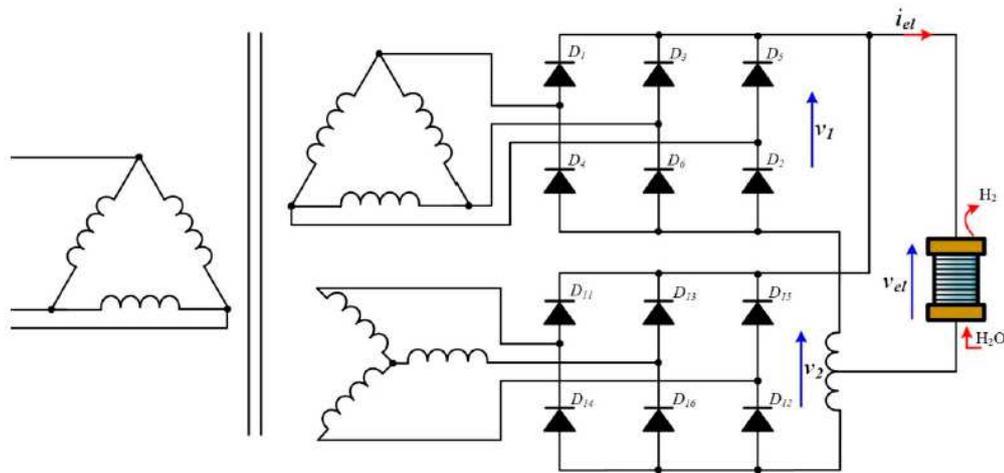
corrente elétrica CC é determinado pelo controle aplicado na produção de H_2 e o valor de tensão de saída ajusta-se para cumprir o ajuste de corrente determinado.

Para esta aplicação em estudo, são utilizados dois retificadores (REC HP 200-40 e REC HP 50-40), que operam individualmente (mas de forma automática) no contêiner de Retificação e Controle de Potência. O REC HP 200-40 destina-se ao fornecimento de corrente elétrica CC (até 3.750 A) ao *stack* com capacidade de produção de até $200 \text{ Nm}^3 H_2/h$, enquanto o REC HP 50-40 se destina ao fornecimento de corrente elétrica CC (até 900 A) à associação de *stack* com capacidade de produção de até $50 \text{ Nm}^3 H_2/h$.

Compõem este retificador:

- Transformadores trifásicos de 1500 kVA e 500 kVA duplo secundário (6,6/0,26-0,26 kV);
- Painéis elétricos com conversor trifásico CA/CC (CTW-900-PMW da WEG);
- Filtros de harmônicos e DC Choke, para atenuação de *ripple* de saída;
- Painéis elétricos de correção de Fator de Potência;

Figura 22 – Retificador de 12 pulsos.



Fonte: (YODWONG *et al.*, 2020).

Na Figura 23 é apresentada o conversor trifásico CA/CC (CTW-900-PMW da WEG) existente nos painéis elétricos do retificador.

Figura 23 – Conversor CA/CC.

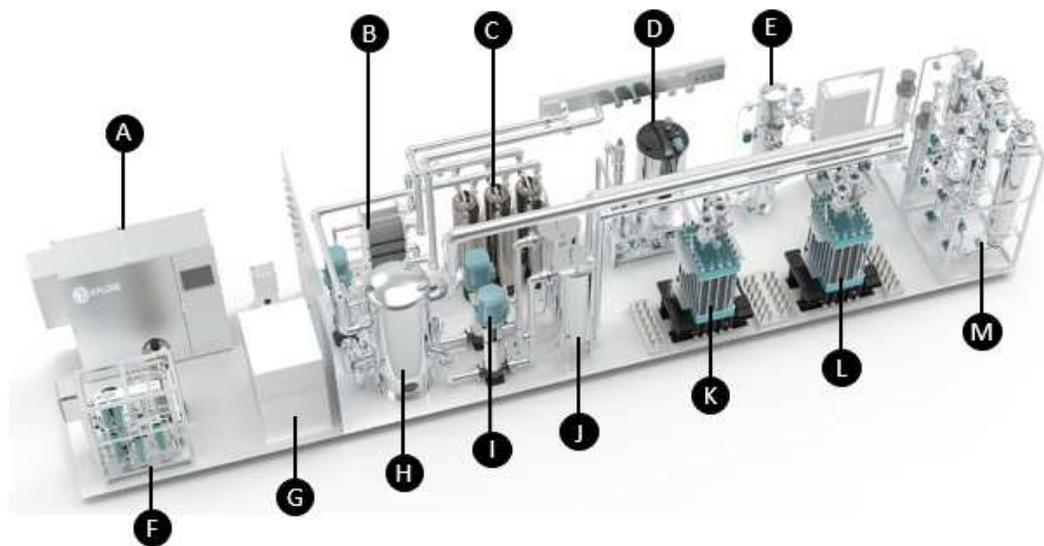


Fonte: O Autor.

3.2 Especificação da planta de produção de H_2

A planta, objeto de análise desta pesquisa, é composta por um Contentor da eletrólise formado por diferentes componentes, indicados na Figura 24 e descritos na sequência.

Figura 24 – Contentor eletrolisador PEM.

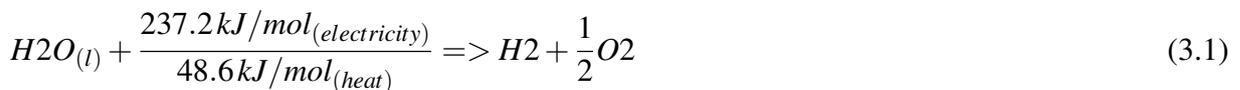


A – Painel de controle	F – Módulo de Produção de Água	K – Stack PEM (A)
B – Trocador de Calor	G – Chiller	L – Stack PEM (B)
C – Filtros Polidores	H – Separador de O ₂	M – Módulo de Purificação de H ₂
D – Reservatório de Água DI	I – Bombas de água de processo	
E – Separador de H ₂	J – Filtro de água de processo	

Fonte: Adaptado Neahytron HYPeM Electrolyzer (2024).

- Módulo PEM (Figura 24 - Componentes K e L): subsistema responsável pela dissociação da água em seus constituintes, dando origem às correntes de H_2 e O_2 geradas separadamente;
- Módulo de Produção de Água de Processo (Figura 24 - Componentes F e D): responsável por adequar a qualidade da água disponível localmente (água bruta) aos padrões demandados pelo processo;
- Módulo de Purificação e Secagem de H_2 (Figura 24 - Componentes E e M): subsistema de purificação catalítica do hidrogênio gerado pelo Módulo PEM, com sua posterior secagem por adsorção;
- Módulo de Análise de Gases (Figura 24 - Componentes M): integra os dispositivos voltados à determinação da pureza das correntes gasosas produzidas pelo Módulo PEM (H_2 e O_2);
- Painel de Controle e Supervisão (Figura 24 - Componentes A): integra o CLP de processo, acionamentos dos controles digitais e proporcionais, IHM, porta de supervisão do sistema, dentre outros equipamentos e componentes elétricos;
- Utilidades: conjunto de equipamentos voltados ao suporte da operação;

O componente central e principal deste processo de produção de hidrogênio é o módulo PEM, onde ocorre a divisão da água em H_2 e O_2 , através da aplicação de uma corrente elétrica entre dois eletrodos. Esses eletrodos são unidos por um eletrólito aquoso altamente condutivo em termos iônicos. Dentro desse eletrólito, ocorre a formação de uma molécula de hidrogênio no cátodo pela decomposição de uma molécula de água, conforme expresso pela seguinte equação:



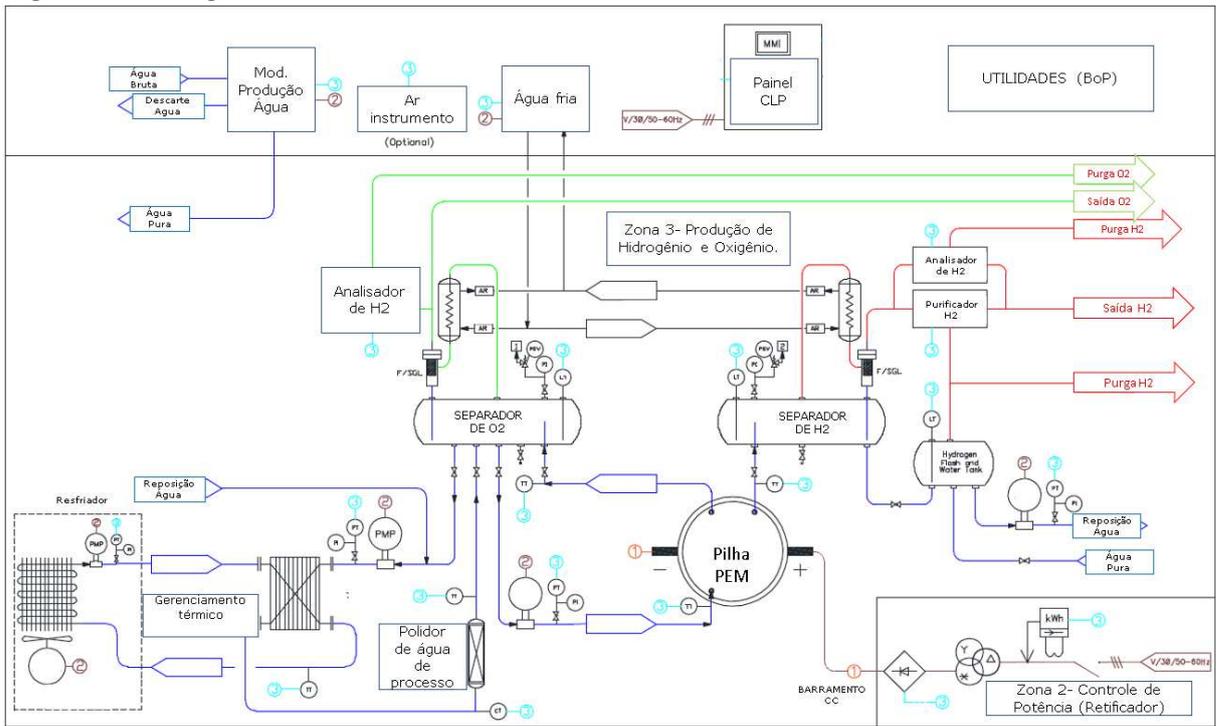
Deve-se destacar que a reação (3.1) requer o fornecimento de energia para sua ocorrência (caráter endotérmico), a qual é fornecida como eletricidade.

Ambas as correntes de gases (H_2 e O_2) são produzidas na presença de água, a qual também é responsável pela remoção de calor residual de processo, originado no stack PEM. Estas correntes bifásicas (gás-líquido) seguem para vasos separadores, responsáveis pela recuperação de água de processo. Destes vasos evoluem as correntes gasosas, as quais são resfriadas em trocadores de calor operados contra água gelada, seguindo para as próximas etapas de processo.

O nível de água em tais vasos separadores é constantemente monitorado e, com base nos limites operacionais impostos pelo CLP de processo, água é repostada ao vaso separador de

oxigênio, equipamento responsável por conter o maior inventário de água no sistema e interfacear não somente o processo de produção dos gases como também o circuito de gerenciamento térmico e tratamento contínuo da água de processo. O detalhamento visual do aqui descrito está presente no diagrama apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Diagrama do Eletrolisador PEM.

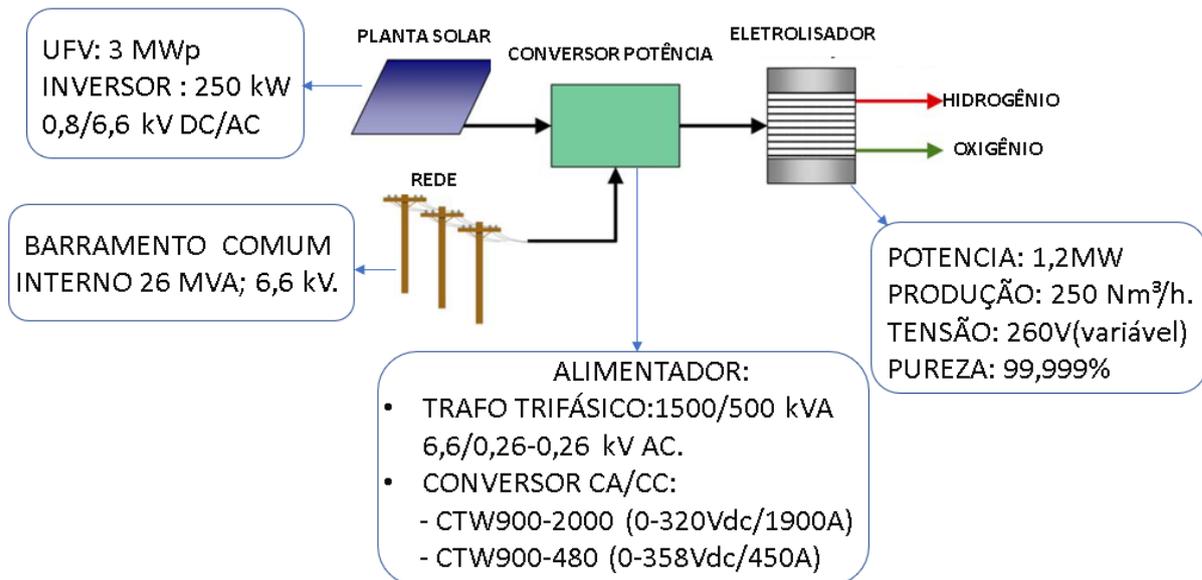


Fonte: O Autor.

3.3 Diagrama de potência elétrica da planta de produção de H_2

O sistema elétrico para alimentação da planta de produção de hidrogênio em estudo, com capacidade de 1,2 MW, é constituído por sistemas separados que integram fisicamente a alimentação do eletrolisador. A UFV, com potência instalada de 3 MWp, alimenta o sistema de conversão, que por sua vez também é alimentado a partir de um barramento interno comum conectado ao SIN (Sistema Elétrico Nacional), para fornecerem potência elétrica ao sistema de eletrólise PEM. A partir de um balanço de medição de energia gerada pela UFV e o consumo elétrico do eletrolisador, se obtém a produção do hidrogênio verde, conforme descrito na Figura 26.

Figura 26 – Diagrama de potência elétrica da planta de produção de H_2 de 1,2 MW.



Fonte: O Autor.

3.4 Análise da eficiência do processo de produção de H_2

3.4.1 Eficiência de conversão da UFV

A eficiência de uma usina solar fotovoltaica é uma métrica crucial para avaliar sua capacidade de transformar a energia solar incidente em energia elétrica útil. Ela representa a proporção da potência elétrica efetivamente gerada pela usina em relação à potência da luz solar incidente sobre as células fotovoltaicas. Esta medida desempenha um papel fundamental na determinação do desempenho global e na viabilidade econômica de sistemas solares de grande

escala.

A equação para calcular a eficiência real, definida por (3.2) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$\eta_{ufv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.2)$$

$$P_{in} = G(W/m^2) \times A_c(m^2) \times N_{mód} \quad (3.3)$$

A equação para calcular eficiência teórica total, em que a eficiência por módulo, depende do coeficiente de temperatura do módulo fotovoltaico, e da eficiência do módulo nas (CPT, no inglês STC de Standard Test Conditions), da temperatura equivalente T_{stc} a 25 °C, é definida por (3.4) adaptada de (SANTOS *et al.*, 2021).

$$\eta = \eta_{stc}[1 - \beta(T_m - T_{stc})] \quad (3.4)$$

O modelo térmico escolhido para o cálculo estimado da temperatura do módulo (T_m), neste trabalho, foi o método de Faiman ((FAIMAN, 2008), conforme descrito pela equação (3.5).

$$T_m = T_a + \frac{G}{U_0 + U_1 W_s} \quad (3.5)$$

onde:

η é a eficiência da UFV

T_m é a temperatura do módulo (°C);

T_a é a temperatura do ar ambiente (°C);

G é a irradiância incidente no plano do módulo ou matriz (W/m^2);

U_0 é o componente constante de transferência de calor (W/m^2K);

U_1 é o componente de transferência de calor convectivo (W/m^3sK);

W_s é a velocidade do vento (m/s)

β é coeficiente de temperatura do módulo ($\% / ^\circ C$)

η_{stc} é a eficiência do módulo nas condições de teste padrão;

Tabela 4 – Considerações para uso nos cálculos de eficiência da UFV - Dados técnicos e constantes.

Descrição	Valor
Coefficiente de temperatura do módulo β (% /°C)	-0,35
Temperatura padrao de teste T_{stc} (°C)	25
Coefficiente de transferência de calor super. U_0 (W/m²)	25
Coefficiente de transferência de calor convectivo U_1(W/m³sK)	6,84
Nº Módulos da UFV ($N_{mód}$)	5568
Área do Módulo (m^2)	2,57
Eficiência Padrão da Célula (n)	0,2593

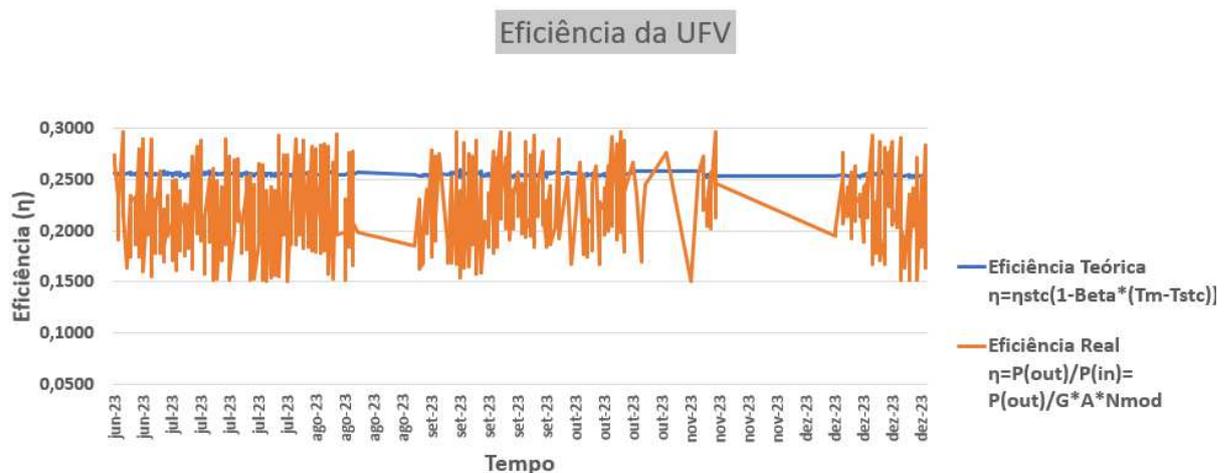
Fonte: O Autor

A_c é a área da célula (m²);

$N_{mód}$ é o número de módulos instalados;

No Anexo A são apresentados a amostragem dos dados obtidos no período de 17 de junho 2023 à 30 de dezembro de 2023, considerando um total de 756 observações com intervalo horário, após o desprezo de dados em períodos com baixa radiação e falhas técnicas da usina, conforme gráfico da Figura 27. Pode observar que o valor médio destas eficiências, teórica e real da (UFV) ficaram em 25,45% e 22,06% respectivamente. Vale ressaltar que o *data sheet* dos painéis solares apresentam, conforme Anexo B, uma tolerância na variação da potência individual dos módulos (*Positive Power Tolerance*) de 3 Wp, desta forma esta etapa de eficiência da conversão da planta solar em estudo, avalia a eficácia de conversão durante o processo de radiação para potência elétrica, também é importante frisar que, conforme *datasheet* do inversor Anexo D, cuja eficiência é de 99%, foi desprezada nos cálculos da eficiência teórica.

Figura 27 – Gráfico eficiência real da UFV.

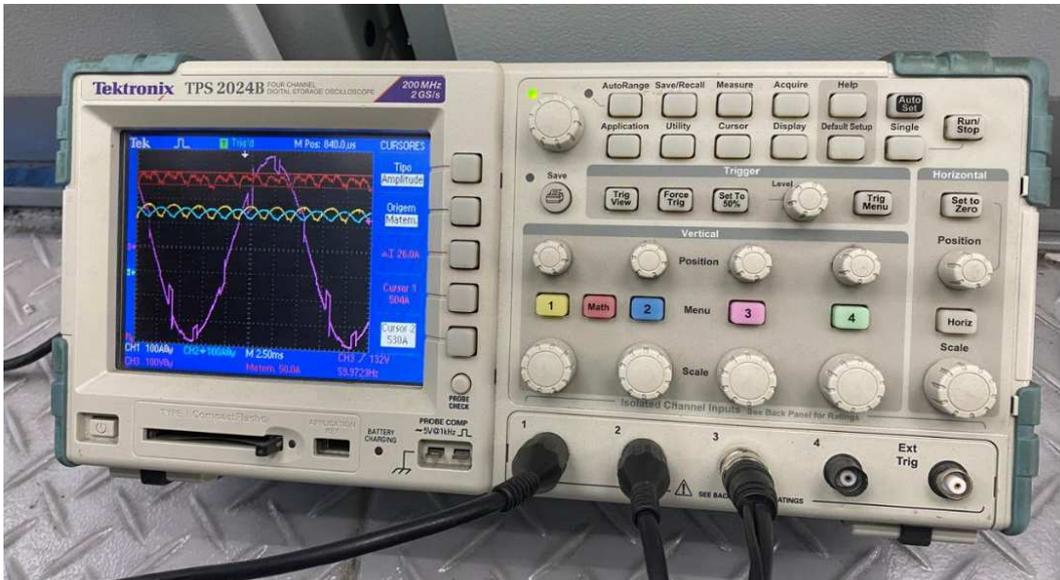


Fonte: O Autor.

3.4.2 Eficiência do sistema retificador

O retificador utilizando conversor de 12 pulsos, mostra uma melhoria acentuada na qualidade na corrente de saída CC, redução de harmônicos e um baixo *ripple* da tensão de saída CC, conforme podemos observar na onda em vermelho do osciloscópio na Figura 28. Como uma das pontes é alimentada por um transformador conectado em Y-Y e a outra através de um transformador Y- Δ , cujo objetivo da conexão do transformador Y- Δ é introduzir uma mudança de fase de 30° entre a fonte e a entrada da ponte, as duas saídas das pontes são semelhantes, porém defasadas por 30° .

Figura 28 – Amostragem da tensão de saída do retificador.



Fonte: O Autor.

Nas equações mostrado em 3.8 a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do retificador, na qual determina eficiência destes conversores.

$$P_{ac} = \sqrt{3} \cdot V_{line} \cdot I_{line} \cdot \cos \theta \quad (3.6)$$

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (3.7)$$

$$\eta_{retificador} = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \quad (3.8)$$

A amostragem dos dados (Anexo C) ocorreram no período de 21 de junho 2023 e 26 de dezembro de 2023, considerando um total de 15.950 observações utilizados nos cálculos de eficiência do sistema, conforme Figura 29, onde se obteve o valor médio de eficiência de 95,60%.

Figura 29 – Gráfico eficiência do retificador.



Fonte: O Autor.

O cálculo desta eficiência foi originário da equação 3.8, com a aquisição dos dados a partir de multimetro de energia e potência instalados na entrada do retificador (lado CA) e na saída do retificador (lado CC), conforme Figura 30.

Figura 30 – Multimetro de energia.



Fonte: O Autor.

3.4.3 Eficiência do sistema eletrolisador

Nesse trabalho foi adaptada a definição dada por (AHMAD; SHENAWY, 2006), conforme mostrada na equação teórica da eficiência (3.9):

$$\eta_{\text{eletrolisador}} = \left(\frac{Q_m \cdot PC}{V \cdot I} \right) \times 1000 \quad (3.9)$$

$\eta_{\text{eletrolisador}}$ é a eficiência do eletrolisador.

Q_m é o fluxo mássico de hidrogênio produzido (em kg/s).

PC é o poder calorífico do hidrogênio (em J/kg ou kJ/kg).

V é o potencial aplicado (em volts).

I é a corrente elétrica (em Ampère).

Nesta fase do estudo, uma grande parte do tempo devotado na pesquisa e análise dos dados, para extrair mais percepções e calcular a eficiência do eletrolisador. Foram criadas novas variáveis em planilhas utilizando a amostragem coletada através do sistema de controle e aquisição de dados, com as leituras reais de grandezas de potência elétrica, corrente elétrica, tensão, produção real de hidrogênio, considerados nos cálculos deste estudo.

Para calcular a eficiência do eletrolisador, aplica-se a equação 3.9, que relaciona a produção de gás com a corrente elétrica. O eletrolisador é composto pelos *Stacks* A e BC, Figura 24 (Componentes - K e L) onde o *Stack* A recebe uma corrente de 3750 A, resultando em uma produção máxima de $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$, e o *Stack* BC recebe uma corrente de 900 A, resultando em uma produção máxima de $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A capacidade projetada do eletrolisador é de $250 \text{ Nm}^3/\text{h}$, somando as produções de ambos os *Stacks*.

Para determinar a eficiência energética do eletrolisador, é essencial entender a entrada e saída de energia nos *Stack*. Para padronizar essa análise, utilizar a unidade de medida kWh/kg , conforme especificado na equação (3.10), que permite equalizar as energias envolvidas.

A eficiência (η) do eletrolisador é calculada como a razão entre a saída de energia em forma de H_2 , medida em kWh/kg , e a entrada de energia elétrica, também medida em kWh/kg , conforme descrito em (3.10).

$$\eta_{\text{eletrolisador}} = \frac{\text{Saída de Energia H}_2 \text{ [kWh/kg]}}{\text{Entrada de Energia Elétrica [kWh/kg]}} \quad (3.10)$$

Para determinar a saída de energia em forma de H_2 do *Stack*, optou-se pelo uso do *Higher Heating Value (HHV)* ou Poder Calorífico Superior (PCS), devido à integralidade do

calor rejeitado, conforme mencionado (PULKRABEK, 2017; SASAKI, 2016; NUNES *et al.*, 2020; HEYWOOD, 1988).

Para a entrada de energia elétrica no *Stack*, foi adotado o Consumo Específico de Energia (C.E), uma escolha recomendada em outra referência citada por (AHMAD; SHENAWY, 2006; ZHANG *et al.*, 2012).

Dessa forma, a partir da equação (3.10), tem-se:

$$\eta_{\text{eletrolizador}} = \frac{HHV}{C.E} \quad (3.11)$$

$$\eta_{\text{eletrolizador}} = \frac{HHV}{\left(\frac{V \times I_{DC}}{\dot{m}}\right)} \quad (3.12)$$

$$\eta_{\text{eletrolizador}} = \frac{HHV \times \dot{m}}{V \times I_{DC}} \quad (3.13)$$

A vazão mássica (\dot{m}) é determinada em função da corrente DC oriunda do retificador que alimenta o Stack A, a qual varia de forma fixa conforme a Capacidade de Produção (CP) de hidrogênio, expressa em *kg/h*.

$$\dot{m}_{H_2} = \left[\left(\frac{I_{DC}}{I_{\max}} \right) \times CP \right]_{\text{Stack-A}} \quad (3.14)$$

Conforme o projeto em estudo, o módulo *Stack A* recebe duas entradas de corrente; uma proveniente do retificador *Master*(1A) e outra do retificador *Slave*(2A), dessa forma a nova equação (3.14), é composta por duas componentes de correntes DC, onde:

$$I_{DC} = I_{1A} + I_{2A} \quad (3.15)$$

mostrado em (3.16)

$$\dot{m}_{H_2} = \left[\left(\frac{I_{1A} + I_{2A}}{I_{\max A}} \right) \times CP \right]_{\text{Stack-A}} \quad (3.16)$$

Assim sendo, será substituído na equação (3.13), o valor da vazão mássica da equação (3.16), resultando na equação geral (3.17) para cálculo da eficiência energética do eletrolisador

tipo PEM citado nesta pesquisa, que contém em sua configuração de pesquisa o elemento *Stack A* para produção de hidrogênio.

$$\eta_{\text{eletrolizador}} = \left[\frac{HHV \times \left[\left(\frac{I_{1A} + I_{2A}}{I_{\text{maxA}}} \right) \times CP_A \right]}{(V_{1A} \times I_{1A}) + (V_{2A} \times I_{2A})} \right]_{\text{Stack-A}} \quad (3.17)$$

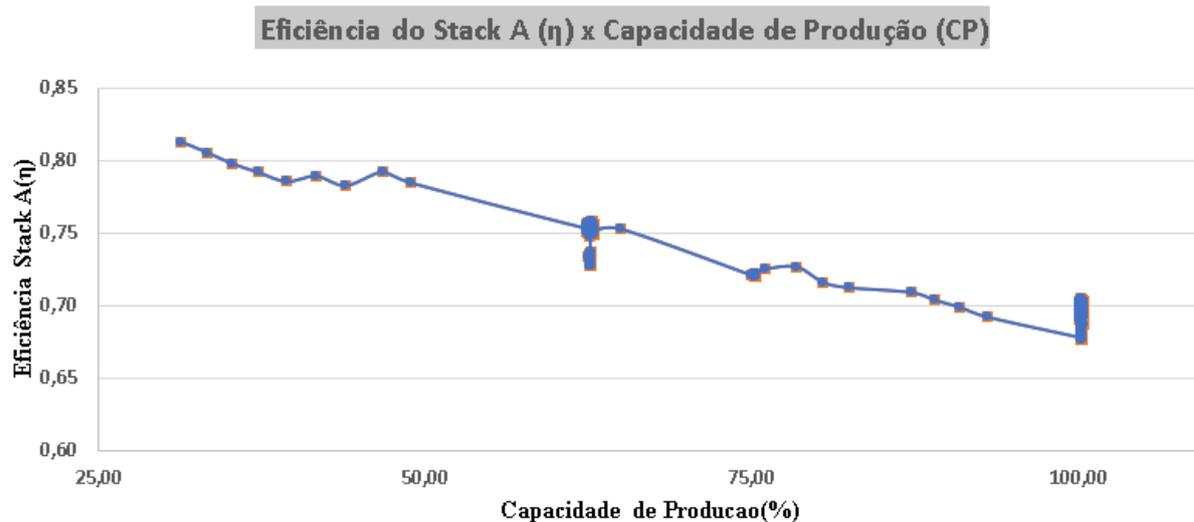
A equação (3.17) foi utilizada para determinar de forma instantânea, a partir das amostragens (Anexo C) do processo em estudo, a eficiência do sistema de eletrólise. A Tabela 5, contém constantes e variáveis, utilizados para determinar o valor instantâneos de eficiência a partir da (3.17) conforme Figura 31.

Tabela 5 – Variáveis e constantes da equação de eficiência.

Denominação	Valor	Tipo
HHV (kWh/kg)	39.42	Constante
Corrente 1A (A)	0 a 1875	Variável
Corrente 2A (A)	0 a 1875	Variável
Corrente Máxima-A (A)	3750	Constante
CP-Capac. Produção (Kg/h)	17.97	Constante
Tensão 1A (V)	0 à 260	Variável
Tensão 2A (V)	0 à 260	Variável

Fonte: O Autor

Figura 31 – Gráfico eficiência da Pilha A.



Fonte: O Autor

Os dados nominais da Pilha PEM estão descritos na Tabela 6:

Tabela 6 – Dados nominais do Eletrolisador

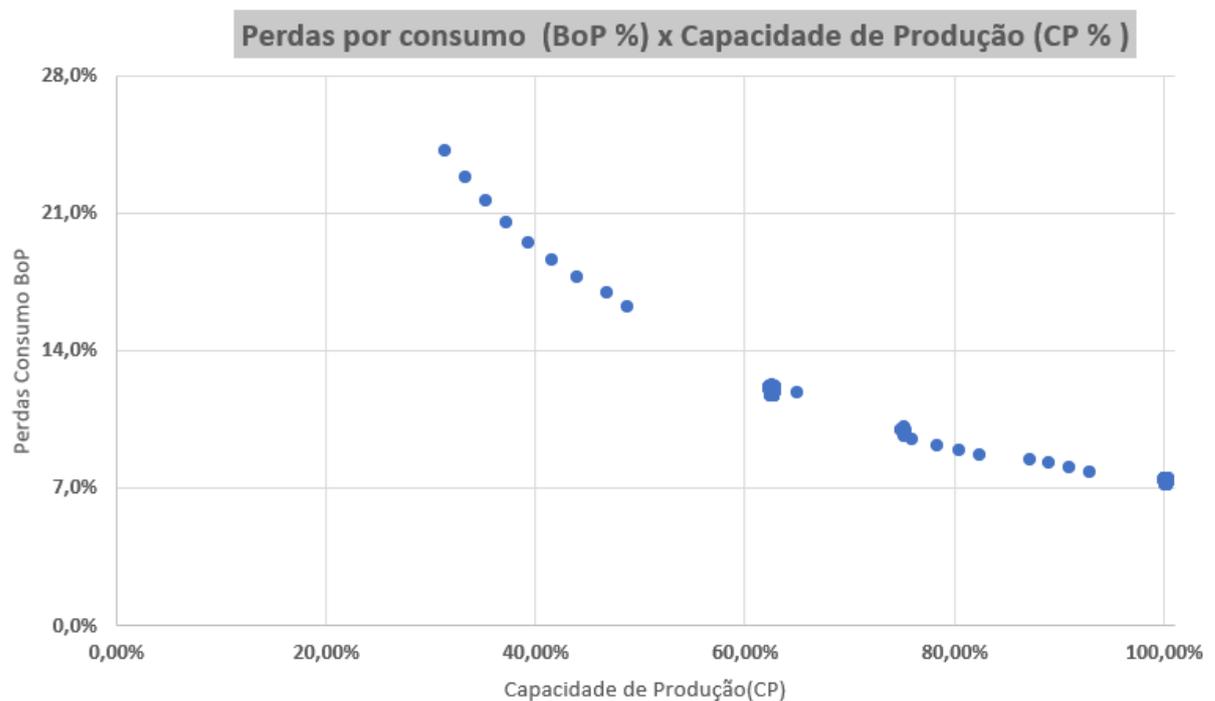
Descrição	Valor
Tensão Faraday por Célula (V)	1,48
Produção Nominal Stack-A (Nm ³ /h)	200
Produção Nominal Stack-BC (Nm ³ /h)	50
Nº Células no Stack-A	120
Nº Células no Stack-BC	142
Corrente Máxima-A (A)	3750
Corrente Máxima-BC (A)	900

Fonte: Data-sheet fabricante

3.4.4 Eficiência de conversão de eletrólise com Balance of Plant (BoP)

Foi observado durante a produção de hidrogênio no sistema PEM em escala de *MW* em estudo, que o impacto do consumo dos serviços auxiliares (*BoP*) na eficiência do ciclo de conversão, considerando o valor de energia elétrica consumida pelos equipamentos de utilidades, excluindo o consumo de energia elétrica DC na *Stack A*, representa em perda percentual uma variação com a produção conforme observado na Figura 32, entre 7% e 24%, sendo que o valor da perda média ficou em aproximadamente em 10% na maior parte das amostragens.

Figura 32 – Gráfico perdas por consumo *BoP* .



Fonte: O Autor

3.5 Eficiência de reconversão utilizando Célula de hidrogênio e Turbina a Gás

O método padrão para calcular a eficiência de uma planta de energia de célula de combustível ou outro dispositivo de geração elétrica é dividir a eletricidade produzida pelo HHV do combustível utilizado. Este método é considerado prático, uma vez que operador da usina compra combustível (gás é vendido pelo seu valor de poder aquecimento) e vende eletricidade.

$$\text{Eficiência Elétrica} = \frac{\text{Eletricidade Produzida}}{\text{Poder Calorífico Superior (HHV) do Combustível Utilizado}} \quad (3.18)$$

3.5.1 Célula de Hidrogênio

Existe um limite teórico máximo para a eficiência elétrica alcançável por um sistema de célula de combustível, representado pela energia livre de Gibbs dividida pelo calor de combustão do combustível. No caso da célula de combustível de hidrogênio, esse valor é a energia livre de Gibbs/HHV ($237,2 \text{ kJ/mol} \div 285,8 \text{ kJ/mol} = 83\%$). O uso de *HHV* aqui está em consonância com o método utilizado nos Estados Unidos para calcular a eficiência para motores de combustão interna (IC) e sistemas de turbina a gás.

Alguns desenvolvedores dos Estados Unidos de células de combustível de alta temperatura, no entanto, preferem a convenção europeia e usam o LHV do hidrogênio para o cálculo da eficiência. As Tabelas de JANAF (National Institute of Standards and Technology NIST, 2019), listam a energia livre de Gibbs para a formação de vapor de água a partir de hidrogênio e oxigênio como $228,6 \text{ kJ/mol}$, portanto, a eficiência teórica máxima de um sistema de célula de combustível completo com base no LHV do hidrogênio é $228,6 \text{ kJ/mol} \div 241,8 \text{ kJ/mol}$ ou $94,5\%$. O uso da convenção *Lower Heating Value (LHV)* para calcular a eficiência de um gerador elétrico sempre produz números maiores do que aqueles produzidos por cálculos usando o HHV para o mesmo sistema.

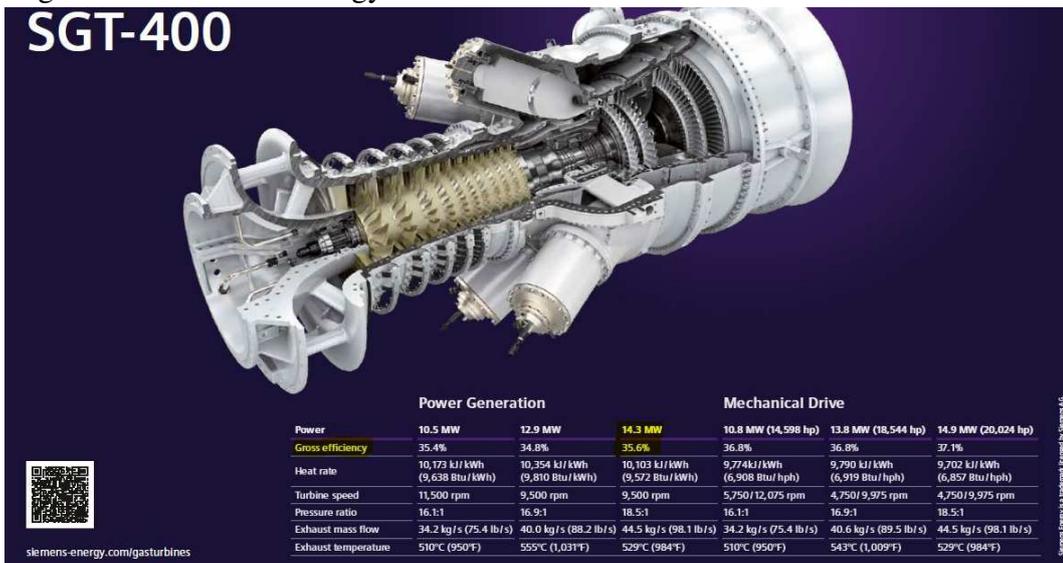
As células de combustível práticas não podem alcançar esses números máximos de eficiência elétrica devido às perdas de resistência interna. Por exemplo, uma célula de combustível prática operando perto de sua potência máxima de saída pode ser capaz de produzir apenas 154 kJ de eletricidade por mol de hidrogênio consumido, com o restante do valor de aquecimento aparecendo como calor produzido pela célula de combustível. O cálculo para tal célula de combustível é: $154 \text{ kJ/mol} \div 285,8 \text{ kJ/mol} = 54\%$ eficiente (HHV). Os 46% restantes da energia produzida podem ser recuperados do sistema de células de combustível como calor

co-gerado, (HARRISON *et al.*, 2010).

3.5.2 Turbina a gás

A aplicação direta do hidrogênio na câmara de combustão das turbinas a gás, seja de forma combinada ou 100%, já é possível com a tecnologia existente no mercado, como exemplo a Siemens Energy SGT-400, Figura 33, com eficiência de ciclo de 35,6%.

Figura 33 – Siemens Energy SGT-400.



Fonte: (SIEMENS ENERGY,).

Utilizando uma simulação através do software Acomb- IPT SP, em uma turbina a gás alimentada 100% com hidrogênio, pode-se observar conforme Figura 34, considerando os dados de uma turbina SGT 9000-HL, com eficiência máxima de 43%, com uma saída de potência elétrica de 304 kW (dado semelhante à amostragem, (Anexo C), obtendo o valor de consumo de 17,3 kg/h de hidrogênio, bem semelhante aos valores observados neste estudo.

Figura 34 – Simulação no Acomb.

Turbina a Gás

Nova Abrir Turbina Salvar Turbina Gás Combustível

Turbina

Eficiência	43	%
Potência	304	kW

Gases Exaustão

H2O	10,512	%
O2	16,75	%
N2	83,247	%
CO2	0,002896	%
SO2	0	%
Mol	28,611	
Vazão	1635,9	kg/h
Cp	1,2602	kJ/kgK
Densidade	0,38895	kg/m3
PCI/Gas	1266,7	kJ/kg
Entalpia	886,77	kJ/kg
Potência	402,98	kW

Ar de Combustão

Lb	300	%
T Ar	25	oC
Potência	24,963	kW

Gases Exaustão

Tg	495,04	oC
Teor O2	14,976	%
Teor CO2	0,0018828	%
Potência	402,98	kW

Seco Mássico

Ok Cancela

Fonte: O Autor.

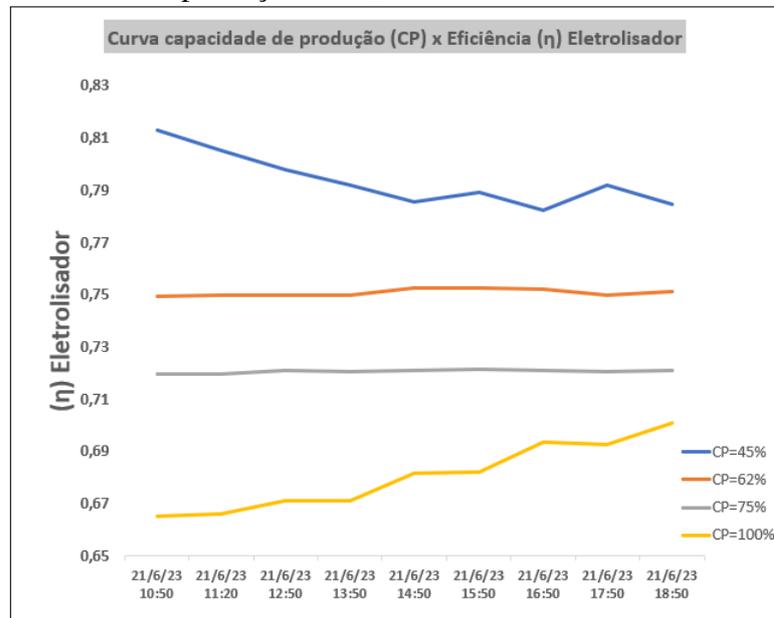
4 RESULTADOS

Os dados reais obtidos neste trabalho corroboram com as referências encontradas na literatura, (EL-SHAFIE, 2023; YODWONG *et al.*, 2024), consolidando assim a relevância e consistência das análises realizadas. A seguir, observa-se os resultados mais significativos observados ao longo do processo de produção de H_2V .

4.1 Eficiência e capacidade de produção

A eficiência do eletrolisador, é diretamente afetada pela Capacidade de Produção (CP). Esta relação é evidenciada nas curvas do gráfico da Figura 35. A curva na cor amarela, representa a capacidade de produção a 100% com eficiência média de 0,70; a cor cinza, representa a capacidade de produção a 75% com eficiência média de 0,72; o laranja, representa a capacidade de produção a 62% com eficiência média de 0,75; por fim a curva na cor azul, representa a capacidade de produção a 45% com eficiência média em 0,79.

Figura 35 – Gráfico curvas de eficiência com a variação de produção de H_2V .

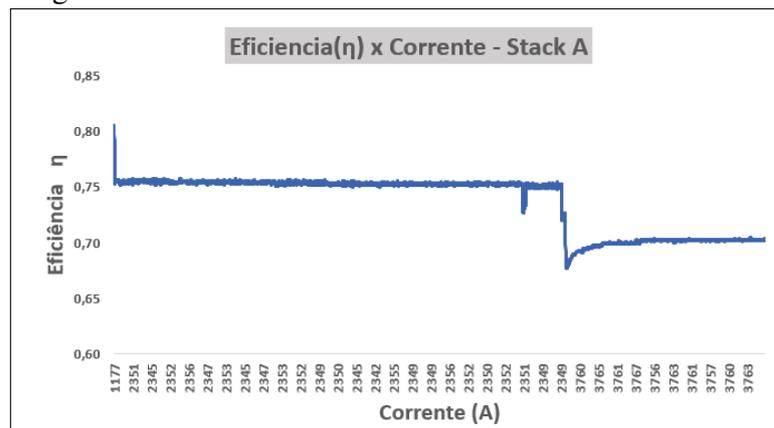


Fonte: O Autor.

Uma correlação com os ajustes de operação do processo de produção, em que o comportamento das curvas revelam que à medida que (CP) aumenta, a eficiência diminui, e vice-versa, mas, também, pelo fato de que com aumento da corrente elétrica necessária para alimentar o eletrolisador, resulta em uma maior resistência interna do sistema, levando a perdas de energia

durante o processo de eletrólise, Figura 36. Além disso, o aumento da corrente elétrica pode gerar excesso de calor, comprometendo a eficiência do processo eletroquímico, especialmente devido às estreitas faixas de temperatura ideais para operação eficiente do eletrolisador PEM. Essas condições operacionais intensificadas expõem limitações da membrana de troca de prótons, como a redução da condutividade iônica sob altas correntes, impactando negativamente a eficiência global do eletrolisador.

Figura 36 – Gráfico da eficiência x corrente do Stack A



Fonte: O Autor.

4.2 Eficiência individualizada dos sistemas

Na Tabela 7 são apresentados valores individuais de eficiência nas etapas de produção de H_2V , calculados a partir da amostragem das variáveis de processo medido no sistema de produção: potência AC de entrada do retificador, potência DC de saída do retificador, corrente DC no Stack A, tensão DC no Stack A, capacidade de produção do eletrolisador (CP) e vazão mássica (Anexos C); e radiação global, temperatura do AR, velocidade do vento e potência de saída da UFV (Anexo A). A qual é possível observar como referência, o valor médio (maior concentração dos dados encontrados na amostragem). As eficiências reais da conversão de H_2 têm valores parciais de 73,67% no que tange à Pilha PEM, e valor de 61,70% quanto ao valor global. Já observando os valores de eficiência, quando aplicado esta energia produzida em H_2 em reconversão de energia elétrica, a partir da queima do gás em uma turbina ou da liberação de corrente elétrica por uma célula de hidrogênio, tem-se valores menos atrativos do ponto de vista de viabilidade técnica, onde a eficiência média é de 37,32% para Célula Combustível de H_2 , e de 29,86% para uma Turbina a Gás, considerando que o fluxo desta produção não tenha a transformação de H_2 em outras substâncias (p.ex. Amônia) e perdas relacionadas ao transporte.

Tabela 7 – Valores reais de eficiência e perdas nas etapas de produção de H_2V

Descrição	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
Eficiência η_{UFV} (%)	17,02	29,69	22,06
Eficiência $\eta_{retificador}$ (%)	89,60	97,94	94,61
Eficiência $\eta_{Stack A}$ (%)	67,64	81,28	73,67
Perda por Consumo BoP (%)	7,19	24,21	10,65
Eficiência Global (%)	51,65	65,11	61,70
Eficiência da conversão H_2V $\eta_{Célula de H_2}$ (%)	34,38	44,35	37,32
Eficiência da conversão H_2V $\eta_{Turbina Gás}$ (%)	27,50	35,48	29,86

Fonte: O Autor

4.3 Comparativo e diferenciais do estudo apresentado em relação ao apresentado por outros autores

Segundo Riedel (2019), em seu estudo de pesquisa e desenvolvimento estabelecido de um sistema real de eletrólise capaz de produzir $20 Nm^3/h$ de hidrogênio, obteve como valores a eficiência de 61,01% para o eletrolisador, e 24,61% para eficiência global com célula de combustível. Comparado aos valores obtidos neste trabalho é possível identificar que para um sistema em grandeza de megawatt estes valores estão bem próximos, conforme resultados, Tabela 7.

De acordo com El-Shafie (2023), o consumo de energia para produção de hidrogênio foi de $3,370 kWh/Nm^3 H_2$, em comparação ao valor de $5,64 kWh/Nm^3 H_2$, obtido neste trabalho.

Entre os resultados obtidos, o mais significativo é a produção de dados de estudo sobre a produção de hidrogênio verde em condições reais, em uma escala de megawatt. Este avanço é notável, pois estabelece parâmetros essenciais para trabalhos futuros à medida que a produção deste importante combustível sustentável for ampliada. A obtenção desses dados em escala prática não apenas valida teorias e modelos laboratoriais, mas também fornece uma base sólida para otimizar processos, reduzir custos e melhorar a eficiência em operações industriais de larga escala. Com a crescente demanda por soluções energéticas limpas, esses resultados representam um passo crucial para a transição energética global, apoiando a viabilidade comercial do hidrogênio verde e incentivando investimentos e políticas favoráveis ao desenvolvimento sustentável

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnica usando dados reais de medição de uma planta de produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica. A planta de produção de hidrogênio verde inclui usina solar fotovoltaica de 3 MWp, conectada à rede elétrica por inversores de 250 kW, e retificador de 12 pulsos na entrada do eletrolisador PEM de 1,2 MW. Os resultados obtidos revelam taxas de conversão notavelmente elevadas, com eficiências parciais superiores a 70%. Com base em medições, os valores obtidos de eficiências nos estágios de produção de H_2V foram: usina fotovoltaica 22,06%, retificadores 94,61% e eletrolisador PEM 73,67%. Além disso, foi computado o valor de perda pelo consumo integrado de utilidades demandadas no processo de produção de H_2 , denominado Balance of Plant (BoP), com valor, 10,65% resultando em uma eficiência global para o sistema de produção de H_2V de 61,70%. No entanto, apesar destes resultados, os custos associados à tecnologia de fabricação dos eletrolisadores PEM e dos módulos solares permanecem consideráveis. Além disso, o custo atual de energia elétrica, é um fator crítico a ser considerado.

Observou-se, a partir deste trabalho, que a taxa de consumo de energia real, expressa pela relação da energia elétrica por unidade de quilos de hidrogênio produzido, é da ordem de 63,04 kWh/kg (5,64 kWh/Nm³H₂), ao ponto que o custo desta energia para transformar e produzir este rico combustível associado ao seu estimado custo de produção na atual conjuntura mundial, demanda cautela quanto a viabilidade de investimentos para produção de H_2V .

Além da avaliação da eficiência da produção de hidrogênio verde, foram também avaliados a eficiência da conversão de hidrogênio em eletricidade usando duas diferentes tecnologias: turbina a gás e célula a combustível. A eficiência estimada foi 29,86% para turbina a gás e 37,32% usando célula combustível, valores estes que se mostram bem competitivos quando comparados com as eficiências encontradas nas usinas a gás natural de ciclo aberto e as térmicas a carvão.

Face a estas informações obtidas no trabalho, é necessário ter prudência na afirmação de viabilidade técnica para a produção de Hidrogênio Verde (H_2V), quando aplicado ao acúmulo por armazenamento e transferência de energia elétrica devido sua moderada eficiência de conversão. Ressalta-se que, do ponto de vista da aplicação de novas tecnologias que melhorem e reduzam os custos de produção, associados à necessidade de transição das matrizes poluentes de energia, o combustível hidrogênio será seguramente o mais importante no futuro próximo.

5.1 Trabalhos futuros

Ao longo da escrita deste estudo, algumas possibilidades mostraram potencial para desenvolvimento de trabalhos futuros. Sugerem-se os seguintes pontos:

- Estudo e avaliação das variáveis de processo: temperatura de saída, pressão de saída e seu impacto na eficiência do eletrolisador PEM.
- Estudo para determinar a faixa ótima de operação dos principais componentes do eletrolisador PEM.
- Aplicação de eletrolisadores com controle de corrente DC diretamente ligado a produção da UFV.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, G. E.; SHENAWY, E. T. E. Optimized photovoltaic system for hydrogen production. **Renewable Energy**, v. 31, n. 7, p. 1043–1054, 2006.
- ATIZ, A.; KARAKILÇIK, M. Assessment of hydrogen generation and thermodynamic efficiencies of pem coupled with pv and pv-t under diverse circumstances. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 10, p. 101060, 2024.
- ATLAS, G. S. 2024. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info>>. Acesso em: 20 de março de 2024.
- BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 33, n. 15, p. 4013–4029, 2008.
- BAREIB, K.; RUA, C. de la; MÖCKL, M.; HAMACHER, T. Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. **Journal Name**, Volume, p. Pages, 2019.
- BESSARABOV, D.; WANG, H.; LI, H.; ZHAO, N. **PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2016.
- BURTON, N.; PADILLA, R.; ROSE, A.; HABIBULLAH, H. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 135, p. 110255, 2021. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030544X>>.
- CLIMATE. 2024. Acessado em 01 de Março, 2024. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>>.
- CORATO, A. M. D.; DOZEIN, M. G. Hydrogen electrolyzer load modelling for steady-state power system studies. **Journal Name**, Volume Number, n. Issue Number, p. Page Range, 2020. Disponível em: <URL>.
- DJAFOUR, A.; MATOUG, M.; BOURAS, H.; BOUCHEKIMA, B.; AIDA, M. S.; AZOUI, B. Photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: Basic principles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 6, p. 4117–4124, 2011.
- EL-SHAFIE, M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. **Results in Engineering**, v. 20, p. 101426, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>>.
- ENEL. **Hidrogênio**. 2023. Disponível em: <<<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/hidrogenio>>>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- EPE. **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. 2022. Disponível em: <<<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>>>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- FAIMAN, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley, v. 16, n. 4, p. 307–315, 2008.

FRAILE, D.; LANOIX, J.-C.; MAIO, P.; RANGEL, A.; TORRES, A. Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas. **CertifHy Proj**, p. 1–32, 2015.

FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e energia solar fotovoltaica**. Tese (Doutorado) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2011.

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu**. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010.

HARRISON, K.; REMICK, R.; MARTIN, G. **Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries**. [S.l.]: Publisher, 2010.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988.

IBERDROLA. Aplicações do hidrogênio verde. p. 1, 2022.

IEA. **The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities**. 2019. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2023.

IRENA. **Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition**. 2018. Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf>.

IRENA. **Renewable Energy Statistics 2019**. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency, 2019.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1,5°C Climate Goal**. 2020. Disponível em: <<https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.

IRENA. **Decarbonising End-use Sectors: Practical Insights on Green Hydrogen**. 2021. Disponível em: <<https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aecd97c4d029b01aa3a93131e8b>>. Acesso em: 10 set. 2023.

JENSON, J. O.; BANDUR, V.; YDE, L. Pre-investigation of water electrolysis. 2008.

LENG, Y.; CHEN, G.; MENDOZA, A. J.; TIGHE, T. B.; HICKNER, M. A.; WANG, C.-Y. Solid-state water electrolysis with an alkaline membrane. **J. Am. Chem. Soc.**, v. 134, p. 9054–9057, 2012.

NASA:Goddard Institute for Space Studies. **Global average temperature**. 2022. Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>.

National Institute of Standards and Technology NIST. Janaf thermochemical tables. 2019. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/chemistry/>>. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/chemistry/>>.

- Neahytron HYPeM Electrolyzer. **Neahytron HYPeM Electrolyzer**. 2024. <<https://hyfindr.com/en/shop/products/neaahytron-hypem-electrolyzer>>. Acessado em 10 de abril de 2024.
- NELSON, L.; LIN, J.; DAVIDSON, M.; CHILDS, E.; BARTEL, J.; GORMAN, J.; BALL, D.; ANIMALS, E.; RUBY, E. **Green Hydrogen: Guidebook**. 2020. Disponível em: <<https://www.ghcoalition.org/education>>. Cores do hidrogênio - pg.8.
- NUNES, A.; COSTA, M.; SILVA, A.; FERRÃO, P.; MARTINS, J. Hydrogen high heating value - variability and impact on the performance of low-energy appliances. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 10, p. 2538, 2020.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2014. 530 p.
- PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. [S.l.]: Pearson, 2017.
- RIEDEL, V. F. Análise técnica de um sistema de armazenamento de energia elétrica produzida por fontes renováveis utilizando sistemas de baterias e células a combustível a hidrogênio. In: . [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265367571>>.
- ROSSMEISL, J.; QU, Z. W.; ZHU, H.; KROES, G. J.; NØRSKOV, J. K. Electrolysis of water on oxide surfaces. **J. Electroanal. Chem.**, v. 607, p. 83–89, 2007.
- SANO, H. **Energy Carriers and Conversion Systems with Emphasis on Hydrogen: Volume 2**. [S.l.]: [s.l.], 2009. v. 1. 170–178 p.
- SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, Sociedade Brasileira de Química, v. 36, n. 8, p. 1176–1193, 2013.
- SANTOS, L. O.; SOUZA, F. A. A.; FILHO, C. O. C.; CARVALHO, P. C. M.; ALSKAIF, T.; PEREIRA, R. I. S. Hybrid modeling for photovoltaic module operating temperature estimation. **IEEE Journal of Photovoltaics**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2021.
- SASAKI, K. **Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective**. [S.l.]: Springer, 2016.
- SIEMENS ENERGY. **Página Inicial**. <<https://www.siemens-energy.com/>>. Acessado em 03 de maio de 2024.
- SILVA, E. P. D. **Fontes Renováveis de Energia - Produção de energia para um desenvolvimento sustentável**. Campinas, SP: Livraria da Física, 2014.
- STOLTEN, D.; EMONTS, B. **Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology**. [S.l.: s.n.], 2016. 1-1138 p. ISBN 9783527332380.
- SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 40, n. 21, p. 6976–6987, 2015.
- URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012.

WANG, M.; WANG, Z.; GONG, X.; GUO, Z. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 573–588, 2014.

YODWONG, B.; GUILBERT, D.; PHATTANASAK, M.; KAEWMANEE, W.; HINAJE, M.; VITALE, G. Ac-dc converters for electrolyzer applications: State of the art and future challenges. **Journal Name**, Publisher, Nancy, France, X, n. X, p. X–X, 2020.

YODWONG, B.; GUILBERT, D.; PHATTANASAK, M.; KAEWMANEE, W.; HINAJE, M.; VITALE, G. Ac-dc converters for electrolyzer applications: State of the art and future challenges. **Electronics**, v. 13, n. 5, p. 123, 2024.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010.

ZHANG, H.; SU, S.; LIN, G.; CHEN, J. Efficiency calculation and configuration design of a PEM electrolyzer system for hydrogen production. **Journal Name**, Publisher, Volume Number, n. Issue Number, p. Page Range, May 2012. Disponível em: <URL>.

ANEXO A - AMOSTRAGEM DE DADOS DA UFV

AMOSTRAGEM NO TEMPO	RADIAÇÃO GLOBAL (kw/m ²)	TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)	VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)	PONTÊNCIA MÉDIA (kw)	Temperatura do módulo Modelo Faiman Tm=Ta+ G/(U0+U1*Ws)	Eficiência Teórica $\eta = \eta_{stc}(1 - \beta(T_m - T_{stc}))$	Eficiência Real $\eta = P(out)/G*A*N(mód)$
6/17/2023 10:00:00	0,23	28,70	1,90	908,26	28,71	0,256	0,274
6/17/2023 15:00:00	0,22	29,00	1,00	832,39	29,01	0,256	0,266
6/18/2023 09:00:00	0,32	29,10	2,50	1071,52	29,11	0,256	0,233
6/18/2023 10:00:00	0,47	30,30	3,10	1578,90	30,31	0,254	0,233
6/18/2023 11:00:00	0,56	30,40	3,20	1660,50	30,41	0,254	0,208
6/18/2023 12:00:00	0,63	30,10	4,20	1723,19	30,11	0,255	0,191
6/18/2023 14:00:00	0,53	29,90	4,10	1611,63	29,91	0,255	0,213
6/18/2023 15:00:00	0,47	30,00	3,50	1498,98	30,01	0,255	0,223
6/19/2023 09:00:00	0,35	29,00	2,30	1510,13	29,01	0,256	0,297
6/19/2023 10:00:00	0,51	30,30	3,10	1728,09	30,31	0,254	0,238
6/19/2023 11:00:00	0,38	29,60	2,90	1574,95	29,61	0,255	0,287
6/19/2023 12:00:00	0,37	30,30	2,20	1241,04	30,31	0,254	0,234
6/19/2023 14:00:00	0,49	30,60	2,70	1498,88	30,61	0,254	0,214
6/19/2023 15:00:00	0,46	29,90	3,70	1421,68	29,91	0,255	0,217
6/20/2023 10:00:00	0,40	28,30	3,20	926,53	28,31	0,256	0,163
6/21/2023 09:00:00	0,33	27,80	3,20	1103,91	27,81	0,257	0,235
6/21/2023 10:00:00	0,51	28,50	3,20	1351,41	28,51	0,256	0,183
6/21/2023 11:00:00	0,53	29,60	3,50	1457,91	29,61	0,255	0,190
6/21/2023 12:00:00	0,49	29,80	2,80	1639,06	29,81	0,255	0,233
6/21/2023 13:00:00	0,56	30,60	3,20	1647,96	30,61	0,254	0,205
6/21/2023 14:00:00	0,51	30,60	2,80	1285,18	30,61	0,254	0,175
6/21/2023 15:00:00	0,38	29,80	3,10	1238,19	29,81	0,255	0,228
6/22/2023 10:00:00	0,52	29,10	4,00	1739,63	29,11	0,256	0,233
6/22/2023 11:00:00	0,58	30,00	3,70	1700,05	30,01	0,255	0,204
6/22/2023 12:00:00	0,62	30,40	4,20	1666,27	30,41	0,254	0,186
6/22/2023 14:00:00	0,51	30,40	3,50	1656,13	30,41	0,254	0,224
6/22/2023 15:00:00	0,44	28,90	3,60	1311,29	28,91	0,256	0,205
6/23/2023 09:00:00	0,36	27,80	3,90	1435,46	27,81	0,257	0,280
6/23/2023 10:00:00	0,48	28,50	3,90	1373,04	28,51	0,256	0,201
6/23/2023 11:00:00	0,43	28,70	3,80	1708,99	28,71	0,256	0,274
6/23/2023 12:00:00	0,55	30,70	3,70	1599,49	30,71	0,254	0,203
6/23/2023 13:00:00	0,62	30,90	3,50	1538,59	30,91	0,254	0,174
6/23/2023 14:00:00	0,58	31,00	3,40	1516,02	31,01	0,254	0,181
6/23/2023 15:00:00	0,48	30,30	3,20	1433,29	30,31	0,254	0,208
6/24/2023 09:00:00	0,31	28,30	2,90	1109,54	28,31	0,256	0,251
6/24/2023 10:00:00	0,31	28,80	3,30	1269,83	28,81	0,256	0,289
6/24/2023 11:00:00	0,44	29,80	3,00	1542,39	29,81	0,255	0,245
6/24/2023 12:00:00	0,37	29,30	2,40	1215,97	29,31	0,255	0,228
6/24/2023 14:00:00	0,18	28,90	1,80	755,02	28,90	0,256	0,289
6/24/2023 16:00:00	0,18	28,70	2,60	425,64	28,70	0,256	0,160
6/25/2023 10:00:00	0,52	28,40	4,50	1746,02	28,41	0,256	0,236
6/25/2023 11:00:00	0,60	30,10	3,80	1758,58	30,11	0,255	0,204
6/25/2023 12:00:00	0,62	30,90	3,60	1754,72	30,91	0,254	0,196
6/25/2023 13:00:00	0,46	30,70	4,90	1453,19	30,71	0,254	0,220
6/26/2023 09:00:00	0,39	27,80	3,90	1614,76	27,81	0,257	0,290
6/26/2023 10:00:00	0,48	28,20	3,60	1292,33	28,21	0,256	0,186
6/26/2023 11:00:00	0,38	29,80	2,80	1181,43	29,81	0,255	0,214
6/26/2023 12:00:00	0,21	28,40	2,60	735,25	28,40	0,256	0,244
6/26/2023 13:00:00	0,22	29,40	3,50	896,85	29,40	0,255	0,283
6/26/2023 14:00:00	0,51	29,90	4,20	1144,98	29,91	0,255	0,155
6/26/2023 15:00:00	0,46	29,80	3,50	1414,71	29,81	0,255	0,214
6/27/2023 10:00:00	0,52	28,50	3,80	1712,88	28,51	0,256	0,231
6/27/2023 11:00:00	0,57	29,50	4,10	1468,81	29,51	0,255	0,178
6/27/2023 12:00:00	0,51	30,60	3,00	1566,82	30,61	0,254	0,216
6/28/2023 10:00:00	0,39	29,20	3,20	1441,27	29,21	0,255	0,258
6/28/2023 11:00:00	0,55	30,50	3,50	1566,57	30,51	0,254	0,198
6/28/2023 12:00:00	0,43	30,20	2,80	1106,98	30,21	0,255	0,178
6/28/2023 13:00:00	0,25	29,10	2,60	857,23	29,11	0,256	0,238
6/28/2023 15:00:00	0,34	31,10	3,10	1048,56	31,11	0,254	0,212
6/29/2023 09:00:00	0,29	25,90	4,00	926,86	25,91	0,258	0,221
6/29/2023 10:00:00	0,39	28,10	2,80	997,49	28,11	0,256	0,177
6/29/2023 11:00:00	0,45	29,00	3,80	1259,79	29,01	0,256	0,194
6/29/2023 12:00:00	0,46	30,00	2,80	1135,39	30,01	0,255	0,170
6/29/2023 13:00:00	0,39	30,50	2,40	1159,80	30,51	0,254	0,205
6/29/2023 15:00:00	0,43	30,10	3,40	1139,01	30,11	0,255	0,184
6/30/2023 09:00:00	0,30	27,50	2,60	886,71	27,51	0,257	0,206
6/30/2023 12:00:00	0,35	29,40	2,00	1048,66	29,41	0,255	0,211
6/30/2023 13:00:00	0,40	30,20	3,60	1349,22	30,21	0,255	0,235
6/30/2023 14:00:00	0,53	29,80	3,70	1497,35	29,81	0,255	0,196
6/30/2023 15:00:00	0,46	29,10	4,00	1278,95	29,11	0,256	0,195
7/1/2023 10:00:00	0,53	29,30	3,60	1567,75	29,31	0,255	0,207
7/1/2023 11:00:00	0,54	30,50	3,40	1621,88	30,51	0,254	0,208
7/1/2023 12:00:00	0,65	30,60	3,60	1667,12	30,61	0,254	0,179
7/1/2023 13:00:00	0,64	31,50	3,60	1576,88	31,51	0,253	0,171
7/1/2023 14:00:00	0,43	29,50	2,20	1245,11	29,51	0,255	0,203
7/1/2023 15:00:00	0,37	29,90	3,70	1339,98	29,91	0,255	0,249
7/2/2023 08:00:00	0,23	27,30	2,70	840,49	27,31	0,257	0,250
7/2/2023 10:00:00	0,44	29,70	3,40	1012,65	29,71	0,255	0,162
7/2/2023 11:00:00	0,50	30,60	3,20	1463,62	30,61	0,254	0,203
7/2/2023 13:00:00	0,60	30,10	3,60	1651,09	30,11	0,255	0,193
7/2/2023 14:00:00	0,57	30,30	4,20	1549,95	30,31	0,254	0,189
7/2/2023 15:00:00	0,48	30,30	3,30	1409,32	30,31	0,254	0,205
7/3/2023 08:00:00	0,27	27,80	1,90	918,56	27,81	0,257	0,239

7/3/2023 10:00:00	0,41	27,90	2,00	1304,52	27,91	0,257	0,220
7/3/2023 12:00:00	0,64	30,70	3,70	1672,92	30,71	0,254	0,183
7/3/2023 13:00:00	0,63	31,10	3,30	1638,44	31,11	0,254	0,180
7/3/2023 14:00:00	0,57	30,50	3,60	1571,96	30,51	0,254	0,192
7/3/2023 15:00:00	0,48	30,00	3,70	1401,67	30,01	0,255	0,203
7/4/2023 10:00:00	0,52	29,70	4,20	1676,02	29,71	0,255	0,226
7/4/2023 11:00:00	0,59	31,10	3,80	1477,69	31,11	0,254	0,176
7/4/2023 12:00:00	0,62	32,20	2,80	1686,16	32,21	0,253	0,190
7/4/2023 13:00:00	0,52	30,20	3,20	1635,35	30,21	0,255	0,218
7/4/2023 14:00:00	0,56	30,20	4,60	1561,54	30,21	0,255	0,193
7/4/2023 15:00:00	0,48	29,70	3,90	1411,41	29,71	0,255	0,206
7/5/2023 10:00:00	0,52	28,90	3,80	1688,52	28,91	0,256	0,225
7/5/2023 11:00:00	0,59	30,30	3,80	1698,38	30,31	0,254	0,199
7/5/2023 12:00:00	0,63	31,20	3,60	1686,45	31,21	0,254	0,186
7/5/2023 13:00:00	0,62	31,80	4,00	1617,97	31,81	0,253	0,183
7/6/2023 10:00:00	0,42	28,50	3,60	1661,51	28,51	0,256	0,273
7/6/2023 11:00:00	0,59	30,20	2,50	1368,75	30,21	0,255	0,162
7/6/2023 12:00:00	0,46	30,70	4,30	1533,36	30,71	0,254	0,234
7/6/2023 13:00:00	0,45	30,20	3,50	1281,97	30,21	0,255	0,197
7/6/2023 14:00:00	0,50	30,10	5,20	1564,51	30,11	0,255	0,219
7/6/2023 15:00:00	0,43	29,70	4,10	1409,70	29,71	0,255	0,227
7/6/2023 16:00:00	0,22	28,30	3,80	629,12	28,30	0,256	0,203
7/7/2023 08:00:00	0,23	25,80	1,80	950,06	25,81	0,259	0,283
7/7/2023 10:00:00	0,47	28,30	2,70	1666,49	28,31	0,256	0,245
7/7/2023 11:00:00	0,48	29,60	2,40	1651,87	29,61	0,255	0,242
7/7/2023 12:00:00	0,60	30,40	3,10	1685,47	30,41	0,254	0,197
7/7/2023 13:00:00	0,55	30,30	2,80	1604,82	30,31	0,254	0,203
7/7/2023 14:00:00	0,51	30,40	3,90	1512,98	30,41	0,254	0,206
7/7/2023 15:00:00	0,47	30,30	3,20	1350,83	30,31	0,254	0,200
7/8/2023 10:00:00	0,47	29,10	3,90	1652,91	29,11	0,256	0,247
7/8/2023 11:00:00	0,48	30,30	3,70	1675,64	30,31	0,254	0,241

ANEXO B - DATASHEET MÓDULOS BIFACIL HC 72M -JINKO

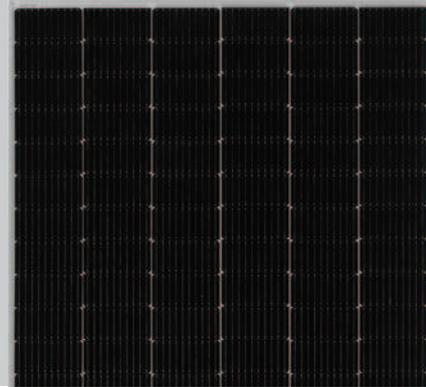
Bifacial HC 72M 515-535 Watt MONOCRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

ISO9001:2015, ISO14001:2015, ISO45001:2018 certified factory.

IEC61215, IEC61730, certified products.

TIGER Pro



KEY FEATURES



Multi Busbar Solar Cell

MBB solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.



PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.



Higher Life time Power Yield:

0.45% annual power degradation
30 year linear power warranty



Higher power output:

Module power increases 5-25% generally (per different reflective condition)
lower LCOE and higher IRR

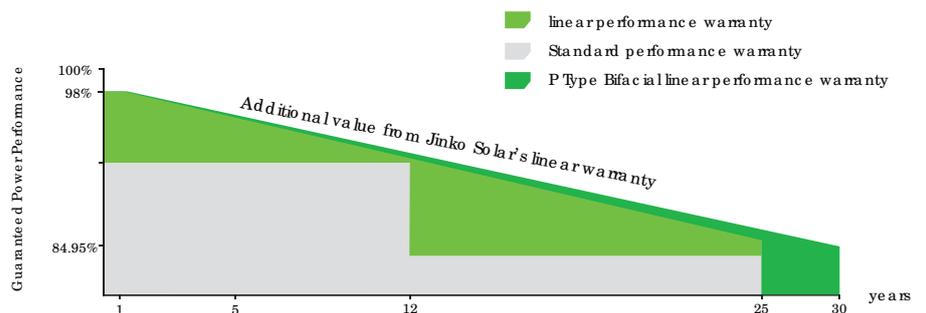


Better low-light performance:

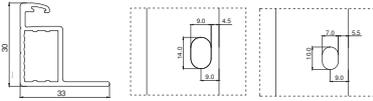
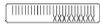
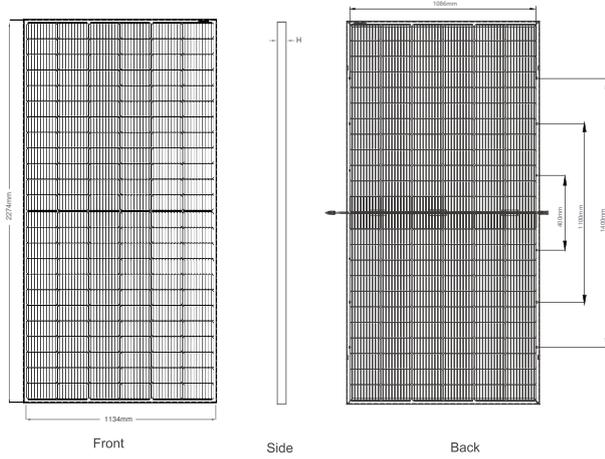
Excellent performance in low-light environments (e.g. early morning, dusk, and cloud, etc.)

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

12 Year Product Warranty • 30 Year Linear Power Warranty
0.45% Annual Degradation Over 30 years



Engineering Drawings



Length: $\pm 2\text{mm}$
Width: $\pm 2\text{mm}$
Height: $\pm 1\text{mm}$
Row Pitch: $\pm 2\text{mm}$

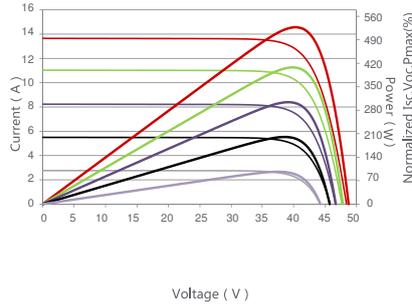
Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

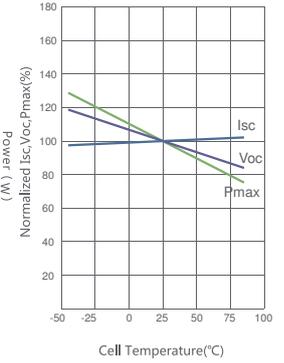
35pcs/pallets, 70pcs/stack, 630pcs/ 40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (520W)



Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2274×1134×30mm (89.53×44.65×1.18 inch)
Weight	34.3 kg (75.62 lbs)
Front Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0mm heat strengthened glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 250mm, (-): 150mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM515M-72HL4-BDVP		JKM520M-72HL4-BDVP		JKM525M-72HL4-BDVP		JKM530M-72HL4-BDVP		JKM535M-72HL4-BDVP	
	STC	NOCT								
Maximum Power (Pmax)	515Wp	383Wp	520Wp	387Wp	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.65V	37.68V	40.73V	37.74V	40.80V	37.81V	40.87V	37.88V	40.94V	37.94V
Maximum Power Current (Imp)	12.67A	10.17A	12.77A	10.25A	12.87A	10.33A	12.97A	10.41A	13.07A	10.49A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.30V	46.43V	49.36V	46.49V	49.42V	46.55V	49.48V	46.60V	49.54V	46.66V
Short-circuit Current (Isc)	13.43A	10.85A	13.53A	10.93A	13.63A	11.01A	13.73A	11.09A	13.83A	11.17A
Module Efficiency STC (%)	19.97%		20.17%		20.36%		20.55%		20.75%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		541Wp	546Wp	551Wp	557Wp	562Wp
5%	Maximum Power (Pmax)	541Wp	546Wp	551Wp	557Wp	562Wp
	Module Efficiency STC (%)	20.97%	21.17%	21.38%	21.58%	21.78%
15%	Maximum Power (Pmax)	592Wp	598Wp	604Wp	610Wp	615Wp
	Module Efficiency STC (%)	22.97%	23.19%	23.41%	23.64%	23.86%
25%	Maximum Power (Pmax)	644Wp	650Wp	656Wp	663Wp	669Wp
	Module Efficiency STC (%)	24.96%	25.21%	25.45%	25.69%	25.93%

* STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: $\pm 3\%$

©2020 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.

Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM515-535M-72HL4-BDVP-A2(2)-EN IEC 2016

ANEXO C – AMOSTRAGEM DE DADOS DO ELETROLISADOR

Z1 e Z4(6/2023)	Potência AC de entrada (kW)	ref_CorrenteAmp_EM_1A(I)	ref_TensoVoLts_EM_1A(V)	ref_CorrenteAmp_EM_2A(I)	ref_TensoVoLts_EM_2A(V)	ref_CorrenteAmp_Tot_EM(A)	ref_TensoVoLts_Tot_EM(V)	refCapProdEM_A (%)	ref_PotWattsTot_EM(AW)	CapaProdEM_A real/(Wh)	CapaProdEM_A REAL(%)	m Técnico (h/h)	m Real(kg/h)	HHV	Eficiencia do Eletrolisador η	Eficiencia (ref/real) = η/ηpac
08-49-51	268,08	595,80	226,00	601,90	229,00	1176,90	100,00	260,60	62,77	31,38	17,90	5,62	39,42	0,81	0,98	
08-49-53	287,84	630,00	229,00	638,50	231,00	1251,40	100,00	281,40	70,44	33,17	17,90	5,62	39,42	0,81	0,98	
08-49-55	308,21	673,30	231,00	1233,50	234,00	1300,40	100,00	300,40	73,59	35,29	17,90	5,62	39,42	0,80	0,97	
08-49-57	329,30	706,90	233,00	1710,00	236,00	1397,90	100,00	321,20	74,55	37,28	17,90	5,62	39,42	0,79	0,98	
08-49-59	350,69	756,60	235,00	1878,00	238,00	1478,50	100,00	342,40	76,63	39,43	17,90	5,62	39,42	0,79	0,98	
08-50-01	371,39	782,40	237,00	1564,00	240,00	1564,00	100,00	362,40	81,41	41,71	17,90	5,62	39,42	0,79	0,98	
08-50-03	393,75	821,10	239,00	827,80	242,00	1648,90	100,00	383,20	87,94	43,97	17,90	5,62	39,42	0,78	0,97	
08-50-05	415,64	869,90	241,00	1462,00	244,00	1755,70	100,00	404,80	92,80	46,32	17,90	5,62	39,42	0,78	0,97	
08-50-07	438,18	901,70	243,00	1833,90	246,00	1833,90	100,00	426,00	97,81	48,90	17,90	5,62	39,42	0,78	0,97	
08-51-01	1094,41	1879,10	283,00	1882,10	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-03	1105,04	1879,10	283,00	1884,60	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-05	1107,01	1879,10	283,00	1884,60	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-07	1108,89	1879,10	283,00	1884,60	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-09	1110,13	1879,10	283,00	1880,90	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-11	1112,11	1879,10	282,00	1882,70	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-13	1112,11	1879,10	282,00	1884,60	285,00	3763,80	100,00	1063,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,66	0,97	
08-51-15	1112,11	1879,10	282,00	1882,70	284,00	3762,40	100,00	1059,80	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,67	0,95	
08-51-17	1115,04	1879,10	282,00	1882,70	284,00	3762,40	100,00	1059,80	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,67	0,95	
08-51-19	1115,04	1879,10	282,00	1882,70	284,00	3762,40	100,00	1059,80	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,67	0,95	
08-51-21	1115,04	1879,10	281,00	1884,60	283,00	3764,90	100,00	1056,20	200,79	100,40	17,90	17,98	39,42	0,67	0,95	
08-51-23	1115,04	1879,10	281,00	1884,60	283,00	3764,90	100,00	1056,20	200,79	100,40	17,90	17,98	39,42	0,67	0,95	
08-51-25	1114,70	1879,10	280,00	1882,70	282,00	3761,20	100,00	1052,20	200,57	100,28	17,90	17,97	39,42	0,67	0,94	
08-51-27	1115,04	1879,10	280,00	1882,70	282,00	3760,60	100,00	1052,20	200,57	100,28	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-29	1115,04	1879,10	279,00	1883,30	282,00	3762,40	100,00	1052,20	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-31	1115,04	1879,10	279,00	1880,90	282,00	3764,40	100,00	1048,20	200,53	100,25	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-33	1115,04	1878,50	279,00	1881,50	282,00	3760,00	100,00	1048,20	200,53	100,25	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-35	1115,04	1879,10	279,00	1882,70	282,00	3760,00	100,00	1048,20	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-37	1115,04	1878,50	279,00	1885,20	281,00	3761,80	100,00	1046,20	200,63	100,31	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-39	1115,04	1879,10	279,00	1881,50	281,00	3760,60	100,00	1048,40	200,57	100,28	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-41	1115,04	1877,20	279,00	1883,30	281,00	3769,90	100,00	1047,40	200,53	100,26	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-43	1114,70	1877,90	279,00	1881,50	280,00	3760,00	100,00	1047,80	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-45	1112,11	1877,90	278,00	1882,70	281,00	3760,60	100,00	1044,00	200,57	100,28	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-47	1112,11	1879,10	278,00	1880,90	280,00	3760,00	100,00	1044,00	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-49	1112,11	1877,90	278,00	1882,70	280,00	3760,00	100,00	1044,00	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,67	0,94	
08-51-51	1112,11	1877,90	278,00	1881,50	280,00	3758,70	100,00	1043,60	200,46	100,23	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-53	1108,73	1878,50	278,00	1882,10	280,00	3761,80	100,00	1044,40	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-55	1108,73	1877,90	278,00	1882,10	280,00	3761,20	100,00	1044,00	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-57	1112,11	1878,50	278,00	1881,50	280,00	3758,70	100,00	1043,60	200,46	100,23	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-51-59	1108,73	1878,50	278,00	1882,10	280,00	3761,80	100,00	1044,40	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-52-01	1104,79	1878,50	277,00	1882,70	280,00	3761,20	100,00	1044,00	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-52-03	1107,62	1877,20	278,00	1880,90	280,00	3758,70	100,00	1043,60	200,46	100,23	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-52-05	1104,79	1878,50	278,00	1884,60	280,00	3761,10	100,00	1044,40	200,70	100,35	17,90	17,97	39,42	0,67	0,94	
08-52-07	1104,79	1878,50	278,00	1882,70	280,00	3761,20	100,00	1044,00	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,67	0,94	
08-52-09	1104,79	1878,50	277,00	1879,70	280,00	3760,60	100,00	1040,60	200,57	100,28	17,90	17,97	39,42	0,67	0,94	
08-52-11	1104,79	1877,90	277,00	1881,50	280,00	3761,10	100,00	1040,20	200,70	100,35	17,90	17,97	39,42	0,68	0,94	
08-52-13	1104,79	1879,10	277,00	1882,70	280,00	3761,80	100,00	1041,00	200,64	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-15	1104,79	1877,90	277,00	1880,90	280,00	3760,00	100,00	1040,20	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-17	1104,79	1878,50	277,00	1884,60	279,00	3759,40	100,00	1040,00	200,50	100,25	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-19	1104,79	1879,10	277,00	1882,70	279,00	3761,10	100,00	1041,00	200,64	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-21	1103,21	1877,90	277,00	1880,90	279,00	3760,60	100,00	1041,00	200,64	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-23	1102,44	1877,90	277,00	1884,60	279,00	3762,40	100,00	1040,00	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-25	1102,44	1879,10	277,00	1882,70	279,00	3761,10	100,00	1041,00	200,70	100,35	17,90	17,97	39,42	0,68	0,94	
08-52-27	1102,44	1878,50	277,00	1882,70	279,00	3761,20	100,00	1040,00	200,66	100,33	17,90	17,97	39,42	0,68	0,94	
08-52-29	1102,44	1878,50	276,00	1880,90	278,00	3758,70	100,00	1037,40	200,66	100,33	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-31	1102,44	1877,90	276,00	1882,70	279,00	3760,60	100,00	1036,60	200,57	100,28	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-33	1102,44	1878,50	276,00	1880,90	279,00	3760,00	100,00	1036,60	200,57	100,28	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-35	1102,44	1877,90	276,00	1881,50	279,00	3760,60	100,00	1036,60	200,57	100,28	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-37	1101,96	1878,50	276,00	1883,30	278,00	3761,80	100,00	1036,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-39	1098,34	1877,90	276,00	1885,20	278,00	3763,80	100,00	1036,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-41	1098,34	1878,50	276,00	1881,50	278,00	3759,40	100,00	1036,60	200,50	100,25	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-43	1098,34	1877,90	276,00	1882,70	278,00	3761,80	100,00	1036,60	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-45	1098,34	1879,10	276,00	1880,90	278,00	3760,00	100,00	1036,60	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-47	1096,30	1879,10	276,00	1884,60	278,00	3759,40	100,00	1037,20	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-49	1096,30	1879,10	276,00	1882,70	278,00	3759,40	100,00	1037,20	200,53	100,27	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-51	1096,30	1878,50	276,00	1880,90	278,00	3762,40	100,00	1036,80	200,63	100,31	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-53	1096,30	1880,30	276,00	1882,70	278,00	3761,20	100,00	1036,00	200,50	100,25	17,90	17,95	39,42	0,68	0,94	
08-52-55	1096,30	1879,10	275,00	1881,50	278,00	3761,20	100,00	1036,00	200,60	100,30	17,90	17,96	39,42	0,68	0,94	
08-52-57																

ANEXO D - DATASHEET DO INVERSOR

SG250HX Novo

SUNGROW
Clean power for all

Inversor string de múltiplos MPPTs para sistemas de 1500 Vcc



ALTO RENDIMENTO

- 12 MPPTs com eficiência máxima de 99%
- 30A MPPT compatível com módulos de 500Wp+
- Funções Anti-PID e PID recovery de fábrica

O&M INTELIGENTES

- Atualização de firmware remoto e comissionamento sem toque
- Varredura e diagnóstico de curva IV online*
- Design sem fusíveis com monitoramento de corrente de string inteligente

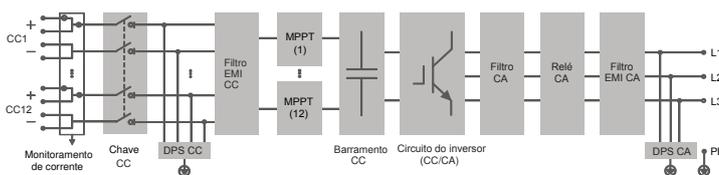
BAIXO CUSTO

- Compatível com cabos CA de Al e Cu
- Conexão CC 2 em 1 ativa
- Power line communication (PLC)
- Função Q noturna

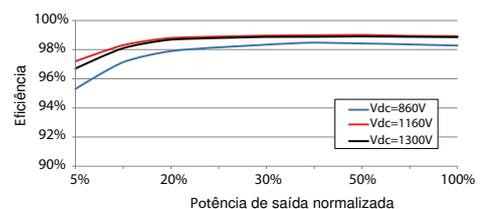
SEGURANÇA COMPROVADA

- IP66 e grau anticorrosivo C5
- Dispositivo de proteção contra surtos(DPS) tipo II para CC e CA
- Compatível com segurança e código de rede globais

DIAGRAMA DE CIRCUITO



CURVA DE EFICIÊNCIA



Descrição do tipo	SG250HX
Entrada (CC)	
Tensão máxima de entrada FV	1500 V
Tensão mínima de entrada FV/ Tensão de inicialização	500 V / 500 V
Tensão nominal de entrada FV	1160 V
Intervalo de tensão MPP	500 V – 1500 V
Intervalo de tensão MPP para a potência nominal	860 V – 1300 V
Nº de entradas MPP independentes	12
Número máximo de strings FV por MPPT	2
Corrente de entrada máxima FV	30 A * 12
Corrente máxima CC de curto-circuito	50 A * 12
Saída (CA)	
Potência de saída CA	250 kVA @ 30 °C / 225 kVA @ 40 °C / 200 kVA @ 50 °C
Corrente de saída CA máxima	180.5 A
Tensão CA nominal	3 / PE, 800 V
Intervalo de tensão CA	680 – 880V
Frequência nominal de rede/ Faixa de frequência da rede	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
THD	< 3 % (à potência nominal)
Injeção de corrente CC	Entrada de < 0.5 %
Fator de potência à potência nominal / Fator de potência ajustável	> 0.99 / 0,8 adiantado – 0,8 atrasado
Fases de alimentação / Fases de conexão	3 / 3
Eficiência	
Eficiência máxima	99.0 %
Eficiência europeia	98.8 %
Proteção	
Proteção de conexão CC reversa	Sim
Proteção contra curto-circuito CA	Sim
Proteção contra corrente de fuga	Sim
Monitoramento de rede	Sim
Monitoramento de falha de aterramento	Sim
Interruptor CC	Sim
Interruptor CA	Não
Monitoramento de corrente da string FV	Sim
Função Q noturna	Sim
Função anti PID e recuperação de PID	Sim
Proteção de sobretensão	CC tipo II / CA tipo II
Dados gerais	
Dimensões (L*A*P)	1051 * 660 * 363 mm
Peso	99kg
Método de isolamento	Sem transformador
Grau de proteção contra intrusão	IP66
Consumo de energia à noite	< 2 W
Faixa de temperatura do ambiente de operação	-30 to 60 °C
Faixa de umidade relativa permitida (sem condensação)	0 – 100 %
Método de resfriamento	Resfriamento de ar forçado inteligente
Atitude máxima de operação	5000 m (redução de potência a > 4000 m)
Visor	LED, Bluetooth+App
Comunicação	RS485 / PLC
Tipo de conexão CC	MC4-Evo2 (Máx. 6 mm ² , opcional 10mm ²)
Tipo de conexão CA	Terminal OT/DT (Máx. 300 mm ²)
Conformidade	IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683, VDE-AR-N4110:2018, VDE-AR-N 4120:2018, EN 50549-1/2, UNE 206007-1:2013,P.O.12.3, UTE C15-712-1:2013
Suporte à rede	Função Q noturna, LVVRT, HVVRT, controle de potência ativa e reativa e controle de taxa de rampa de potência

*: Compatível com logger Sungrow e iSolarCloud

