



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA

**Análise comparativa entre a produção de hidrogênio verde solar e eólico: aspectos
técnicos, econômicos e ambientais**

Guaratinguetá
2023

Lucas Pamplona Cardozo Costa

Análise comparativa entre a produção de hidrogênio verde solar e eólico: aspectos técnicos, econômicos e ambientais

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica em Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá

2023

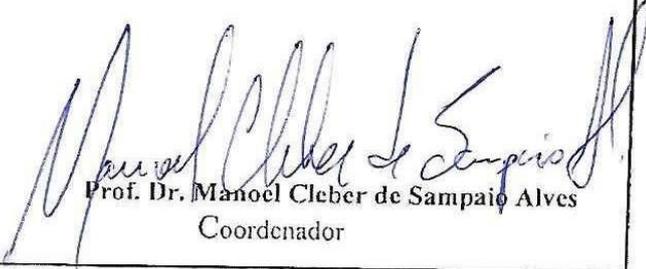
C837a	<p>Costa, Lucas Pamplona Cardozo</p> <p>Análise comparativa entre a produção de hidrogênio verde solar e eólico: aspectos técnicos, econômicos e ambientais / Lucas Pamplona Cardozo Costa - Guaratinguetá, 2023.</p> <p>96 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 88-94</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna</p> <p>1. Hidrogênio. 2. Sistema de energia fotovoltaica. 3. Energia solar. I. Título.</p> <p>CDU 546.11(043)</p>
-------	---

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA

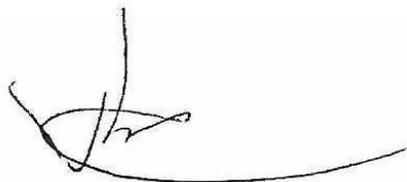
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

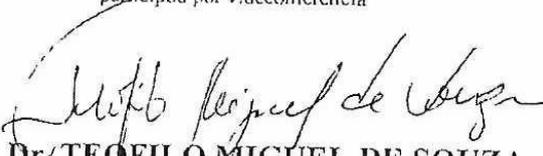

Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

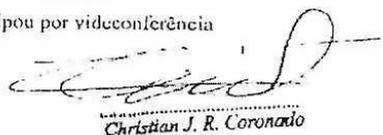


Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA
Orientador - UNESP

participou por videoconferência


Prof. Dr. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP

participou por videoconferência


Christian J. R. Coronado
Prof. Dr.
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI RODRIGUEZ CORONADO
UNIFEI

participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

LUCAS PAMPLONA CARDOZO COSTA

NASCIMENTO	21.03.1990 – Rio de Janeiro / RJ
FILIAÇÃO	Francisco de Assis Costa Simone Pamplona Cardozo Costa
2009/2016	Curso de Graduação Engenharia Mecânica- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista

Em memória a Nilce Martins Costa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Luz Silveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna, por todo apoio, orientação, auxílio dado e oportunidade de realizar esse trabalho.

À minha família, em especial a meu pai Francisco de Assis Costa e a minha mãe Simone Pamplona Cardozo Costa, pela vida, pelo apoio irrestrito, incentivo e força necessária, e aos meus irmãos Renato e Bruno pela amizade eterna.

Aos meus colegas de laboratório, Lucas, Raul, Victor e Lúcia, por todo o auxílio, paciência e sabedoria, me fazendo crescer profissionalmente no ramo acadêmico.

A todos que de alguma forma me ajudaram, com um incentivo, um ensinamento ou uma oportunidade.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, pelo trabalho para manter a excelência na pesquisa nacional.

A minha amada Kênya Caroline Barbosa Stanco.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

“Seja o melhor.
Mesmo que você seja um vendedor de sorvete,
seja o melhor vendedor de sorvete!”

- Nilce Martins Costa

RESUMO

A geração descentralizada de energia têm sido ampliada no Brasil, e em futuro próximo, na era do hidrogênio, o país pode ser classificado em situação favorável quanto ao potencial de produção de hidrogênio verde. Neste trabalho é estudado uma planta híbrida de produção de energia e hidrogênio verde instalada no IPBEN-UNESP/LOSE, Laboratório Associado de Guaratinguetá e Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos . Inicialmente são caracterizados os componentes do sistema híbrido de produção de hidrogênio, baseando-se em dados do projeto universal intitulado “Produção de Hidrogênio Renovável: Aspectos Técnicos, Econômicos e Ambientais”. Em fase posterior são efetuadas análises energéticas do sistema e de cada unidade individualmente, de modo a determinar níveis de eficiência de produção de energia elétrica e de produção de hidrogênio verde no sistema. A seguir, estudos de engenharia econômica são efetuados de modo a alocar os custos da produção de eletricidade e hidrogênio verde do sistema, em US\$/kWh, em função de fatores diversos. Em fase final, é efetuada análise ambiental da produção de hidrogênio verde, visando determinar o impacto ambiental do sistema híbrido. Conclui-se com performance energética, econômica e ambiental do sistema híbrido descentralizado de produção de eletricidade e hidrogênio.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio verde; Análise Energética; Análise Econômica; Análise Ambiental; Energia Solar Fotovoltaica; Energia Eólica.

ABSTRACT

Decentralized energy generation has been expanded in Brazil, and in near future, in the hydrogen era, the country can be classified in a favorable situation regarding the potential for green hydrogen production. In this work, a hybrid energy and green hydrogen production plant installed at IPBEN – UNESP/GOSE, Associated Guaratinguetá's Laboratory and Energy Systems Optimization Group's laboratories, is studied. Initially, the hybrid hydrogen production components system are characterized, based on data and in accordance with the universal project entitled "Renewable Hydrogen Production: Technical, Economic and Environmental Aspects". In the subsequent phase, system energy analyzes and of each unit are carried out individually, in order to determine efficiency levels in electric energy production and green hydrogen production in the system. Then, economic engineering studies are carried out in order to allocate the system production costs and the green hydrogen costs, in US\$/kWh, depending on several factors. In the final phase, an environmental green hydrogen production analysis is carried out, aiming to determine the environmental hybrid hydrogen production system impact. It concludes with energetic, economic and environmental performance of the decentralized hybrid system for electricity production and hydrogen production.

KEYWORDS: Green Hydrogen; Energetic Aspects; Economic Aspects; Environmental Aspects; Photovoltaic Energy; Wind Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa solar diário no Brasil.....	24
Figura 2: Ângulos de incidência do sol no módulo solar	25
Figura 3: Turbina eólica eixo horizontal e eixo vertical.....	33
Figura 4: Tipos de turbinas eólicas de eixo vertical	34
Figura 5: Esquema da classificação de hidrogênio por cor	36
Figura 6: Opções de produção de hidrogênio por energia elétrica	37
Figura 7: Ciclo de produção de distribuição de hidrogênio verde.....	38
Figura 8: Configuração de um processo de eletrólise.....	39
Figura 9: Eletrolisador unipolar.....	41
Figura 10: Eletrolisador bipolar.....	42
Figura 11: Esquema de eletrólise a partir de energia solar.....	44
Figura 12: Esquema de eletrólise a partir de energia eólica	45
Figura 13: Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio Verde.....	48
Figura 14: Garagem solar do IPBEN- Guaratinguetá.....	50
Figura 15: Torre eólica de 2 kW IPBEN – Guaratinguetá	51
Figura 16 - Curva de potência do Inversor da turbina eólica	52
Figura 17: Eletrolisador IPBEN – Guaratinguetá.....	54
Figura 18: Diagrama esquemático dos componentes do eletrolisador.	54
Figura 19: Célula a combustível de 1 kW	55
Figura 20: Gráfico de geração de energia elétrica a partir de fonte solar, comparação anual..	59
Figura 21: Gráfico de geração de energia elétrica a partir de fonte solar mensal	60
Figura 22: Gráfico de densidade de velocidade pela distribuição de Weibull	62
Figura 23: Energia elétrica gerada em 1 ano	63
Figura 24: Curva de custo de geração solar.....	73
Figura 25: Custo do hidrogênio verde solar	74
Figura 26: Curva de custo de geração eólica.....	76
Figura 27: Custo do hidrogênio verde eólico	77
Figura 28: Curva de payback do sistema de geração de hidrogênio verde solar.....	78
Figura 29: Curva de payback do sistema de geração de energia eólica	78
Figura 30: Variação do custo de hidrogênio solar pelo rendimento do eletrolisador.....	79
Figura 31 - Variação do custo de hidrogênio eólico pelo rendimento do eletrolisador.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos do painel solar Canadian Solar 330 Wp, por 1000 W/m ²	49
Tabela 2: Dados específicos do aerogerador vertical de 2 kW	52
Tabela 3: Características do eletrolisador QL-2000	53
Tabela 4: Características da célula combustível HYFC 1 kW	55
Tabela 5: Geração solar mensal teórica	57
Tabela 6: Geração de energia elétrica de fonte solar mensal 2020 e 2021	58
Tabela 7: Dados do mapa de ventos da cidade de Guaratinguetá a 50 m de altura.....	60
Tabela 8: Resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull a 12 m em Guaratinguetá...	61
Tabela 9: Parâmetros calculados a partir da produção de energia solar de janeiro de 2020 até dezembro de 2021	64
Tabela 10: Parâmetros calculados a partir da produção de energia eólica de janeiro de 2020 até dezembro de 2021	65
Tabela 11: Vazões volumétricas de hidrogênio total e parciais	66
Tabela 12: Energia gerada pela célula a combustível em cada processo	67
Tabela 13: Taxa elétrica e parâmetros	72
Tabela 14: Valores dos equipamentos dos sistemas.....	72
Tabela 15: Parâmetros para determinação de custo de geração de energia elétrica solar	73
Tabela 16: Parâmetros para cálculo de custo de hidrogênio verde solar.....	74
Tabela 17: Parâmetros para determinação de custo de geração de energia elétrica eólica	75
Tabela 18: Parâmetros para cálculo de custo de hidrogênio verde eólico.....	76
Tabela 19: Potencial de Aquecimento Global	83
Tabela 20: Eficiência total e Eficiência ecológica de cada sistema	84
Tabela 21: Constantes mensais A_m , B_m e C_m	96

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
ENEL	Entidade Nacional de Eletricidade
HAWT	Turbina eólica de eixo horizontal
IPBEN	Instituto de Pesquisa em BioEnergia
Lab	Laboratório
Ltd	Limitada
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCI	Poder Calorífico Inferior
REPowerEU	Potencial de Energia Renovável das Nações Unidas
SAEG	Serviço de Água e Esgoto de Guaratinguetá
SHPH	Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio
VAWT	Turbina eólica de eixo vertical

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área	m ²
A _{fV}	Área do painel fotovoltaico	m ²
a _{CS}	Ângulo de incidência da radiância circunsolar	°
A _{fV}	Área de painéis fotovoltaico	-
b _{CS}	Ângulos de incidência da radiância horizontal	°
c	Parâmetro de escala	m/s
c _e	Condições de contorno	-
C _{ge}	Custo de geração de energia elétrica em uma planta	US\$/kWh
C _{H2}	Custo de produção de hidrogênio	US\$/kWh
C _{man}	Custo de manutenção	US\$/kWh
CO ₂	Gás carbônico	-
C _{ope}	Custo de operação	US\$/kWh
C _{Ope H2}	Custo operacional do eletrolisador para produção de H ₂	US\$/kWh
C _p	Coefficiente de potência	-
dm	Diferencial de massa	kg
dt	Diferencial de tempo	s
dx	Diferencial de espaço	m
e ⁻	Elétron	-
Ė _{el}	Potência fornecida pelo eletrolisador	kW
Ė _{total}	Potência total fornecida pelo sistema	kW
E _{el eólica}	Energia elétrica eólica	kWh
E _{el solar}	Energia elétrica solar	kWh
E _{eólica}	Energia eólica	kWh
Ė _{H2}	Potência suprida no hidrogênio em 1 ano	kW
Ė _{total}	Potência total fornecida	kW
F	Função da frequência de weibull	-
f	Fator de anuidade	1/ano
F1	Parâmetro calculado	-
F2	Parâmetro calculado	-

f_{conv}	Fator de conversão de real para dólar	US\$/R\$
g	Aceleração da gravidade no local	N/kg
G_B	Radiância normal direta	kW/m ²
G_D	Radiância horizontal difusa	kW/m ²
G_{fv}	Radiância no painel fotovoltaico	kW/m ²
G_{H2}	Rendimento anula esperado	US\$/ano
G_{MI}	Radiância horizontal global	kW/m ²
G_{TB}	Radiância direta	kW/m ²
G_{TD}	Radiância indireta	kW/m ²
G_{TG}	Radiância refletida	kW/m ²
H	Período de operação da planta	h/ano
H^+	Íon hidrogênio	-
h_1	Altura de referência do vento	m
h_2	Altura de referência do rotor	m
H_2	Gás hidrogênio	-
H_2O	Água	-
h_e	Entalpia de entrada	J/kg
h_s	Entalpia de saída	J/kg
Inv	Investimento da planta	US\$
k	Parâmetro de forma	-
ka	Período de amortização	ano
m_e	Massa que entra no sistema	kg/s
m_{H2}	Massa de hidrogênio	kg
\dot{m}_{H2}	Vazão mássica de hidrogênio	kg/h
$m_{H2\ eólica}$	Massa de hidrogênio eólico produzida em 2 anos	kg
$m_{H2\ solar}$	Massa de hidrogênio solar produzida em 2 anos	kg
$m_{H2\ total}$	Massa de hidrogênio total produzida em 2 anos	kg
\dot{m}_{H2O}	Vazão mássica de água	kg/s
m_s	Massa que sai do sistema	kg/s
nw	Expoente de correção de fator de forma	-
n	Expoente de condição de contorno	-
N_{fv}	Número de painéis fotovoltaicos	-
O_2	Gás oxigênio	-

O^{2-}	Íon oxigênio	-
$P_{\%weibull}$	Probabilidade percentual de weibull	%
P_{elet}	Potência elétrica requerida pelo eletrolisador	kW
P_{fv}	Potência do painel fotovoltaico	kW/m ²
$P_{sistema}$	Potência do sistema	kW
PCI_{H_2}	Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio	kW/kg
\dot{Q}_{H_2}	Vazão volumétrica de hidrogênio	m ³ /h
$\dot{Q}_{H_2\ eolico}$	Vazão volumétrica de hidrogênio eólico	m ³ /h
$\dot{Q}_{H_2\ solar}$	Vazão volumétrica de hidrogênio solar	m ³ /h
$\dot{Q}_{H_2\ total}$	Vazão volumétrica de hidrogênio total	m ³ /h
$\dot{Q}_{v.c.}$	Calor no volume de controle	W
r	Taxa anual de juros	%
T_{conc}	Tarifa da concessionária de energia sem impostos	US\$/kWh
T_{elet}	Custo da energia elétrica da concessionária	US\$/kWh
T_{fv}	Temperatura do painel	°C
T_{H_2}	Preço do hidrogênio comercial	US\$/kg
T_{H_2O}	Preço da água da concessionária	US\$/m ³
T_{ref}	Temperatura de referência	°C
v	Velocidade do vento	m/s
v_e	Velocidade de entrada da massa	m/s
v_m	Velocidade média do vento	m/s
v_s	Velocidade de saída da massa	m/s
$W_{el\ CAC}$	Trabalho elétrica da célula a combustível	kJ/kg
W_{eolica}	Potência eólica	kW
\dot{W}_{mec}	Potência mecânica	W
$W_{nominal}$	Potência nominal do aerogerador	kW
$\dot{W}_{v.c.}$	Potência no volume de controle	W
y	Anos de produção	anos
Z_e	Altura do ponto em relação ao referencial na entrada	m
Z_s	Altura do ponto em relação ao referencial na saída	m
α	Expoente de correção de velocidade média	-
β	Inclinação do coletor	°

β_{fv}	Coeficiente de temperatura da eficiência	$1/^{\circ}\text{C}$
γ	Ângulo azimute	$^{\circ}$
δ	Ângulo zenital	$^{\circ}$
δw	Desvio padrão da velocidade do vento	m/s
ΔG	Varição da energia livre de gibbs	kJ/kg
ΔH	Varição da entalpia	kJ/kg
ΔH°	Varição de entalpia de formação	kJ/kg
ΔS°	Varição de entropia de formação	J/K.Mol
ϵ	Número de Euler	-
ε	Eficiência ecológica	-
η	Rendimento do processo de produção de hidrogênio	-
η_{CAC}	Rendimento da célula a combustível	-
$\eta_{eletrol}$	Rendimento do eletrolisador	-
η_{etetr}	Rendimento do eletrolisador	-
η_{fonte}	Rendimento de geração da energia elétrica	-
η_{fv}	Rendimento do painel fotovoltaico	-
$\eta_{fv \text{ teorico}}$	Rendimento do painel fotovoltaico teórico	-
η_{rpf}	Eficiência de referência	-
η_{sp}	Eficiência do sistema	-
θ	Ângulo zenital	$^{\circ}$
θ_h	ângulo formado entre os raios solares e a normal do plano do coletor	$^{\circ}$
π	Indicador de poluição	kgCO_2/MJ
ρ	Massa específica	kg/m^3
ρ_{H2}	Massa específica do hidrogênio	kg/m^3
ρ_g	Refletância do solo	kW/m^2

LISTA DE SUBSCRITOS

CAC	Célula a combustível
CONC	Concessionária
Conv	Conversão
e	Entrada
El	Elétrico
Elet	Eletrolisador
Eólica	Eólica
FV	Fotovoltaico
Ge	Geração
H2	Hidrogênio
m	Médio
man	Manutenção
mec	Mecânica
Ope	Operação
ref	Referência
s	Saída
Sistema	Sistema
Solar	Solar
Total	Total
VC	Volume de controle

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	ENERGIA SOLAR	23
2.1.1	Energia Potencial Sola.....	24
2.1.2	Princípios e células fotovoltaicos	27
2.2	ENERGIA EÓLICA	28
2.2.1	Energia Potencial Eólica	28
2.2.2	Distribuição de Frequência de Weibull	31
2.2.3	Geradores Eólicos de Eixo Vertical	33
2.3	HIDROGÊNIO.....	34
2.3.1	Produção de hidrogênio por eletrólise da água.....	38
2.3.2	Eletrolisadores	41
2.4	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	43
2.4.1	Produção de hidrogênio verde utilizando energia solar	44
2.4.2	Produção de hidrogênio verde utilizando energia eólica.....	45
2.5	CÉLULA A COMBUSTÍVEL	46
3	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (SHPH) DO IPBEN – GUARATINGUETÁ	48
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTÁICO	49
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA TORRE EÓLICA	50
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO ELETROLISADOR	53
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	55
4	ANÁLISE ENERGÉTICA	57
4.1	ANÁLISE ENERGÉTICA DA GERAÇÃO SOLAR	57
4.2	ANÁLISE ENERGÉTICA DA GERAÇÃO EÓLICA.....	60
4.3	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	63
4.4	ENERGIA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	66
5	ANÁLISE ECONÔMICA	68
5.1	CUSTO DA ELETRICIDADE	68

5.2	CUSTO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	69
5.3	TARIFAÇÃO NACIONAL	70
5.4	PAYBACK.....	71
5.5	CÁLCULOS ECONÔMICOS	71
5.5.1	Cálculo econômico da produção de hidrogênio verde solar.....	73
5.5.2	Cálculo econômico da produção de hidrogênio verde eólico.....	75
5.5.3	Cálculo do payback	77
5.5.4	Comparação da variação da eficiência do eletrolisador	79
6	ANÁLISE AMBIENTAL	81
6.1	CÁLCULO DE EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	83
7	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXO A – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE IRRADIÂNCIA TEÓRICA.....	95

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e dos padrões de vida foram as duas razões por trás da exigência do crescimento da demanda de energia global (ACAR, BESKESE, TEMUR, 2018), que a cada ano que passa cresce, desde a Revolução Industrial, onde os combustíveis fósseis têm sido usados intensivamente por toda a sociedade de uma forma geral (MOURA, SILVEIRA, LAMAS, 2020).

Países que precisando de um rápido crescimento econômico, como os países em desenvolvimento tendem a achar empecilhos com a diminuição de fontes fósseis de energia, com suas reservas limitadas e não homogêneas, e o aumento gradual do aquecimento global (SACRAMENTO et. al., 2008), fatores esses que levaram a atenção das pesquisas e estudos para as fontes e sistemas de energias alternativas, como as renováveis (ACAR, BESKESE, TEMUR, 2018). Tais preocupações levam ao aprofundamento em desenvolvimento de pesquisas e melhoramento de tecnologias relacionadas às energias renováveis, porém, o impacto do COVID-19 reverteu o acesso à eletricidade, ao mesmo tempo que retardou as melhorias vitais na eficiência energética, sendo que as energias renováveis têm demonstrado resiliência ao choque causado pela pandemia (IEA, 2022).

As energias renováveis desempenham um papel crucial na redução das emissões de carbono e combate a mudanças climáticas, particularmente eólica e solar (LIPONI, et. al, 2022), além da maleabilidade adaptativa às aplicações das fontes, podendo ser utilizada no formato de sistema híbrido de geração de energia, que consiste no uso de uma ou mais fonte de geração energia. A energia eólica pode ser empregada para fornecer energia limpa para eletrolisadores e gerar hidrogênio, tendo, desta forma, a viabilidade de fornecer um caminho para o uso de recursos energéticos domésticos para contribuir diretamente com a redução do efeito estufa e a substituição de combustíveis fósseis. (RODRÍGUEZ et at., 2010). A energia solar fotovoltaica pode ser gerar eletricidade apenas quando houver luz solar, porém, depende de outros fatores, como a cobertura de nuvens, a temperatura ambiente, entre outros, que tornam a geração de eletricidade descontinuada (RUIZ, 2016), fator que compromete a viabilidade de sistemas de energias renováveis em caso da não existência de um sistema de armazenamento de energia, como as baterias ou armazenamento químico (LIPONI, et. al, 2022).

A geração de hidrogênio a partir de recursos renováveis foi apontado como uma questão-chave a ser abordada no caminho para uma economia de hidrogênio limpo

(RODRÍGUEZ *et al.*, 2010). Hidrogênio é um meio de armazenamento de energia promissor com enormes vantagens, como transmissão e perdas de armazenamento mais baixa em comparação com a eletricidade (ACAR, BESKESE, TEMUR, 2018), sendo um vetor energético, que pode servir como reserva energética para balanceamento de sistemas renováveis, representando perspectiva de crescimento de confiabilidade e diminuição nas emissões de gases de efeito estufa. O hidrogênio derivado de energias renováveis acabará por contribuir para o desenvolvimento sustentável (SACRAMENTO *et. al.*, 2008).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é fazer uma análise comparativa entre a produção de hidrogênio verde solar e a produção de hidrogênio verde eólico, a partir do sistema híbrido instalado de IPBEN-UNESP-Lab. Associado de Guaratinguetá. Essa planta consta de sistemas solar e turbina eólica, associada a eletrolisador e célula a combustível com sistema de armazenamento de hidrogênio.

Como objetivos específicos, determina-se:

- Níveis de eficiências de um sistema híbrido instalado;
- Eficiência de geração de hidrogênio a partir de um painel fotovoltaico;
- Eficiência de geração de hidrogênio a partir de uma turbina eólica;
- Massa de hidrogênio gerada por cada sistema;
- Custos de geração de hidrogênio verde;
- Payback de cada sistema;
- Eficiência ecológica.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo é a introdução e os objetivos do trabalho realizado, mostrando também a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, abrangendo energia solar, energia eólica, a obtenção e classificação de hidrogênio e a utilização de célula a combustível.

No terceiro capítulo é apresentado o Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio (SHPH) do laboratório do IPBEN – Guaratinguetá, descrevendo cada aparelho que é utilizado no sistema, tal qual informações de cada um deles

No quarto capítulo é feita a análise energética do Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio (SHPH) do laboratório do IPBEN – Guaratinguetá, apresentado com dados estimados e dados obtidos por medição, resultando em parâmetros de geração de hidrogênio e energia de cada sistema

No quinto capítulo são demonstrados os panoramas econômicos sobre obtenção, produção de hidrogênio e payback de cada um dos sistemas.

No sexto capítulo são apresentadas as informações ecológicas e ambientais do estudo desenvolvido,

No sétimo capítulo são observadas as conclusões dos estudos realizados nessa dissertação e as propostas de estudos futuros

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo Sepulveda e Martinez (2016) cerca de 2,7 milhões de brasileiros não têm acesso à energia elétrica, além disso, milhares de brasileiros não estão ligados à rede elétrica. Por falta de acesso a rede elétrica, a utilização de motores a diesel acoplados a um gerador de corrente alternada para satisfazer as necessidades de energia é uma das soluções viáveis. Fontes renováveis de energia se tornam prioridade em pesquisa com o aumento da demanda energética mundial e a diminuição das fontes fósseis. Nesse capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos tópicos relativos às energias renováveis e o uso do hidrogênio como vetor energético.

2.1 ENERGIA SOLAR

A geração de energia pelo uso da fonte solar é a mais promissora na atualidade. Sua utilização como fonte alternativa de energia é inesgotável, podendo ser através de calor ou da energia luminosa, tendo baixos índices de poluição e um vasto campo de evolução de tecnologia (CRESESB, 2014).

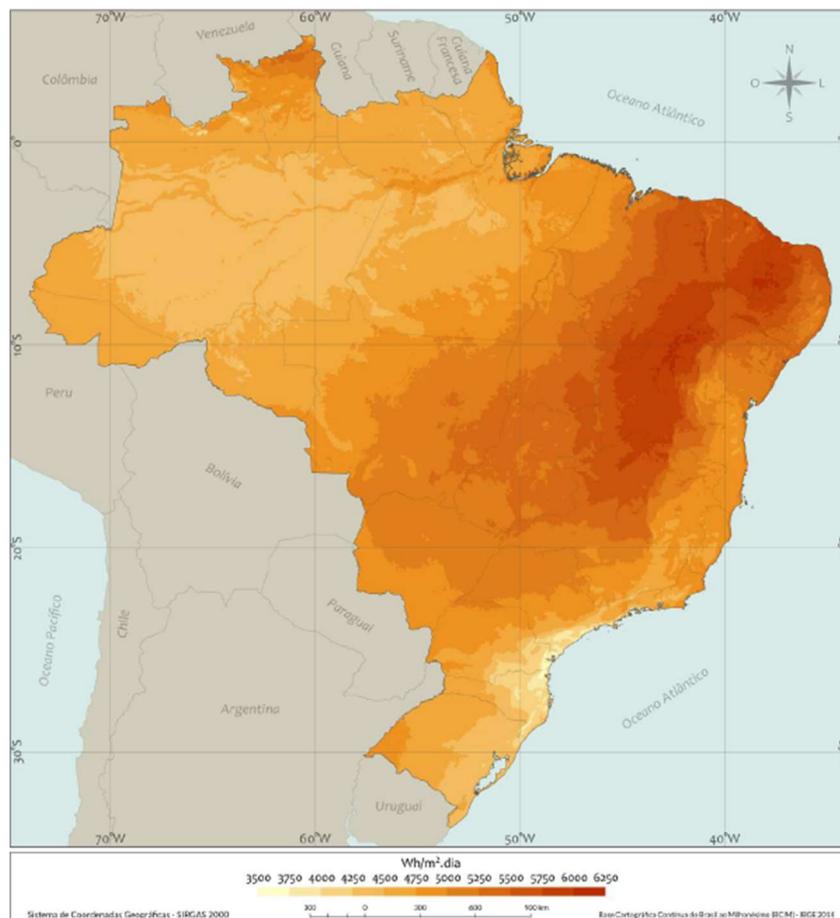
A captação dessa energia, para geração de energia elétrica, através da conversão de energia luminosa, é dada pelos painéis fotovoltaicos, que são compostos pela união de células fotovoltaicas que são pequenas placas de material semicondutor tratadas cuidadosamente para formar um campo elétrico, com um lado positivo (semicondutor tipo P) e o outro negativo (semicondutor tipo N). Os elétrons dos semicondutores são deslocados dos átomos do material quando os fótons da luz solar se chocam. Esse movimento de elétrons gera uma diferença de potenciais (KNIER, 2008). Uma única célula fotovoltaica gera uma potência entre 1-1,5 W, a uma tensão de 0,5 até 0,6 V, em parâmetros padrões de teste. As células fotovoltaicas são sempre associadas em série, sendo denominadas, dessa forma, de módulo fotovoltaico, obtendo níveis de tensão e corrente adequados à sua utilização (ROBERTS, 2012).

O desenvolvimento de periféricos e acessórios com qualidade e durabilidade similares aos do módulo solar são o grande desafio para o mercado da de energia solar (CRESESB, 2014), o que vem acontecendo paulatinamente.

2.1.1 Energia Potencial Solar

O potencial nacional de geração de energia solar fotovoltaica é bastante promissor, visto que território brasileiro existe uma radiância solar média de 900 W/m^2 . (SILVEIRA, 2020). A Figura 1 mostra a irradiância global horizontal diária no Brasil.

Figura 1: Mapa solar diário no Brasil.



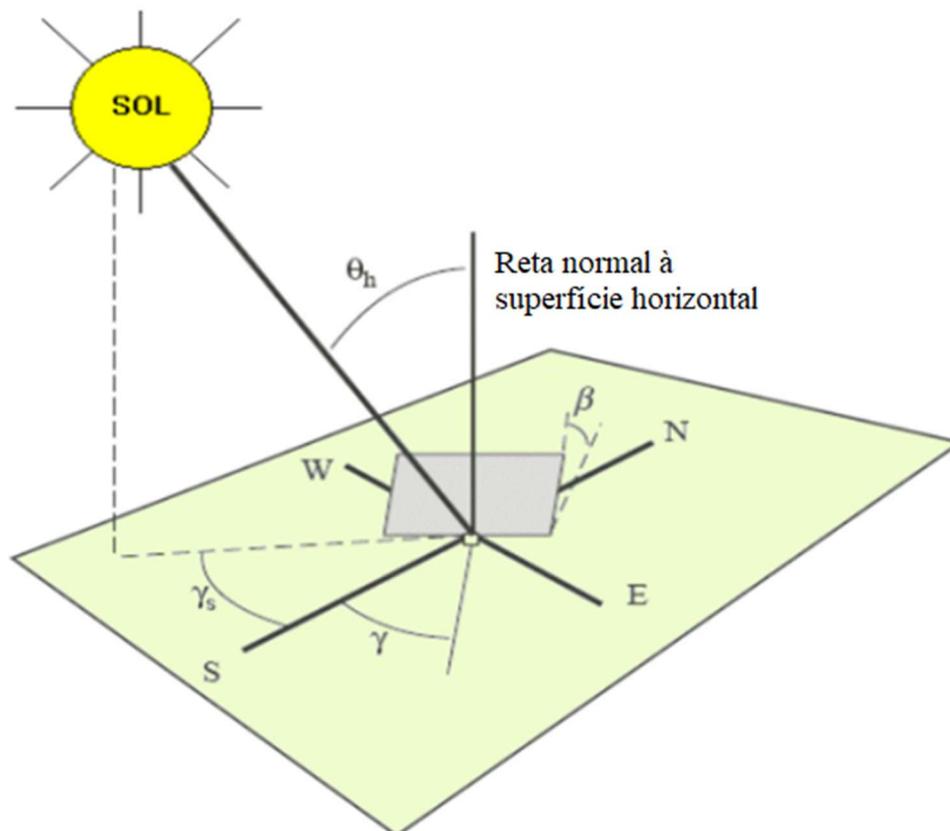
Fonte: PEREIRA (2017)

Para um melhor aproveitamento diário de uma energia intermitente, como a solar, é necessário o armazenamento da energia renovável, sendo geralmente utilizado bancos de baterias em períodos nos quais a radiância não pode ser aproveitada, o que aumenta o investimento no sistema (SILVEIRA, 2020) e tendo uma maior poluição do meio ambiente.

O aproveitamento da energia solar é maximizado com o cálculo de instalação e angulação do painel solar, sendo necessário que se oriente os módulos para o “norte verdadeiro” e a inclinação com a horizontal, que deve ser igual a latitude do local a ser instalado o módulo (ROBERTS, 2012). Os estudos apontam as técnicas de *machine learning* sendo adotadas para

previsão de irradiância solar, modelagem de energia fotovoltaica, rastreamento de ponto de máxima potência de capacidade de aprendizado e rápida convergência para se adaptar às mudanças do ambiente e incertezas do modelo (BAHGAT et. al., 2005), fazendo uma melhor captação dos recursos solares disponíveis. A configuração de ângulos de incidência pode ser vista na Figura 2.

Figura 2: Ângulos de incidência do sol no módulo solar



Fonte: ELETRÔNICA (2022)

Onde θ_h é o ângulo formado entre os raios solares e a normal do plano do coletor, β é a inclinação do coletor, γ é o azimute do coletor e θ é o ângulo zenital. Para a determinação radiância incidente no painel solar, Chen (2018) apud Campos e Silveira (2019) mostra que esta é uma composição de 3 irradiações, como mostra a equação 1.

$$G_{FV} = G_{TB} + G_{TD} + G_{TG} \quad (1)$$

Onde, G_{FV} é Irradiância incidente no plano do painel fotovoltaico (kW/m^2), G_{TB} é Irradiância direta (kW/m^2); G_{TD} é Irradiância difusa (kW/m^2) e G_{TG} é Irradiância refletida

(kW/m²). Para a determinação de cada um dos parâmetros avaliados, Chen (2018) demonstra as equações 2, 3 e 4.

$$G_{TB} = G_B \frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

$$G_{TD} = G_D \left[(1 - F1) \frac{1 + \cos \beta}{2} + F1 \frac{a_{CS}}{b_{CS}} + F2 \sin \beta \right] \quad (3)$$

$$G_{TG} = GHI \frac{(1 - \cos \beta) \rho_g}{2} \quad (4)$$

Sendo:

a_{CS} e b_{CS} - Ângulos de incidência da radiação circunsolar e horizontal ao painel fotovoltaico;

$F1$ e $F2$ - Parâmetros calculados, apresentado Anexo A (CHEN *et al.*, 2018);

G_B - Irradiância normal direta (kW/m²), calculada pela equação 5;

G_D - Irradiância horizontal difusa (kW/m²), como é mostrado a equação 6;

GHI - Irradiância horizontal global, conforme equação 7;

ρ_g - Refletância do solo, que será adotada como 0,2.

$$G_B = A_m e^{\frac{-B_m}{\cos \theta_z}} \quad (5)$$

$$G_D = C_m \times G_B \quad (6)$$

$$GHI = G_B \cos \theta_z + G_D \quad (7)$$

Onde A_m , B_m e C_m são parâmetros apresentados no Anexo A. A determinação da potência do conjunto fotovoltaico é dada pela equação 8 (ROBERTS, 2012).

$$P_{fv} = \eta_{fv} N_{fv} A_{fv} G_{fv} \quad (8)$$

Sendo:

A_{fv} - área do painel fotovoltaico;

N_{fv} - número de painéis fotovoltaicos;

η_{fv} - rendimento o painel fotovoltaico.

Roberts (2012) mostra que a temperatura tem influência no rendimento do painel, na equação 9.

$$\eta_{fv} = \eta_{rpf}\eta_{sp}[1 - \beta_{fv}(T_{fv} - T_{ref})] \quad (9)$$

Em que:

β_{fv} - coeficiente de temperatura da eficiência (1/°C);

η_{rpf} - eficiência de referência;

η_{sp} - eficiência do sistema;

T_{fv} - temperatura do painel (°C);

T_{ref} - temperatura de referência (25 °C).

2.1.2 Princípios e células fotovoltaicos

Uma célula fotovoltaica é a unidade essencial de um sistema de geração de energia solar no qual a luz solar é convertida em energia elétrica. O principal trabalho da célula solar é basicamente o efeito fotovoltaico, que pode ser dividido em três procedimentos essenciais (SMITH *et al.*, 2018):

Absorção de fótons em um semicondutor eletrônico de junção p-n para gerar os portadores de carga. A absorção de um fóton com energia maior que a do salto energético do material semicondutor dopado significa que sua energia é usada para excitar um elétron da banda de valência para a banda de condução, deixando um buraco no nível de valência. A energia cinética adicional é dada ao elétron ou buraco pelo excesso de energia do fóton. O excesso de energia é dissipado como calor no semicondutor (SHARMA; MEHRA; RAJ, 2021).

Separação dos portadores de carga gerados pela luz. Em um circuito solar externo, os buracos podem fluir para longe da junção através da região p, e os elétrons podem fluir através da região n e passar pelo circuito antes de se recombinarem com os buracos. Finalmente, a separação dos elétrons pode ser usada em um driver de circuito elétrico. Depois dos elétrons passados pelo circuito, eles se recombinam com os buracos (FLOYD, 2011).

Os painéis solares são várias células solares conectadas em série e paralelo para produzir uma determinada potência de saída. Uma célula fotovoltaica é inviável para a maioria das aplicações, pois só pode produzir cerca de 0,5V. As células em série também são conectadas

em paralelo para maior capacidade de corrente. Um sistema fotovoltaico é composto por um painel solar, supercapacitor e inversor. O painel solar absorve a energia do fóton e a transforma em eletricidade, através do mecanismo fotovoltaico. O supercapacitor é usado para fornecer energia adicional apenas em dias ensolarados. A energia em corrente contínua é transformada em cargas de corrente alternada para ser apropriada para uso doméstico (AREFEEN; DALLAS, 2021).

2.2 ENERGIA EÓLICA

O aquecimento irregular das massas de ar e da superfície terrestre geram o deslocamento de ar comumente conhecido como vento. Essa energia cinética é denominada como energia eólica (CRESESB, 2008), podendo ser utilizada de diversas maneiras, como movimento de veículos e secagem de objetos, tendo uma aplicação também na movimentação de moinhos. Para a produção direta de eletricidade, a primeira turbina eólica surge no fim do século XIX (GIPE, 2004).

Por ser uma fonte de energia renovável, é dada como uma solução para fornecimento de energia, tendo um custo competitivo com combustíveis convencionais, como fóssil ou nuclear, dependendo da localidade e condições de instalação (SHERIF; BARBIR; VERIZOGLU, 2005).

2.2.1 Energia Potencial Eólica

Segundo a equação de conservação de massa é definido que a vazão mássica em um volume de controle como sendo uma relação entre área de secção transversal em um diferencial de distância em um diferencial de tempo, conforme equação 10, 11 e 12.

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (12)$$

Para tanto:

A - área de secção transversal [m²];

dx/dt - velocidade [m/s]

ρ - Massa específica [kg/m³].

Com isso, é possível evidenciar a definição de Energia Mecânica na equação 13, podendo concluir a equação 14.

$$\dot{W}_{\text{mec}} = \frac{dm}{2 \cdot dt} \cdot v^2 \quad (13)$$

$$\dot{W}_{\text{mec}} = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot v^3 \quad (14)$$

Segundo Roberts e Prado (2011), um parâmetro de comparação universal é a relação da potência por área, o que permite melhor comparação entre locais mostrado na equação 15.

$$\frac{\dot{W}_{\text{mec}}}{A} = \frac{\rho}{2} \cdot v^3 \quad (15)$$

Não obstante a definição de energia mecânica, a definição da 1ª Lei da Termodinâmica pode ser representada pela equação 16 (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2017).

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \times \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right) = \sum \dot{m}_s \times \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right) + \dot{W}_{v.c.} \quad (16)$$

Sendo:

g - Aceleração da gravidade no local [m/s²];

h_e - entalpia de entrada [J/kg];

h_s - entalpia de saída [J/kg];

m_e - massa que entra no sistema [kg/s];

m_s - massa que sai do sistema [kg/s];

$\dot{Q}_{v.c.}$ - Calor no volume de controle [W];

v_e - velocidade de entrada da massa [m/s];

v_s - velocidade de saída da massa [m/s];

$\dot{W}_{v.c.}$ - Potência extraída do rotor;

Z_e - altura do ponto em relação ao referencial na entrada [m];

Z_s - altura do ponto em relação ao referencial na saída [m].

Considerando o volume de controle feito em um aerogerador, a entalpia de entrada é muito próxima entalpia de saída ($h_e = h_s$), a altura média de entrada é muito próxima à altura média de saída ($Z_e = Z_s$), o calor produzido é muito pequeno ($\dot{Q}_{v.c.} = 0$) e, pela equação de continuidade, a vazão mássica da entrada é igual a vazão mássica de saída, como mostrado na equação 17, tendo como consequência a equação 18, que evidencia a potência obtida em um volume de controle descrito.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s = \dot{m} \quad (17)$$

$$\dot{W}_{v.c.} = \frac{\dot{m}}{2} \cdot (v_e^2 - v_s^2) \quad (18)$$

Em um aerogerador, de uma maneira geral, a velocidade do vento de entrada é maior que a velocidade do vento de saída, tendo uma variação no plano do rotor. Para tanto, a consideração da velocidade média nessa altura é usada no cálculo do fluxo mássico, como mostrado na equação 19. Considerando as equações 14 e 19 e após processos algébricos, é possível determinar a equação 20.

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{v_e + v_s}{2} \quad (19)$$

$$\dot{W}_{v.c.} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{(1 - \frac{v_s}{v_e}) [1 - (\frac{v_s}{v_e})^2]}{2} \quad (20)$$

Assim, a potência de um aerogerador é dada em função da razão das velocidades do vento de entrada e de saída. Por uma simplificação, o último termo da equação 20 será dada por um coeficiente de potência, C_p , resultando de forma final na equação 21.

$$\dot{W}_{v.c.} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (21)$$

Existe um limite físico para a quantidade de energia extraída do vento. Em um processo de fluxo através da redução de energia cinética e conseqüentemente do vento, tendo um limite máximo teórico de velocidade de saída do vento da turbina nulo. Este princípio indica que a eficiência da turbina na pode passar de 59,3%, sendo comumente chamado de máximo $C_p = 0,593$ ou limite de Betz. Toda teoria de Betz assume velocidade linear constante, portanto, quaisquer forças rotacionais, turbulência causada por arrasto ou desprendimento de vórtice reduzirão a máxima eficiência (REHMAN et. al, 2023)

2.2.2 Distribuição de Frequência de Weibull

Um estudo minucioso para instalar um sistema de geração energia eólica é necessário visto que a determinação dos parâmetros que baseiam o potencial eólico são diversos. A estimativa de vento e avaliação da energia eólica foram realizadas em muitos países ao longo do tempo (KHOULOU; TAHAR; HICHEM, 2022). Ruiz (2016) define que a velocidade do vento varia, sendo necessário o conhecimento da frequência de velocidades para uma melhor estimativa, com a distribuição de frequências de Weibull. A literatura ainda cita métodos de distribuição de frequência como o de Rayleigh, porém, segundo Khoulood, Tahar e Hichem (2022) o modelo de Weibull é o que mais se aproxima da realidade, mostrando em seu estudo as equações e uso da distribuição de frequência de Weibull. A função da velocidade de Weibull é mostrada na equação 22.

$$F(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (22)$$

Em que:

c - parâmetro de escala [m/s];

k - parâmetro de forma;

v - velocidade do vento [m/s].

Os parâmetros k e c podem ser calculados como nas equações 23 e 24 (MOHSIN; RASHEED; SAIDUR, 2018). Para o cálculo do parâmetro c é necessária a equação 25.

$$k = \frac{\delta w^{-1,086}}{v_m} \quad (23)$$

$$c = \frac{v_m}{y \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (24)$$

$$y(m) = \int_0^{\infty} \epsilon^{m-1} \exp(-\epsilon) d\epsilon \quad (25)$$

Tais que:

m - Massa [kg];

v_m - Velocidade média do vento [m/s];

y - Função mostrada na equação 25;

δw - Desvio padrão da velocidade [m/s],

ϵ - Número de Euler.

Tais coeficientes podem também ser calculados por parâmetros de referência, extrapolando os dados através de uma altura desejada, conforme Equações de 26 a 27.

$$\frac{c_1}{c_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{nw} \quad (26)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{1-0,088.\ln(h_1/10)}{1-0,088.\ln(h_2/10)} \quad (27)$$

A equação 28 é a variação da velocidade conforme a mudança de altura. Para tal, é dada uma velocidade e uma altura de referência do local, podendo estimar a velocidade de vento em qualquer altura. Os coeficientes α e nw variam conforme altura e fator de forma, como mostrado nas equações 29 e 30.

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\alpha} \quad (28)$$

$$nw = \frac{0,37-0,088.\ln(c_1)}{1-0,088.\ln(h_2/10)} \quad (29)$$

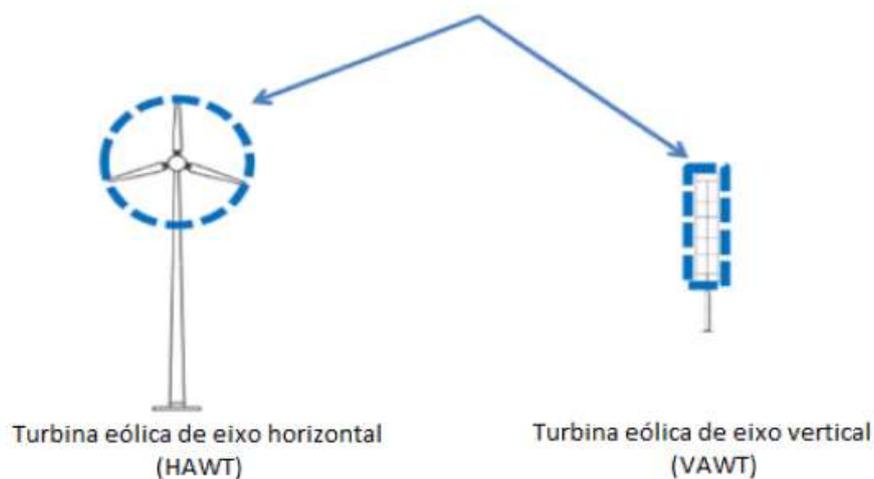
$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \cdot \ln(v_1)}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)} \quad (30)$$

Sendo k_1 , c_1 e v_1 os parâmetros fornecidos a uma certa altura h_1 e k_2 , c_2 e v_2 os parâmetros a serem determinados a uma certa altura h_2 . Ao determinar os gráficos da Função de Probabilidade de Weibull, Ruiz (2016) determinou a porcentagem de tempo de geração de energia elétrica a partir de um gerador eólico, limitando à sua velocidade mínima e máxima na distribuição, definindo o aproveitamento do vento. Mohsin, Rasheed e Saidur (2018) mostraram que a potência total fornecida por um aerogerador pode ser aproximada pela área dada no gráfico da distribuição de Weibull, integrando-a.

2.2.3 Geradores Eólicos de Eixo Vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical são caracterizadas por terem a rotação do eixo na posição perpendicular ao solo. Este tipo de turbina eólica gera até 50% mais eletricidade no ano em comparação com os aerogeradores convencionais com a mesma área transversal do rotor, sendo adequadas para aplicações de pequena escala (RUIZ, 2016).

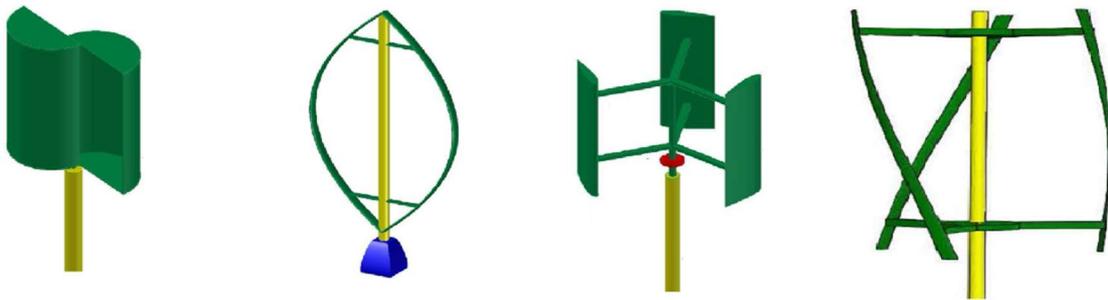
Figura 3: Turbina eólica eixo horizontal e eixo vertical



Fonte: RUIZ (2016)

As turbinas eólicas de eixo vertical são classificadas em 2 grandes categorias baseando-se na força de acionamento das pás do rotor: Savonius VAWT e Darrieus VAWT. Estudos mostram que as Savonius são menos eficientes que as Darrieus. A Figura 4 exemplifica os diversos modelos de turbinas eólicas (PENG; LIUS; YANG, 2021).

Figura 4: Tipos de turbinas eólicas de eixo vertical



Fonte: PENG, LIUS, YANG (2021)

Na Figura 4 é possível ver, da esquerda para a direita, uma turbina Savonius, uma turbina Darrieus tipo batedor de ovo, uma turbina Darrieus do tipo H e uma turbina Darrieus do tipo helicoidal (PENG; LIUS; YANG, 2021).

2.3 HIDROGÊNIO

Estudos sobre modelos de obtenção do hidrogênio são amplamente discutidos, visando as formas de obtenção, energia utilizada, armazenamento, transporte e eficiência do processo. (ROBERTS, 2012). A alta demanda energética necessária nas atividades industriais, comerciais e residenciais ampliam a pesquisa por fontes de energia, sobretudo as de baixa poluição ambiental e gases de efeito estufa, dentre as elas, as mais implementadas atualmente são a energia eólica e solar fotovoltaica (RUIZ, 2016), porém sua intermitência faz necessária uma forma de armazenamento da mesma.

Como o hidrogênio é depende de uma fonte geradora de energia para ser produzido, ele pode servir como armazenador de energia ou vetor energético (SRINIVASAN; OGDEN, 2006), regenerando eletricidade quando a demanda de energia é maior, tornando assim a inserção da energia renovável na rede mais confiável (LIPONI, et. al, 2022), tornando o potencial de fontes de energia mais concretos e com maior aceitação no mercado e na economia. (KNOB, 2013).

Como combustível químico, o hidrogênio pode ser facilmente integrado à rede de distribuição e utilização de combustíveis já existentes com ajustes mínimos. Além disso, o hidrogênio pode ser usado em células combustíveis ou motores de combustão interna para gerar eletricidade com emissões nocivas ao meio ambiente minimizadas ou até nulas (ACAR, BESKESE, TEMUR, 2018), visto que a emissão final do processo é apenas vapor de água, diminuindo o impacto ecológico do sistema de geração. (SILVA, 1991).

O hidrogênio pode ser encontrado na natureza ligado a inúmeras substâncias. Por esta razão, existem várias fontes de hidrogênio, como água, hidrocarbonetos e resíduos. Atualmente os dois produtores de hidrogênio mais comuns métodos são a reforma a vapor, na qual o calor e o vapor de água são usados para separar o metano em hidrogênio e carbono, e eletrólise, onde a eletricidade é usada para quebrar as moléculas de água (IEA, 2021).

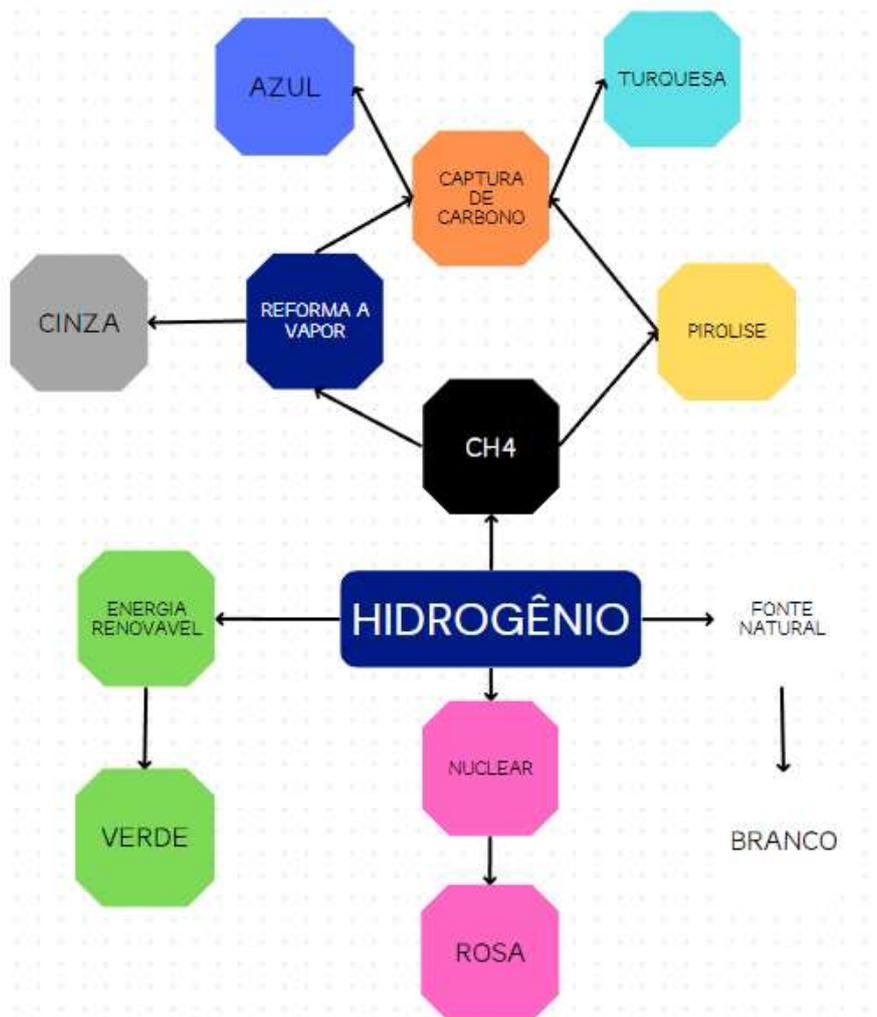
Recentemente muitos códigos de cores foram criados para distinguir as diferentes fontes primárias de energia usadas para produzir hidrogênio (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022). A literatura nem sempre é clara na definição de todas as cores, porém algumas fontes de energia já têm mais recorrência de padronização.

Quando a principal fonte de energia são os combustíveis fósseis, são recorrentes 3 classificações de hidrogênio. Cinza é o que tem como fonte primária de energia os combustíveis fósseis, principalmente metano, através do método de reforma a vapor, onde água e calor são usados. Atualmente, representa a maior quantidade de hidrogênio produzido no mundo (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022), tendo uma faixa de emissão de gases de efeito estufa entre 10,9 e 18,4 kgCO₂/kgH₂ (HOWARTH; JACOBSON, 2021). A classificação azul para hidrogênio é adotada quando o combustível fóssil é usado, porém é realizada a técnica de captura e estocagem de carbono, fazendo assim uma drástica redução de emissões, que varia de 4,54 a 8,20 kgCO₂/kgH₂ conforme a técnica de captura utilizada (HOWARTH; JACOBSON, 2021). Assim como as anteriores, a classificação turquesa também usa o metano como fonte de energia, porém se diferencia pelo processo de pirólise do metano ao invés da reforma a vapor. Os processos considerados para pirólise são: decomposições térmicas, de plasma e catalíticas (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

O hidrogênio branco é definido por Boretti (2021) como o produzido por água e divisão termoquímica solar, sendo uma tecnologia que explora a energia solar e água, ambos renováveis. Também é definido como branco o hidrogênio retirado de fontes geologicamente naturais. A classificação rosa mostra que o uso de energia nuclear, tanto calor, eletricidade ou ambos, podem ser explorados para produzir hidrogênio através da eletrólise da água, ciclo

termoquímico ou híbrido. A emissão de gases de efeito estufa desse modo de produção de hidrogênio tem uma faixa de variação de 0,3 a 2,0 kgCO₂/kgH₂ (VALENTE; IRBARREN; DUFOUR, 2019).

Figura 5: Esquema da classificação de hidrogênio por cor



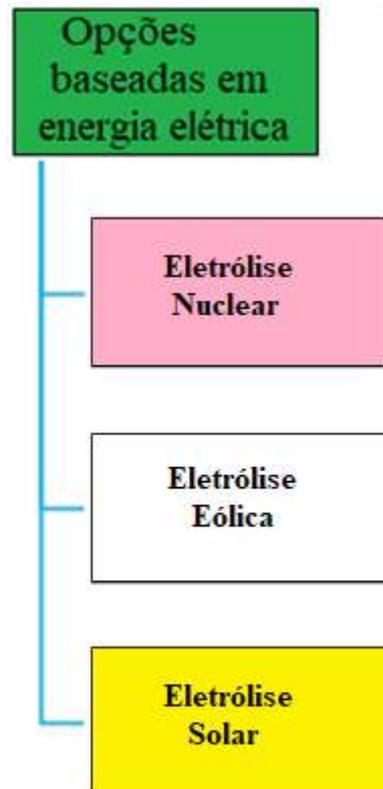
Fonte: Adaptado de Ajanovic, Sayer, Haas (2022); Howarth, Jacobson, (2021); Boretti, (2021)

O hidrogênio verde é uma das soluções de produção mais adequadas para enfrentar os gases de efeito estufa emitidos. Produzido pela eletrólise da água, o hidrogênio verde ainda tem como subproduto o oxigênio. A classificação verde é dada somente para uso de eletricidade com fontes renováveis de energia para alimentação dos eletrolisadores (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022). Apesar do processo de eletrólise não liberar carbono, a análise de ciclo de vida do hidrogênio verde tem emissões de 6,6 kgCO_{2eq}/kgH₂ (DUFOUR *et al.*, 2012). Para fontes

eólicas, uma baixa emissão foi estimada, se aproximando de $0,68 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kgH}_2$ para uma planta de hidrogênio (GHANDEHARIUN; KUMAR, 2016).

Acar, Beskese e Temur (2018) apresentam as formas de produção de hidrogênio, sendo as práticas de obtenção de hidrogênio por fonte elétrica mostradas na Figura 6.

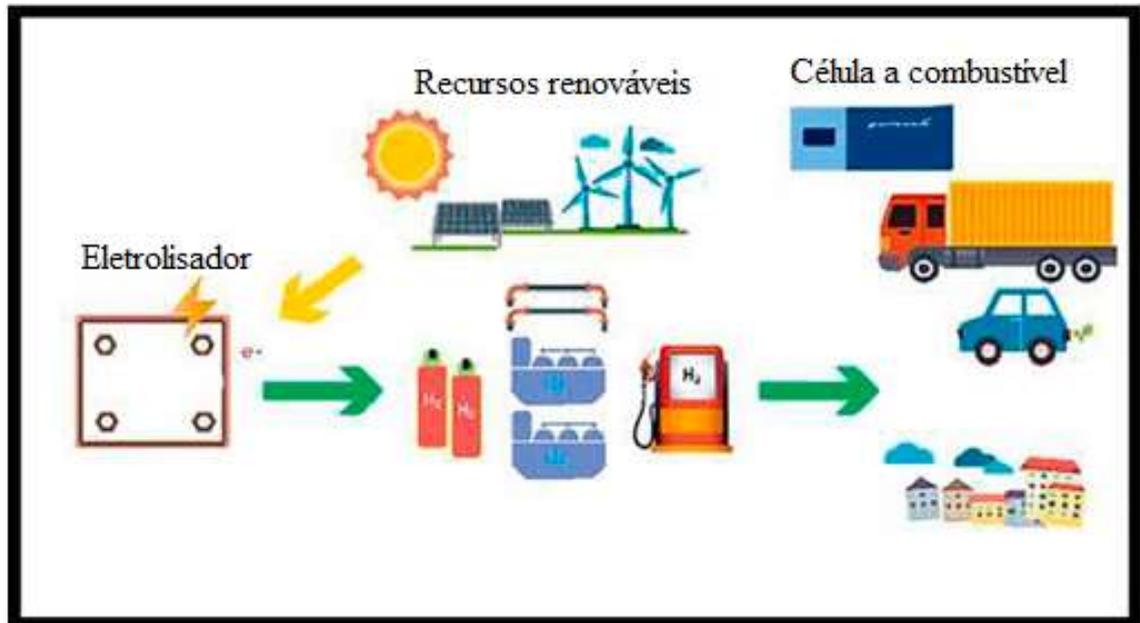
Figura 6: Opções de produção de hidrogênio por energia elétrica



Fonte: Adaptado de Acar, Beskese, Temur (2018)

Se feita com energia elétrica, a obtenção de hidrogênio é feita por base de eletrólise sendo baseadas solar ou eólica (hidrogênio verde) ou em energia nuclear (hidrogênio rosa). Produção eletrolítica é exemplificada pela eletrólise da água, se mostrando um processo de uso de corrente contínua para dissociação da água e captura do hidrogênio. Os fotolíticos são os processos de obtenção de hidrogênio através de energia luminosa, muito utilizada em processos biológicos e fotoquímicos (BRAGA, 2010). São usados recursos de origem fósseis ou renováveis para esse princípio. Xuan et. al (2022) esquematiza o ciclo da produção de hidrogênio verde, como observa-se na Figura 7.

Figura 7: Ciclo de produção de distribuição de hidrogênio verde



Fonte: Adaptado de Xuan et. al. (2022)

Os recursos renováveis geram energia com baixa emissão de carbono, sendo essa utilizada na produção de hidrogênio no eletrolisador. Uma vez obtido e armazenado o hidrogênio, ele pode ser utilizado para a geração de energia elétrica com uma célula a combustível ou comercializado e utilizado pela indústria de diversas maneiras diferentes.

2.3.1 Produção de hidrogênio por eletrólise da água

Eletrólise da água é uma reação endotérmica de rompimento não espontâneo das ligações da molécula de água até a temperatura de 1751,0 K, visto pela teoria da energia livre de Gibbs, conforme equação 31, geralmente forçada pela passagem de corrente elétrica, gerando hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), conforme reação mostrada nas equações 32, 32 e 33.

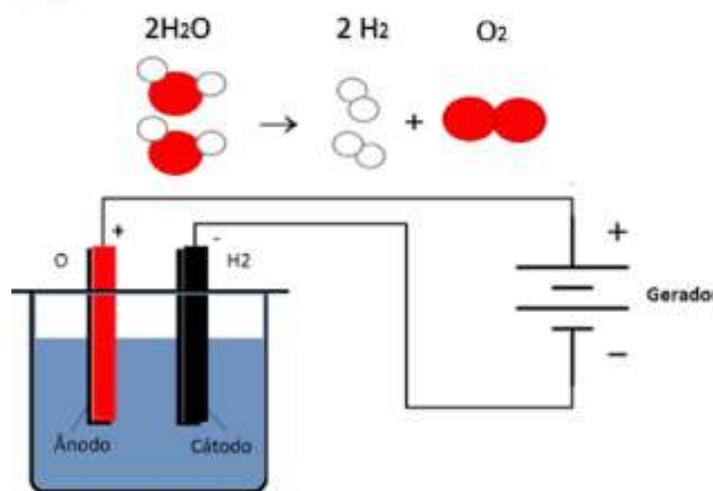
$$T \cdot \Delta S^\circ = \Delta H^\circ \quad (31)$$





Conforme equação 32, a eletrólise precisa de eletricidade e calor, tendo uma tensão de separação ideal de 1,23 V na temperatura ambiente, porém em valores reais a separação se dá com aproximadamente 1,48 V (SHIVA KUMAR E HIMABINDU, 2020). Como mostra na Figura 8, para que o processo de eletrólise ocorra, é necessária a passagem de uma corrente elétrica com um anodo, positivo, e um cátodo, negativo, para que possa haver captação de tais moléculas. As reações são realizadas em um eletrolisador, tendo dois eletrodos, um positivo, que será o ânodo e induzirá os íons O^{2-} , e um negativo, que será o cátodo e induzirá os íons H^+ .

Figura 8: Configuração de um processo de eletrólise



Fonte: Melo (2018)

Desde o século 18, as tecnologias de eletrólise da água estão sendo continuamente desenvolvidas e utilizadas em aplicações industriais, tendo sua evolução tecnológica evidente a cada desafio superado. O crescimento se deve ao desenvolvimento de quatro tipos de tecnologia da eletrólise da água foram desenvolvidas baseadas nos eletrólitos: Eletrólise alcalina, membrana de troca aniônica (AEM), PEM e óxido sólido. (SHIVA KUMAR E HIMABINDU, 2019).

A eletrólise alcalina foi desenvolvida a primeira vez no ano de 1789, mas somente em 1939, após avanços tecnológicos, a primeira planta industrial eletrolisadora de água alcalina de capacidade de 10 000 N.m³/h de hidrogênio entrou em operação (SANTOS; SEQUEIRA; FIGUEIREDO, 2013). Fazendo o uso de uma solução alcalina concentrada de 5M KOH/NaOH, a eletrólise alcalina trabalha em baixas temperaturas, entre 30° e 80°C (SHIVA KUMAR E

HIMABINDU, 2019), tendo um sistema favorável para aplicações de larga escala (SCHMIDT, 2017). No entanto, a eletrólise alcalina tem uma densidade de corrente limitada em cerca de 0,1 a 0,5 A/cm² devido a alta sensibilidade do KOH ao CO₂ ambiente, tendo a formação do sal K₂CO₃ (IRENA, 2020), gerando uma diminuição resultante no número de hidroxilas e condutividade iônica.

A eletrólise AEM é uma tecnologia em desenvolvimento que vem motivando organizações de pesquisa devido ao seu baixo custo e alta eficiência em comparação às outras tecnologias convencionais de eletrólise (WANG *et al.* 2021). A eletrólise da água AEM é semelhante a eletrólise alcalina convencional (MILLER *et al.*, 2020), porém faz uso de uma membrana aniônica ao invés do diafragma de amianto, o de uso convencional, tendo a vantagem de catalisadores de metais de transição mais econômicos ao invés de metais nobres, água destilada de baixa concentração de solução alcalina (1M KOH) ao invés de um eletrólito altamente concentrado (5M KOH) (HENKENSMEIER *et al.*, 2021). Porém, o processo não tem estabilidade e são necessárias melhorias em eficiências de equipamentos.

Idealizado por Grubbs e desenvolvida pela General Electric Co., a eletrólise PEM tem a mesma temperatura de trabalho da eletrólise alcalina, entre 30° e 80°C, porém tem uma densidade de corrente maior que a mesma, de 1 a 2 A/cm², e tendo uma pureza de gases de saída de 99,999% (SHIVA KUMAR E HIMABINDU, 2019). Semelhante a tecnologia de célula a combustível PEM, a membrana de polímero sulfonado pode ser usada como eletrólito, tendo o portador de carga H⁺ e água destilada permeando através da membrana condutora de prótons, fazendo a funcionalidade da reação química. Com isso, a área de ativa de superfície metálica da reação é muito maior que da eletrólise alcalina convencional, sendo também mais segura que a eletrólise alcalina devido ao uso de eletrólitos menos cáusticos (SCHMIDT *et al.*, 2017).

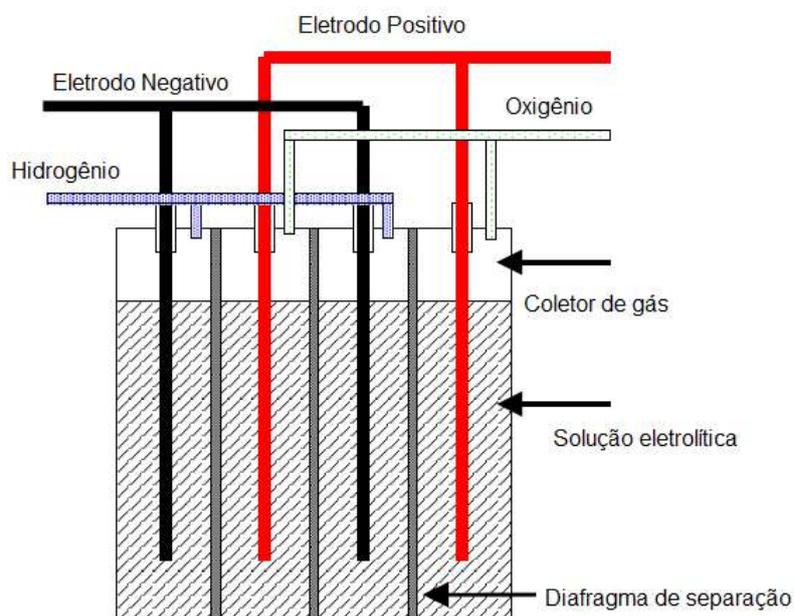
O desenvolvimento da eletrólise por óxido sólido foi iniciado nos EUA pela General Electric e Brookhaven National Laboratory, seguido por Dornier (BUTTNER e SPLIETHOFF, 2018). Como um processo de eletrólise que atua em altas temperaturas (500° a 800°C), a água em forma de vapor pode reduzir drasticamente o consumo de energia para divisão celular da água, consequentemente aumentando a eficiência energética (CHOE *et al.*, 2022). A melhoria da eficiência energética pode levar a uma redução no custo do hidrogênio devido ao consumo, pois o consumo de energia é o principal fator para o custo de produção da eletrólise (SHEN; WANG; TUCKER, 2020). Além da eficiência aumentada, as condições termodinâmicas são favoráveis para a conversão e, como também consequência positiva, a água da eletrólise de

óxido sólido pode ser integrada termicamente na produção de metanol, dimetil éter e amônio (KHAN, et al., 2018).

2.3.2 Eletrolisadores

Eletrolisadores são os equipamentos que realizam o processo de eletrólise, porém não somente isso. Seus subsistemas podem purificar, fazer tratamento, resfriamento, controle e segurança de hidrogênio (MICENA, 2020). O eletrolisadores existentes atualmente são os alcalino unipolar, alcalino bipolar, por membrana polimérica condutora de prótons e óxido sólido, sendo os mais usuais são os alcalinos. Para os arranjos alcalinos unipolares, a ligação é feita em paralelo com o tanque, fazendo uso de uma membrana para a separação dos cátodos e ânodos, separando também, o hidrogênio obtido do oxigênio (BRAGA,2014).

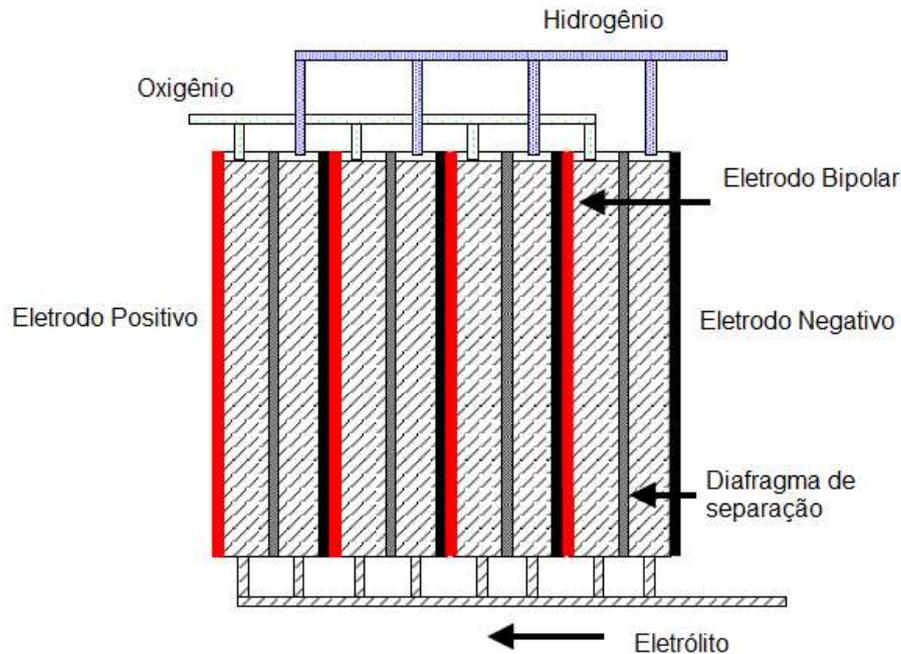
Figura 9: Eletrolisador unipolar



Fonte: KROPOSKI (2006)

Já para o sistema bipolar, as conexões das células são em série, sendo que cada íon é produzido de um lado da célula, tendo uma membrana de separação entre os eletrodos. A figura 10 mostra um eletrolisador bipolar esquematizado (BRAGA, 2014).

Figura 10: Eletrolisador bipolar



Fonte: KROPOSKI (2006)

Para os eletrolisadores tipo PEM, os principais componentes são o conjunto de membranas do eletrodo (que consiste em membrana, materiais do ânodo e materiais do cátodo), camada de difusão dos gases, placas separadoras e placas terminais (SHIVA KUMAR E HIMABINDU, 2019). Os materiais do eletrodo do cátodo e do ânodo de última geração são os eletrolisadores à base de metais nobres, especialmente de IrO_2 para reação de evolução do oxigênio e platina suportada por carbono para a reação de evolução do hidrogênio, sendo esses materiais caros e escassos. O titânio poroso, ou titânio malha, e uma malha de carbono são usados como difusão de gases do ânodo e do cátodo, podendo ter revestimento de platina ou ouro como separadores de placas bipolares (YANG et al. 2019), sendo esses separadores responsáveis por 48% do custo total do eletrolisador (IRENA, 2020). Com isso, o desafio moderno é o desenvolvimento de componentes mais baratos para melhor viabilizar tal eletrolisador.

Para os eletrolisadores de óxido sólido, três são os componentes principais da célula eletrolítica: dois eletrodos porosos (ânodo e cátodo) e um denso eletrólito cerâmico capaz de conduzir íons óxidos. O eletrólito mais usado é o de zircônia estabilizada com ítria, que é

especialmente dopado com 8% de mol de ítria em um material de óxido de zircônio, pois a estabilidade e desempenho térmico é excelente, operando em temperaturas em até 850 °C, além da alta condutividade iônica associada (NECHACHE E HODY, 2021).

Eletrolisadores são equipamentos complexos que precisam de energia para suas funções, tanto a eletrólise quanto possíveis purificações, medições e controles. (KOTOWICZ et al., 2017). Micena (2020) mostrou que o rendimento do eletrolisador é uma relação da potência com hidrogênio com a potência disponível para a utilização da mesma, mostrada na equação 35.

$$\eta_{\text{elet}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2} \text{PCI}_{\text{H}_2}}{\dot{E}_{\text{el}}} \quad (35)$$

Sendo:

\dot{E}_{el} - Potência em corrente contínua fornecida [kW];

\dot{m}_{H_2} - Vazão mássica do hidrogênio [kg/h];

PCI_{H_2} - Poder calorífico inferior do hidrogênio [33,32 kWh/kg].

Segundo Kotowicz et al. (2018), a pilha eletrolítica consome 90% da energia fornecida ao eletrolisador, sendo 10% para os subsistemas auxiliares, como mostrado na equação 36.

$$\dot{E}_{\text{el}} = 0,9 \dot{E}_{\text{total}} \quad (36)$$

Em que \dot{E}_{total} é potência total fornecida pelo sistema [kW].

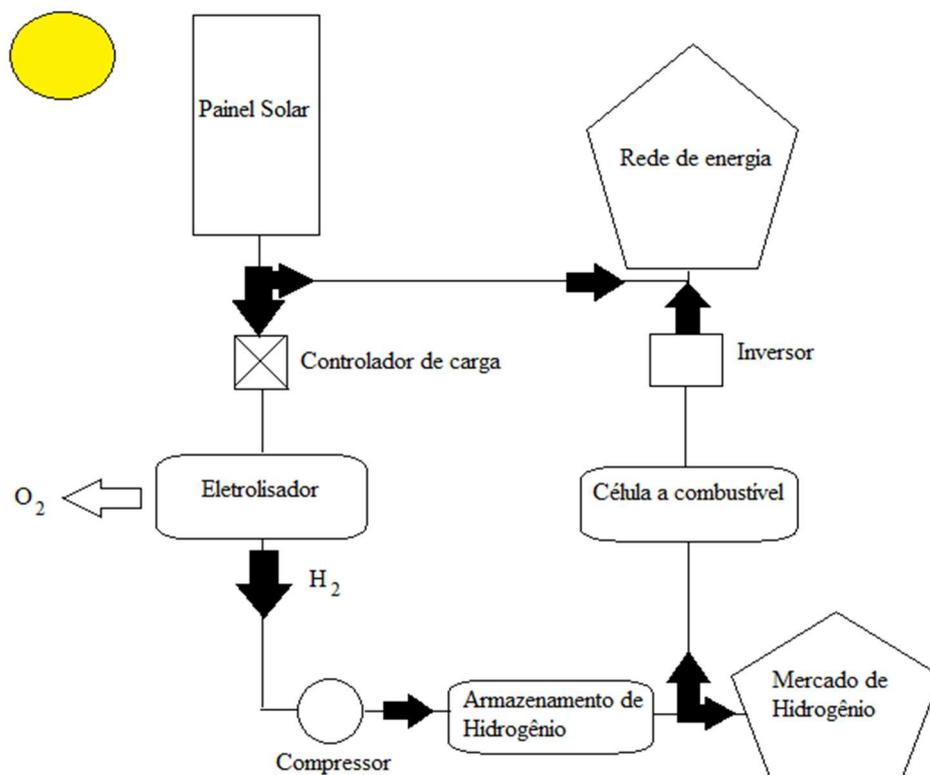
2.4 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Um sistema de energia onde o hidrogênio é derivado de fontes renováveis é autossuficiente, limpo e representa uma solução energética permanente para o desenvolvimento sustentável (SHERIF; BARBIR; VEZIROGLU, 2005). Nos últimos séculos, a eletrólise da água é uma tecnologia bem conhecida para a produção de hidrogênio verde, porém representa apenas 4% do hidrogênio produzido, muito por fatores econômicos (YODWONG et al., 2020) A produção de hidrogênio verde é caracterizada pelo seu processo de obtenção por fonte renovável, através da eletrólise. Duas das formas de se obter tal tipo de hidrogênio é com a eletrólise tendo como fonte energética de origem a solar ou fonte de energia eólica.

2.4.1 Produção de hidrogênio verde utilizando energia solar

O grande potencial de energia solar, sua sustentabilidade e custos promissores tem motivado a implementação de usinas solar por todo o planeta, com aumento significativo nos últimos anos. Porém, o aumento da capacidade instalada de energia fotovoltaica demanda uma forma de armazenamento economicamente viável para mitigar a intermitência da fonte geratriz. A geração de hidrogênio solar por eletrólise é uma solução promissora tanto para armazenamento quanto para transporte e consumo (ACAR; BESKESE; TEMUR, 2018). A produção de hidrogênio verde solar é basicamente constituída de obtenção da energia solar fotovoltaica, através dos painéis fotovoltaicos, compatibilização da eletricidade a ser utilizada e a eletrólise da água (KNOB, 2013). Na Figura 11 é mostrado um esquema da produção de hidrogênio verde solar.

Figura 11: Esquema de eletrólise a partir de energia solar



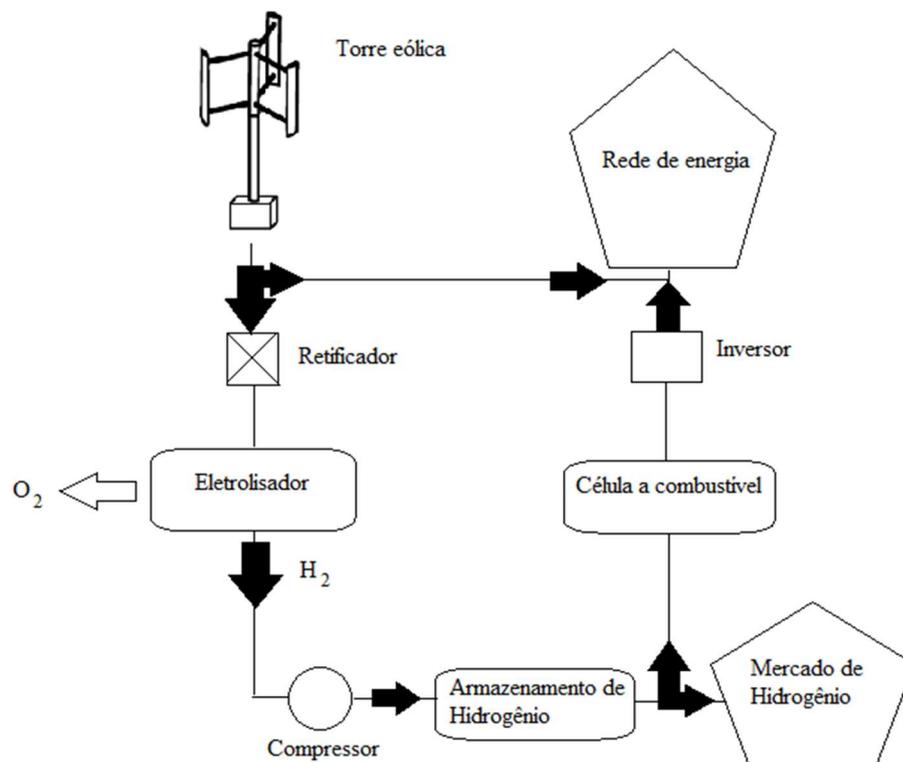
Fonte: Elaboração Própria

Na eletrólise é possível também obter o oxigênio molecular como subproduto, que pode ser estocado e comercializado (MICENA, 2020), podendo ser também vendido como hidrogênio molecular, utilizado pela indústria como matéria prima ou gerar energia elétrica com uma célula a combustível.

2.4.2 Produção de hidrogênio verde utilizando energia eólica

Para a geração eólica é recomendável que a média de ventos da localidade seja superior a 4m/s (SILVEIRA, 2020) para turbinas de eixo horizontal, porém, turbinas eólicas de eixo vertical tem uma velocidade mínima de geração de 2m/s, o que faz esse tipo de aerogerador ter uma maior amplitude de geração (NANTONG R&X ENERGY TECHNOLOGY, 2019). Semelhante ao sistema geração de hidrogênio verde fotovoltaico, a geração de hidrogênio verde eólico tem três etapas de processo, diferenciando apenas na forma de obtenção de energia elétrica, que pode ser observada na Figura 12 como um sistema eólico de eixo vertical.

Figura 12: Esquema de eletrólise a partir de energia eólica



Fonte: Elaboração Própria

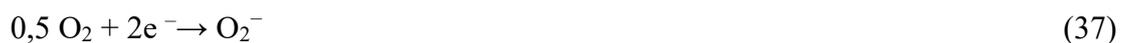
O hidrogênio obtido através da eletrólise é armazenado em um sistema apropriado, podendo ser utilizado a posterior para produção de energia em células a combustível, direcionada para abastecimento de veículos ou utilizada pela indústria para fins terceiros. O oxigênio obtido pelo processo de eletrólise também pode ser utilizado ou comercializado (MICENA, 2020).

É verificado um baixo custo na produção de hidrogênio verde eólico quando se tem ventos com velocidade acima de 5 m/s, no entanto, a entrega e os custos de armazenamento também serão levados em consideração no custo final. Portanto, uma investigação mais ampla da gama de ventos locais, fatores geográficos e uso final devem ser considerados preliminarmente (ACAR; BESKESE; TEMUR, 2018).

2.5 CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Há aproximadamente 180 anos, Sir Grove idealizou e desenvolveu a célula a combustível e desde então sua tecnologia, inovação, utilização e eficiência são amplamente modernizados e evoluídos (ROBALINHO; SANTOS, 2021). Células a combustível são dispositivos que realizam a eletrólise reversa da água, utilizando o hidrogênio ou fonte de energia rica em hidrogênio como combustível, gerando calor e eletricidade (RODRIGUES, 2019).

Com a evolução dos equipamentos, peças e materiais, as células a combustível se mostram promissoras no mercado de energia (ROBALINHO, SANTOS, 2021), além disso, possuem muitas características únicas para a flexibilização eletrônica, como materiais não degradáveis, não exigem carregamento constante e vida útil razoavelmente longa, sendo considerados os dispositivos do futuro (WANG et al, 2022), podendo ser aplicadas geradores de energia distribuída em diversas funções (RODRIGUES, 2019). A conversão de energia elétrica acontece com duas reações químicas, como mostrado nas equações 37 a 39.



Pode se concluir que a reação da célula a combustível é a reação reversa da que ocorre no eletrolisador, podendo então gerar parte da energia da reação eletrolítica, sendo que tais reações apresentam eficiência termodinâmica não limitada por Carnot, por isso atingem valores aproximadamente de 80% (ROBALINHO, SANTOS, 2021).

Para determinar a energia gerada pela célula a combustível, deve-se considerar a variação da energia livre de Gibbs (ΔG) como tal e a entalpia do processo (RODRIGUES, 2019), como mostrados nas equações 40 e 41.

$$W_{el\ CAC} = \Delta G \quad (40)$$

$$\eta_{cac} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (41)$$

Em que:

W_{el} é o trabalho elétrico (kJ/kg);

ΔG é a variação da energia livre de Gibbs (kJ/kg);

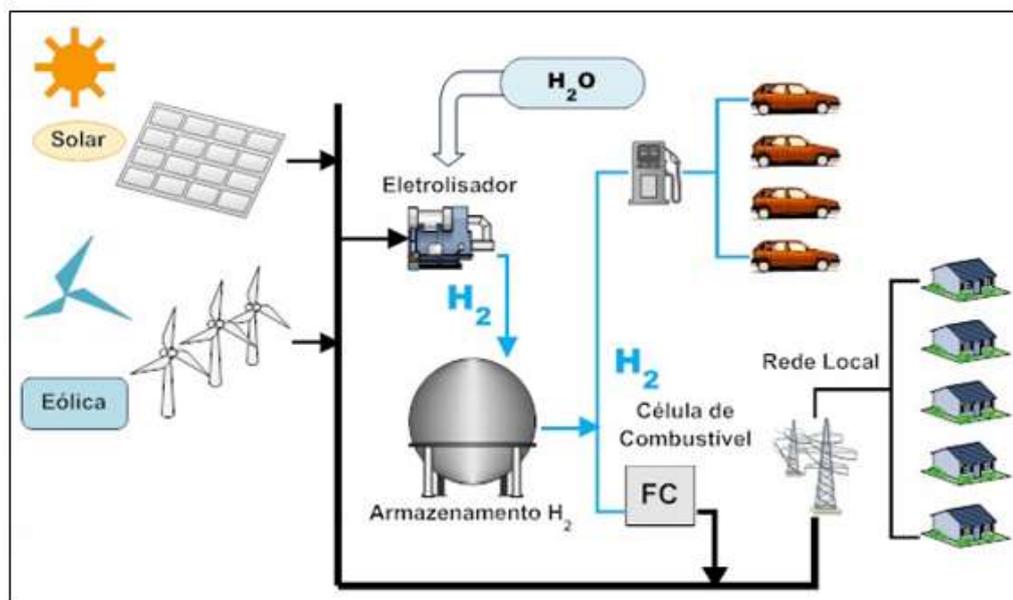
ΔH é a variação de entalpia (kJ/kg);

η_{cac} é o rendimento da célula a combustível.

3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (SHPH) DO IPBEN – GUARATINGUETÁ

Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio é um sistema de fontes de energias de diferentes formas de produção, armazenamento e uso de hidrogênio. Para o SHPH do Laboratório do IPBEN-Guaratinguetá, com base no potencial solar e eólico da região do Vale do Paraíba (SP), realiza estudos para a produção e utilização de hidrogênio verde, como apresentado na Figura 13.

Figura 13: Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio Verde



Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021)

A metodologia do estudo constitui em coletar dados de geração de energia elétrica do painel solar por dois anos e estimar, no mesmo período, a geração de energia elétrica do painel fotovoltaico do IPBEN – Guaratinguetá de forma teórica e da torre eólica de eixo vertical do mesmo laboratório. Uma vez obtidos os dados, fez-se o cálculo da produção de hidrogênio de cada sistema separadamente, visando comparar a energia produzida por cada sistema, a produção de hidrogênio com essa energia equivalente e a vazão volumétrica de ambos. Posteriormente é calculada a energia gerada em uma possível utilização do hidrogênio produzido individualmente.

Em uma fase seguinte é estabelecida uma comparação econômica com dados calculados a partir dos valores de investimento dos equipamentos e técnicas de engenharia financeira

estabelecidas por Laranci, Silveira e Lamas (2012), visando comparar a produção de energia elétrica e de hidrogênio de cada um dos sistemas. Posteriormente é determinada a eficiência ecológica baseada em Cardu e Baica (1999), com adaptações. Para esse cálculo é necessário o rendimento de cada sistema e o Potencial de Aquecimento global.

Para tanto, é desenvolvida a análise dos sistemas instalados para a geração de energia, o Painel Fotovoltaico Canadian Solar 330 W, a torre eólica de eixo vertical de 2 kW da empresa Nantong R&X Energy Technology, o eletrolisador modelo QL-2000 da empresa Whole Win Materials Sci. & Tech. Co. Ltd., e a célula combustível HYFC 1 kW, considerando condições da cidade de Guaratinguetá, São Paulo, Brasil, caracterizando todos os componentes do SHPH.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTÁICO

No IPBEN – Guaratinguetá, o painel fotovoltaico instalado é da marca Canadian Solar com uma potência de 330Wp por placa, sendo seus dados técnicos mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados técnicos do painel solar Canadian Solar 330 Wp, por 1000 W/m²

Componente	Medida
Voltagem de operação	32,2 V
Corrente de Operação	10,24 A
Voltagem de circuito aberto	39,2 V
Corrente de curto-circuito	10,82 A
Inversor on-grid 3000 W Canadian Solar	1
Stick wi-fi de monitoramento para inversor	1
Suporte Metálico p/ 9 painéis (garagem)	1
String Box Ecosolys – 1000 V 32 A	1

Fonte: Canadian Solar (2016)

Foram usados 9 painéis solares em série do tipo citado em formato de garagem solar, com uma estrutura metálica como suporte, a fim de utilizar como proteção de incidência solar e chuva para um veículo e obtenção de energia de fonte solar, como mostrado na Figura 14.

Figura 14: Garagem solar do IPBEN- Guaratinguetá



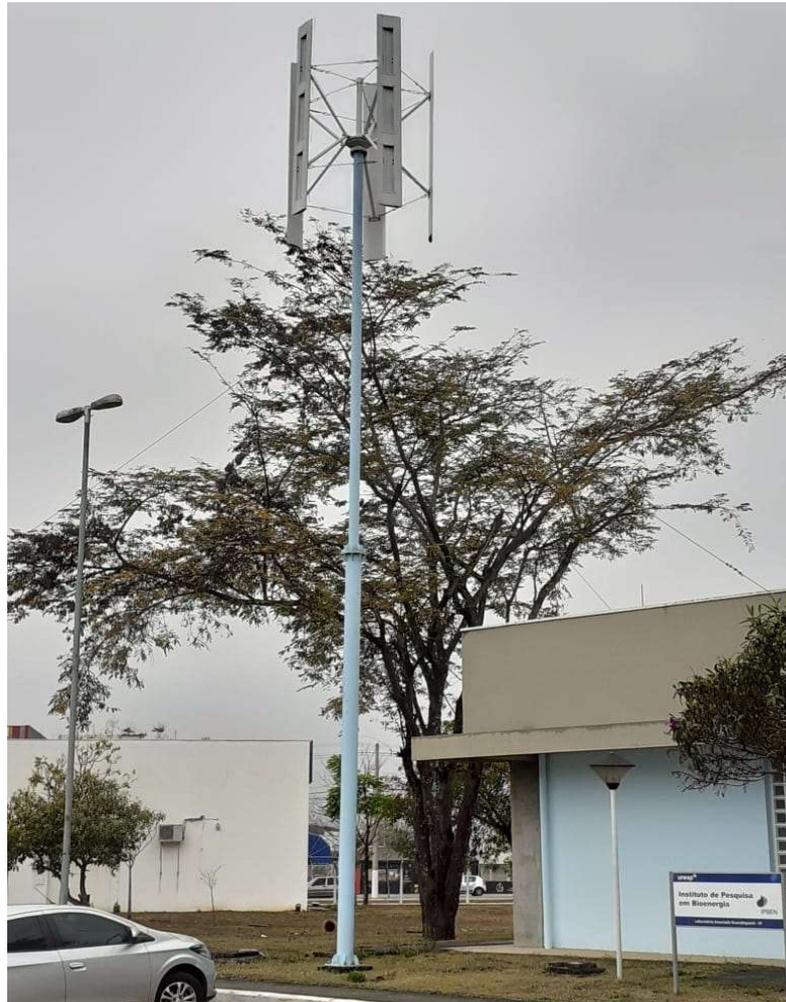
Fonte: Elaboração Própria

O sistema de captação solar tem seus dados registrados por um medidor de energia elétrica instalado na saída da garagem solar, sendo este totalmente *on grid*. Os dados são registrados pelo aplicativo ShinePhone, devidamente registrado em uma login do laboratório IPBEN- Guaratinguetá. O sistema de coleta de dados foi feito em novembro de 2019, tendo uma melhor consistência de informações após pelo menos 1 ano de coleta de dados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA TORRE EÓLICA

No IPBEN – Guaratinguetá, a torre eólica de eixo vertical instalada é da marca Nantong R&X Energy Technology com uma potência de 2000 W nominal. Como mostra a Figura 15, a torre eólica instalada em frente ao laboratório.

Figura 15: Torre eólica de 2 kW IPBEN – Guaratinguetá



Fonte: Elaboração Própria

A torre de eixo vertical tipo H do laboratório do IPBEN- Guaratinguetá, foi adquirida em 2019, porém só pode ser instalada em 2021. Como mostrado na Tabela 2, os dados técnicos da torre eólica instalada são mostrados como uma velocidade de trabalho variando de 2 a 20 m/s e dimensões especificadas. O sistema de coleta de dados da torre eólica vertical não foi instalado com tempo hábil para uma coleta de dados significativa. Com isso, foram realizados cálculos teóricos para a produção de energia eólica.

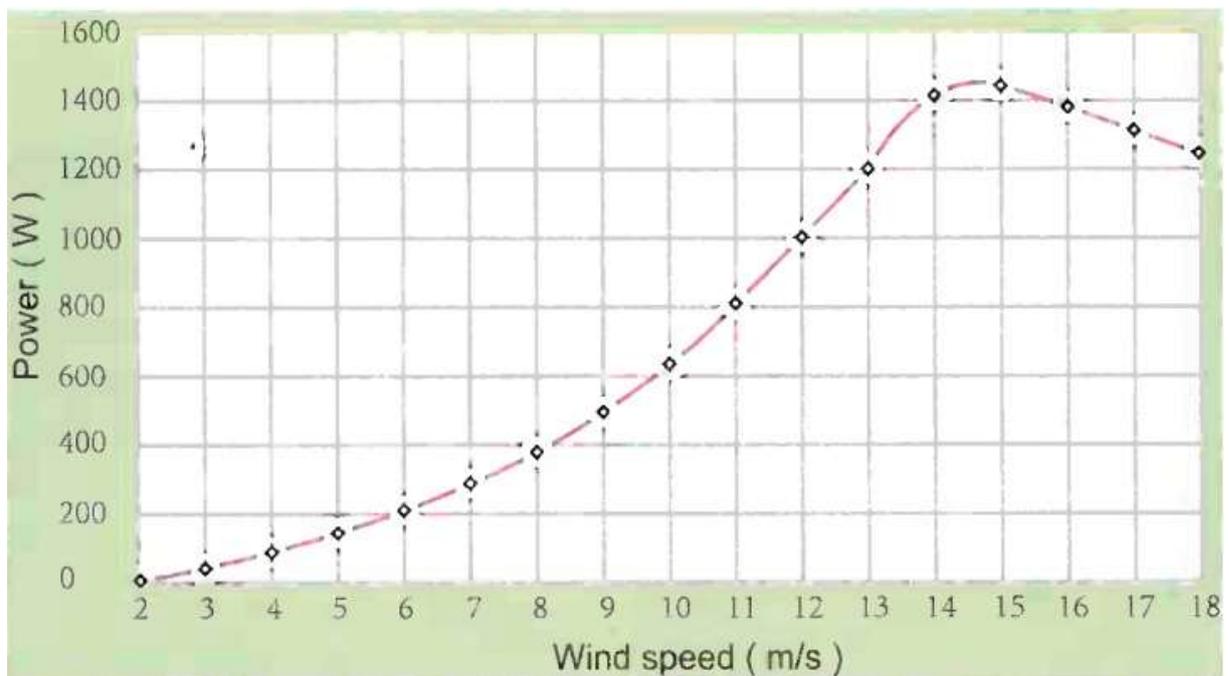
Tabela 2: Dados específicos do aerogerador vertical de 2 kW

Modelo	H-2000
Potência	2 kW
Altura das pás	2,6 - 3,0 m
Diâmetro da roda	2,55m
Número de Pás	5
Velocidade nominal	12 m/s
Velocidade de trabalho	2-20 m/s
Voltagem	CA 48 V/ 96 V
Altura da torre	12 m

Fonte: Nantong R&X Energy Technology (2019)

No manual de instalação e operação do inversor SUN-2000G2, para turbinas eólicas (GWL,2019), é fornecida a curva de potência, como mostrado na Figura 16. Com a velocidade do vento é possível prever a potência de geração elétrica.

Figura 16 - Curva de potência do Inversor da turbina eólica



Fonte: GWL (2019)

Observando o gráfico da Figura 16, a determinação da potência quando a velocidade de vento é baixo, menor que 4 m/s, a precisão do resultado é menor. A utilização de métodos

algébricos de previsão da potência geradora é melhor nesses casos. Para velocidades acima de 4 m/s de média de velocidade a Figura 16 consegue prever com melhor precisão por método gráfico.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO ELETROLISADOR

O eletrolisador QL-2000 é usado para gerar hidrogênio de alta pureza, 99,9999%, através da tecnologia PEM. O sistema do QL-2000 usa um catalisador de platina para dividir a água deionizada, conforme processo de eletrólise da água. A membrana de troca de prótons permite apenas que água e íons positivos atravessem entre seus compartimentos, tendo assim uma menor necessidade de eletrólitos na célula eletrolítica, eliminando necessidade de líquidos nocivos, como hidróxido de potássio concentrado. Seguiu-se assim com a importação de um equipamento de origem chinesa, fabricado pela empresa Whole Win Materials Sci. & Tech. Co., Ltd., modelo QL-2000, um eletrolisador alcalino com as seguintes especificações como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Características do eletrolisador QL-2000

Fluxo de saída	0,120 Nm ³ /h
Pressão de saída	0,02 a 0,7 MPa
Pureza do Hidrogênio	99,9999%
Potência de entrada	1000 W
Alimentação	220V/50~60 Hz

Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021)

O modelo de eletrolisador citado, presente no laboratório do IPBEN – Guaratinguetá, pode ser observado na Figura 17.

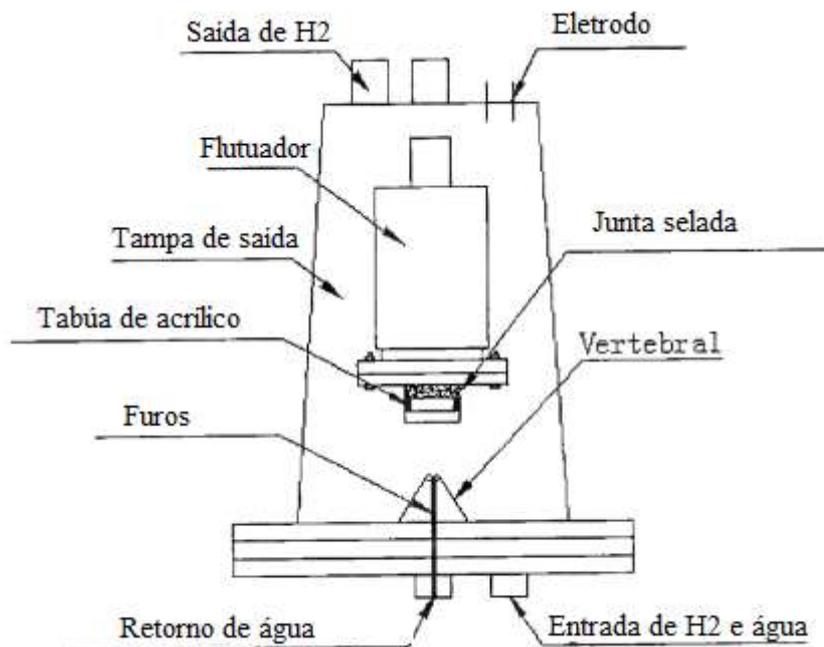
Figura 17: Eletrolisador IPBEN – Guaratinguetá



Fonte: Elaboração Própria

Os principais componentes internos do eletrolisador adquirido no presente projeto são mostrados na Figura 18.

Figura 18: Diagrama esquemático dos componentes do eletrolisador.



Fonte: Whole Win (Beijing) Materials Sci. & Tech. Co., Ltd. (2019)

É possível observar que a entrada de água é feita pela parte inferior do eletrolisador, tendo próximo um retorno de água para dreno. A saída de hidrogênio é feita pela parte superior do eletrolisador, separado do oxigênio pelos eletrodos.

Como a água não qualificada de íons duros pode fazer com que os sedimentos bloqueiem os poros dos eletrodos, resultando em uma escarificação dos mesmos. Com isso, a resistividade da água (deionizada ou redestilada) na eletrólise não deve ser inferior a 1 M Ω .cm (WHOLE WIN (BEIJING) MATERIALS SCI. & TECH. CO., LTD., 2019).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Para os estudos foi selecionada uma célula a combustível HYFC - 1 KW, conforme Tabela 4. Este equipamento tem uma configuração mínima de geração de energia elétrica com hidrogênio e foi obtido pelo IPBEN – Guaratinguetá.

Tabela 4: Características da célula combustível HYFC 1 kW

Tipo de célula	PEM
Número de células	48
Potência nominal	1000 W
Reagentes	H ₂ e Ar
Pressão do Hidrogênio	0,45-0,55 bar
Fluxo máximo de saída	780 l/h
Pureza do Hidrogênio	≥ 99.995 % de H ₂ seco

Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021)

A célula a combustível de pequeno porte foi selecionada para atender a demanda de hidrogênio de um eletrolisador de 2L/min conforme mostra a Figura 19.

Figura 19: Célula a combustível de 1 kW



Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021)

Para complementar o sistema de abastecimento da célula a combustível, foi necessário adquirir os equipamentos listados a seguir:

- 1 Tanque de armazenamento de hidrogênio de hidreto metálico com capacidade de 1000 L, modelo HYM-1000S.
- 1 Tanque de armazenamento de hidrogênio de hidreto metálico com capacidade de 100 L.
- 1 Conjunto de válvulas de pressão de carga;
- 1 Conjunto de válvulas de pressão de descarga;

Com a célula a combustível instalada como parte do presente projeto, possibilita estudos futuros de sua integração com sistemas de transporte, com veículos movidos a hidrogênio, equipados com célula a combustível, abastecidos com hidrogênio produzido localmente por eletrólise com energia eólica e energia solar. A solução adotada neste projeto possibilita também estudos futuros com veículos elétricos carregados com energia elétrica gerada diretamente pelo sistema eólico e solar.

4 ANÁLISE ENERGÉTICA

Para a análise energética do SHPH do IPBEN – Guaratinguetá, foram coletados dados por dois anos de geração de energia pela garagem solar sendo os dados registrados pelo aplicativo ShinePhone, fornecendo geração de energia elétrica e massa de carbono mitigado. Foi também calculada a geração teórica anual fotovoltaica da cidade de Guaratinguetá para as condições apresentadas, com intenção de comparação. A análise da torre eólica do IPBEN – Guaratinguetá, foram consideradas medidas de vento da cidade, tais quais suas frequências, para poder calcular a potência de geração. Posteriormente foi estimada a geração de hidrogênio verde a partir das duas fontes de energia renovável, tal qual a vazão mássica de cada sistema e sua possível geração com célula a combustível.

4.1 ANÁLISE ENERGÉTICA DA GERAÇÃO SOLAR

A análise energética solar é feita com base nos dados coletados, porém foi calculada a energia elétrica de fonte solar teórica para ser usada como parâmetro comparativo, como visto na Tabela 5.

Tabela 5: Geração solar mensal teórica

Mês	Geração Teórica [kWh]
Janeiro	523,70
Fevereiro	494,30
Março	428,39
Abril	334,15
Maiο	258,96
Junho	219,09
Julho	220,99
Agosto	266,66
Setembro	351,56
Outubro	438,91
Novembro	499,80
Dezembro	526,54
Total	4563,05

Fonte: Elaboração Própria

Campos e Silveira (2019), mostram que, para a cidade de Guaratinguetá, nas condições de $\beta = 17^\circ$ e $\gamma = 45^\circ$, com uma temperatura de 20°C , com rendimento de $\eta_{\text{FV teórico}} = 16\%$. Foram consideradas a quantidade de horas por mês de geração de cada mês em específico, resultando num total de 9126,10 kWh no período de dois anos.

Tabela 6: Geração de energia elétrica de fonte solar mensal 2020 e 2021

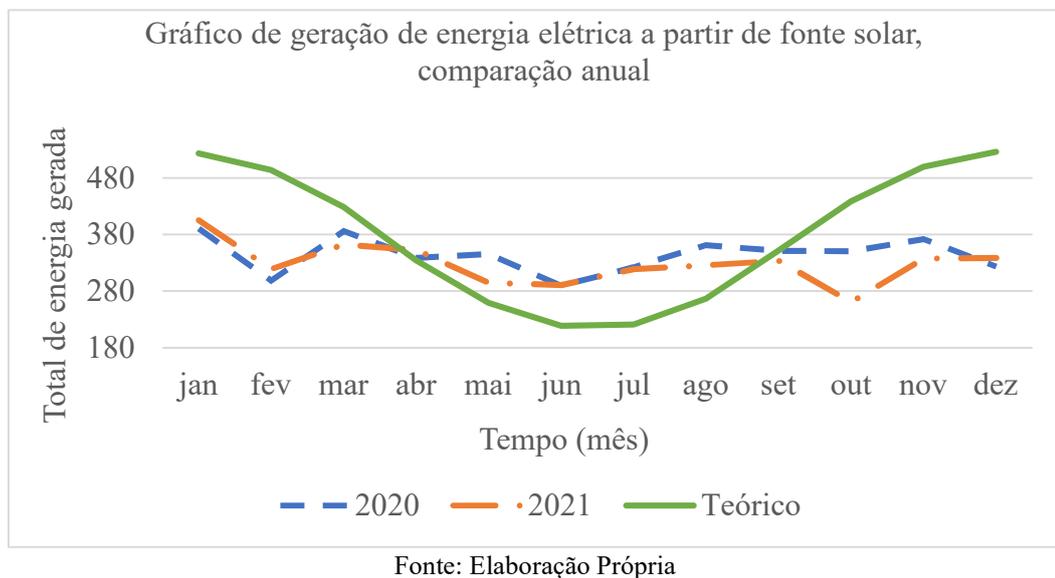
Mês/Ano	Geração (kWh)	Carbono mitigado (kg)
jan/20	390,6	389,43
fev/20	298,8	297,90
mar/20	386,2	385,04
abr/20	339,0	337,98
mai/20	345,6	344,56
jun/20	289,7	288,83
jul/20	322,2	321,23
ago/20	361,2	360,12
set/20	351,4	350,35
out/20	350,7	349,65
nov/20	372,4	371,28
dez/20	323,7	322,73
jan/21	405,5	404,28
fev/21	318,9	317,94
mar/21	362,7	361,61
abr/21	352,7	351,64
mai/21	294,8	293,92
jun/21	291,0	290,13
jul/21	319,0	318,04
ago/21	325,7	324,72
set/21	333,9	332,90
out/21	260,8	260,02
nov/21	337,5	336,49
dez/21	339,1	338,08
TOTAL	8073,1	8048,88

Fonte: Elaboração Própria

Foi também considerado que a geração de energia elétrica fotovoltaica teria um período médio diário de 6 horas, sendo 2190 horas/ano de geração. Para a coleta de dados dos painéis foi usado um sistema acoplado de recepção de dados gerando uma coleta de dados ao longo de dois anos, 2020 e 2021, apresentados na Tabela 6.

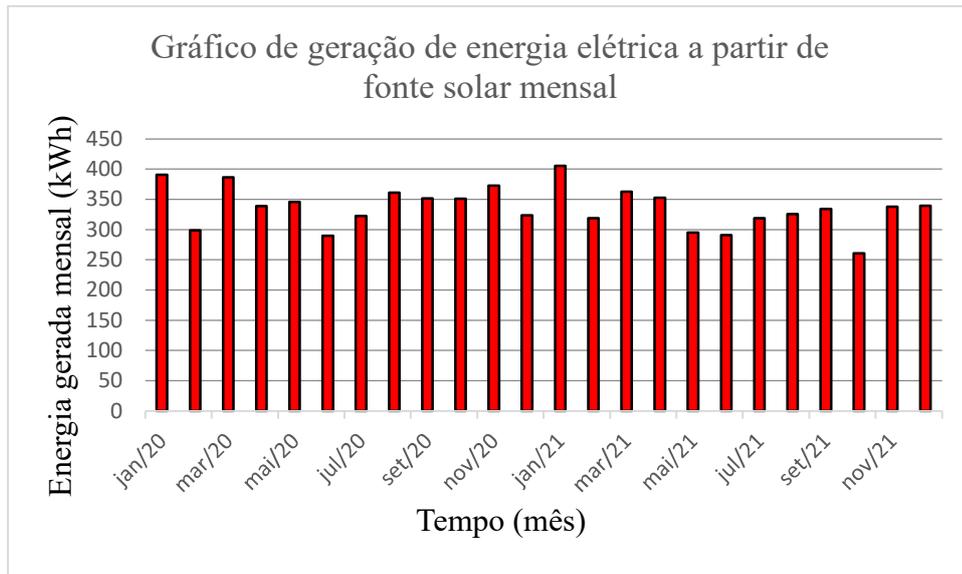
A tabela também consta os dados do programa sobre mitigação de carbono [kg] do painel fotovoltaico por mês. Nas Figuras 20 e 21 são mostrados os gráficos de coleta solar em dois anos. Na Figura 20, separado por ano, também apresenta a curva teórica de geração de energia elétrica.

Figura 20: Gráfico de geração de energia elétrica a partir de fonte solar, comparação anual



Na média, foi gerado 336,38 kWh mensal no período de análise, dois anos. Na Figura 20 é possível ver que as medições têm uma curva aceitável conforme a teoria.

Figura 21: Gráfico de geração de energia elétrica a partir de fonte solar mensal



Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 21 é mostrada a medição mensal dos dois anos, 2020 e 2021. Pode-se concluir que os meses de janeiro e março tem as maiores marcas de geração de energia solar, conforme é mostrado no gráfico. Na figura 20 mostra um total de 8073,1 kWh produzido ao longo de dois anos, mitigando aproximadamente 8,048 toneladas de carbono.

4.2 ANÁLISE ENERGÉTICA DA GERAÇÃO EÓLICA

A análise energética da geração eólica do aerogerador do laboratório do IPBEN – Guaratinguetá foi estimada usando a distribuição de frequência de Weibull e cálculo da potência eólica a partir dos dados calculados. Para tal distribuição, foram adotados dados da CRESESB (2001) que fornece a velocidade média, os coeficientes c e k a uma altura de 50 metros, sendo usadas as médias anuais, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Dados do mapa de ventos da cidade de Guaratinguetá a 50 m de altura

Grandeza	Valor médio anual	Unidade
Velocidade do vento	3,43	m/s
Fator c	3,87	m/s
Fator k	2,33	-
Densidade de potência	41	W/m ²

Fonte: Adaptado CRESESB (2001)

A partir dos parâmetros de referência fornecidos pela CRESESB (2001), pode ser estimada a distribuição de Weibull do vento da cidade de Guaratinguetá, utilizando como referência à altura de 50 metros e como base para cálculo a altura da torre eólica do laboratório do IPBEN, 12 metros. Com isso, na Tabela 8 é mostrado os resultados dos cálculos para adaptar os números fornecidos pela CRESESB (2001) a situação real do Laboratório IPBEN-UNESP Guaratinguetá.

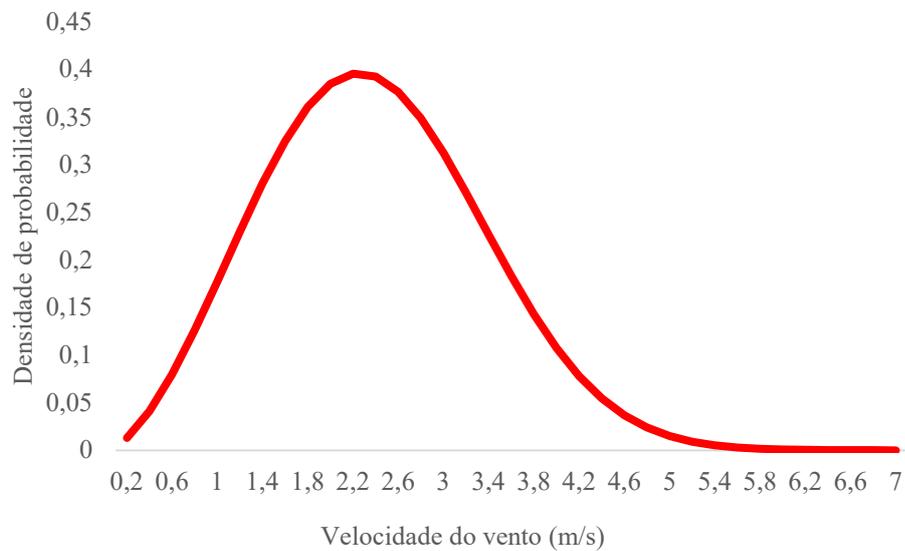
Tabela 8: Resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull a 12 m em Guaratinguetá

Parâmetros	Valor a 12 metros	Unidade
nw	0,2550	-
α	0,2991	-
c ₂	2,6894	m/s
k ₂	2,6709	-
v ₂	2,2383	m/s

Fonte: Elaboração Própria

A velocidade média estimada nos cálculos, v₂, de 2,24 m/s, o que mostra que o gráfico do inversor não terá uma boa precisão para a determinação da potência de geração eólica. Na Figura 22 é mostrado o gráfico que foi gerado pela distribuição de frequências de Weibull para a cidade de Guaratinguetá, usando como limites as velocidades de vento de 0 até 20 m/s, variando em 0,2 m/s. O gráfico tende a 0 a partir da velocidade de 7 m/s, sendo retirado da figura para uma melhor visualização.

Figura 22: Gráfico de densidade de velocidade pela distribuição de Weibull

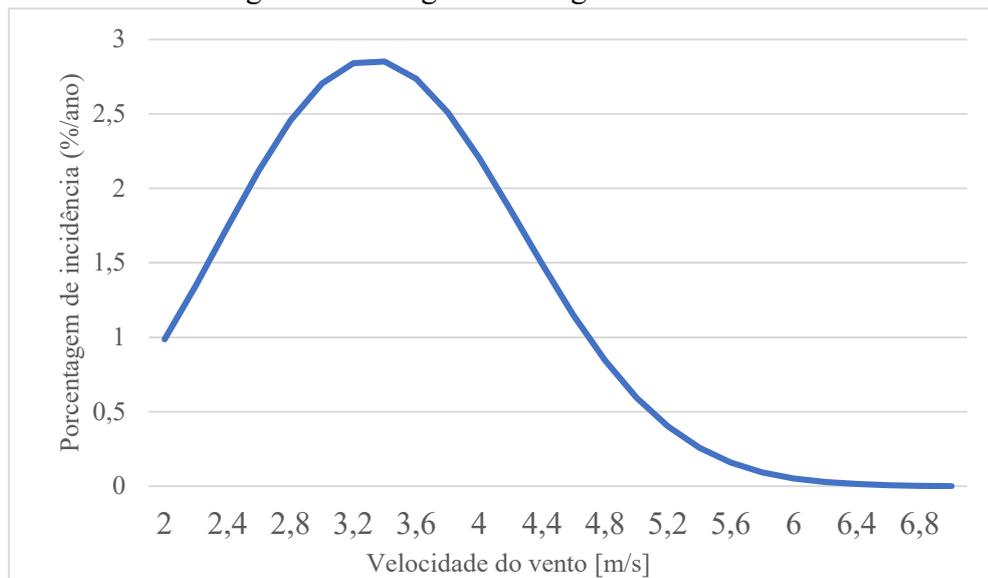


Fonte: Elaboração Própria

A Figura 22 evidencia que a geração de energia eólica na cidade é para baixas velocidades, indicando baixa potência elétrica por esse meio na cidade. O manual do gerador eólico determina, assim como mostrado na Figura 23, que a velocidade mínima do vento para a geração de energia é de 2 m/s, sendo esse o parâmetro mínimo adotado, até a velocidade de 20 m/s, que é muito além dos parâmetros com relevância estimados, que aponta a velocidade de 7,0 m/s como a maior velocidade possível. Portanto, a porcentagem de vento que pode gerar energia é de 40,32 %, representando um total de 3532 hora/ano de geração de energia elétrica.

Foram adotados o $C_p = 0,35$ e a massa específica do ar (ρ_{AR}) de $1,197 \text{ kg/m}^3$ (VAN WYLEN, SONNTAG, BORGNAKKE, 2017). Para uma melhor avaliação, foi feito um gráfico de produção de energia elétrica ao longo de 1 ano, levando em consideração a distribuição percentual de Weibull, pela velocidade do vento, é desenvolvido o gráfico de geração de energia elétrica eólica na Figura 23.

Figura 23: Energia elétrica gerada em 1 ano



Fonte: Elaboração Própria

A área sob o gráfico indica a potência eólica de geração de energia elétrica de 0,08 kW, resultando em 282,6 kWh em 1 ano se considerar 3532 h/ano de vento, sendo, em dois anos de geração de energia elétrica de fonte eólica em Guaratinguetá, 565,2 kWh.

4.3 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Foram estabelecidos parâmetros em comum na produção de hidrogênio, tais como o mesmo equipamento para ambas as produções, solar e eólica, com a medida de energia de dois anos, e energia potencialmente produzida por uma célula combustível para ambas as situações.

Nessas condições de estudos, foram utilizados um rendimento de 55,0% do eletrolisador e o PCI_{H_2} 33,32 kWh/kg. Como os valores anteriormente estabelecidos foram de energia, a utilização da mesma no equacionamento foi mais pertinente do que a utilização da potência, demandando algumas adaptações. A análise feita com a comparação de quantidade de hidrogênio produzido em dois anos de produção de energia elétrica de fonte solar e eólica, como mostrado nos itens 5.1 e 5.2. Dessa forma, para energia solar, os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros calculados a partir da produção de energia solar de janeiro de 2020 até dezembro de 2021

Mês/Ano	$E_{el\ solar}$ [kWh]	$m_{H2\ solar}$ [kg]
jan/20	351,5	5,8
fev/20	268,9	4,4
mar/20	347,6	5,7
abr/20	305,1	5,0
mai/20	311,0	5,1
jun/20	260,7	4,3
jul/20	290,0	4,8
ago/20	325,1	5,4
set/20	316,3	5,2
out/20	315,6	5,2
nov/20	335,2	5,5
dez/20	291,3	4,8
jan/21	365,0	6,0
fev/21	287,0	4,7
mar/21	326,4	5,4
abr/21	317,4	5,2
mai/21	265,3	4,4
jun/21	261,9	4,3
jul/21	287,1	4,7
ago/21	293,1	4,8
set/21	300,5	5,0
out/21	234,7	3,9
nov/21	303,8	5,0
dez/21	305,2	5,0
Total	7832	119,9

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 9 mostra também o fornecimento mensal de hidrogênio, para uma possível comparação. A energia eólica, com o equacionamento semelhante, tem os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros calculados a partir da produção de energia eólica de janeiro de 2020 até dezembro de 2021

Parâmetro	Valor calculado	Unidade
E_{el} eólica	565,2	kWh
m_{H_2} eólica	9,3	kg

Fonte: Elaboração Própria

Porém, a massa de hidrogênio calculada é para dois anos de geração de energia, sendo que o eletrolisador tem a produção de hidrogênio em Nm^3/h , fazendo necessária a conversão da massa de dois anos de produção em Nm^3/h , conforme equação 42.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{H \cdot y} \quad (42)$$

Onde:

H - Período de operação da planta [h/ano];

m_{H_2} - Massa de hidrogênio produzida em dois anos [kg];

\dot{m}_{H_2} - Fluxo mássico de hidrogênio [kg/h];

y – anos de produção [ano].

Para um SHPH, a obtenção de valor que uma produção relativa se faz interessante para a avaliação do sistema. Para tanto, a vazão mássica de hidrogênio pode ser calculada conforme equação 43.

$$\dot{Q}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\rho_{H_2}} \quad (43)$$

Em que:

\dot{Q}_{H_2} - Vazão volumétrica do hidrogênio [Nm^3/h];

ρ_{H_2} – massa específica do hidrogênio [$0,08 \text{ kg/m}^3$].

A vazão volumétrica do SHPH total é a soma das vazões parciais, como mostrado na equação 44.

$$\dot{Q}_{H_2 \text{ total}} = \dot{Q}_{H_2 \text{ solar}} + \dot{Q}_{H_2 \text{ eólica}} \quad (44)$$

A vazão volumétrica deve ser estabelecida para saber se o eletrolisador é capaz de produzir a quantidade de hidrogênio produzido pelo SHPH. Em sendo a produção de energia elétrica maior que a capacidade de produção de hidrogênio, deve ser estudada a possibilidade da troca de equipamento ou da obtenção de um novo equipamento complementar. O eletrolisador em estudo tem uma capacidade de produção de 0,120 Nm³/h de hidrogênio.

Tabela 11: Vazões volumétricas de hidrogênio total e parciais

Parâmetro	Valor	Unidade
$\dot{Q}_{H_2 \text{ total}}$	0,37	Nm ³ /h
$\dot{Q}_{H_2 \text{ solar}}$	0,35	Nm ³ /h
$\dot{Q}_{H_2 \text{ eólica}}$	0,02	Nm ³ /h

Fonte: Elaboração Própria

Visto que a vazão total de hidrogênio a ser produzido pelo SHPH do IPBEN-Guaratinguetá é de 0,37 Nm³/h, uma vazão acima da capacidade do eletrolisador, o equipamento em estudo se mostra insuficiente para os cálculos, sendo necessários 4 eletrolisadores para uma conversão total da energia.

4.4 ENERGIA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

O cálculo da energia fornecida pela célula a combustível considerando a entalpia dos processos será dada pelo PCI do hidrogênio. Porém o trabalho de cada processo é dado em relação a massa, portanto será usada a massa total do processo. Será também considerado uma eficiência de processo de 80% (ROBALINHO, SANTOS, 2021). Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Energia gerada pela célula a combustível em cada processo

Parâmetro	Valor	Unidade
Energia fornecida	25,66	kWh/kg
Energia de fonte solar	3076,64	kWh
Energia de fonte eólica	354,11	kWh

Fonte: Elaboração Própria

Com a Tabela 12 é possível constatar que a produção de energia a partir de fonte fotovoltaica, para as condições adotadas, em comparação com a produção de energia de fonte eólica é aproximadamente 8,69 vezes maior.

5 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo será mostrada a análise econômica de cada sistema de geração. A base metodológica será a desenvolvida por Laranci, Silveira e Lamas (2012) baseada em valor líquido presente.

O custo de produção de hidrogênio envolve o investimento (módulo solar, turbina eólica, eletrolisador, reatores e célula a combustível), o custo de operação e o custo de manutenção. Neste trabalho são feitas as análises em 2 cenários: venda da energia para a rede e produção do hidrogênio verde.

O cenário com uso de célula a combustível para a geração de energia elétrica não será estudado, tal qual o oxigênio produzido, que será considerado um subproduto, sendo descartados.

5.1 CUSTO DA ELETRICIDADE

Segundo Laranci, Silveira e Lamas (2012) o custo da energia elétrica de uma planta de geração é definido pela equação 45.

$$C_{ge} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot P_{sistema}} + C_{Man} + C_{Ope} \quad (45)$$

Visto que:

C_{man} - custo de manutenção [US\$/kWh];

C_{ope} - custo de operação [US\$/kWh];

f - fator de anuidade [1/ano];

H - Período de operação da planta [h/ano];

Inv - investimento da planta [US\$];

$P_{sistema}$ - potência do sistema [kW].

Segundo Silveira (2020), o fator de anuidade, o fator f , é o valor de fluxo de rendimentos que produz um lucro em um período determinado, sendo definido pela equação 46. Porém, para a definição do ka que representa o período de amortização [ano], enquanto o q é determinado pela equação 47.

$$f = \frac{q^{ka} \cdot (q-1)}{q^{ka} - 1} \quad (46)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (47)$$

Sendo:

r - taxa anual de juros [%].

Para o cálculo do C_{man} é considerado um fator de 4% do custo de investimento, conforme apresentado na equação 48 (MICENA, 2020) e o C_{ope} é considerado a energia em todos os componentes auxiliares, como mostrado na equação 49. (BRAGA, 2014)

$$C_{\text{man}} = 0,04 \cdot \frac{\text{Inv.f}}{H \cdot P_{\text{sistema}}} \quad (48)$$

$$C_{\text{ope}} = P_{\text{elet}} \cdot \frac{T_{\text{elet}}}{P_{\text{sistema}}} \quad (49)$$

Em que:

P_{elet} - potência elétrica demandada pelo eletrolisador [kW];

T_{elet} - custo da energia elétrica da concessionária [US\$/kWh].

5.2 CUSTO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Segundo Micena (2020) a análise de custo dos investimentos totais deve ter um fator de correção de 23%, número esse determinado por Parks et al. (2014) apud Micena (2020), que incluiu nas considerações 5% para a preparação de terreno, 10% para o projeto de engenharia, 5% de contingência e 3% para permissão. Com isso, foi possível adaptar a equação em seus estudos.

$$C_{\text{H}_2} = 1,23 \cdot \frac{\text{Inv}}{H \cdot \dot{E}_{\text{H}_2}} \cdot f + C_{\text{Ope H}_2} + C_{\text{man}} \quad (50)$$

$$C_{\text{Ope H}_2} = \frac{P_{\text{elet}} \cdot T_{\text{elet}}}{\dot{E}_{\text{H}_2}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \dot{E}_{\text{H}_2}} \quad (51)$$

$$\dot{E}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2} \quad (52)$$

$$C_{\text{man}} = 0,04 \frac{\text{Inv}}{H \cdot \dot{E}_{H_2}} \cdot f \quad (53)$$

Onde:

\dot{E}_{H_2} - Potência suprida pelo hidrogênio produzido [kW];

\dot{m}_{H_2O} - Vazão mássica requerida no eletrolisador [m³/h];

\dot{m}_{H_2} - Fluxo mássico de hidrogênio [kg/h];

P_{elet} - potência elétrica requerida pelo eletrolisador [kW];

T_{elet} - custo da energia elétrica da concessionária [US\$/kWh];

T_{H_2O} - preço da água da concessionária [US\$/m³].

5.3 TARIFAÇÃO NACIONAL

Como o material de estudo é um SHPH no laboratório do IPBEN – Guaratinguetá, localizado em São Paulo, foram consideradas taxas e impostos desse local, sendo a concessionária de energia elétrica na cidade de Guaratinguetá a EDP Bandeirantes SP, que fornece os preços pelo site da ANEEL (2022) e a tarifação da água, com a empresa responsável pela distribuição na cidade sendo a Serviço de Água e Esgoto de Guaratinguetá (SAEG). Segundo ANEEL (2022), a tarifa a ser cobrada deve ser calculada como na equação 54, adaptada para que o valor da taxa elétrica fosse em dólar.

$$T_{\text{elet}} = \frac{T_{\text{conc}}}{1 - (\text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ICMS})} \times f_{\text{conv}} \quad (54)$$

Onde:

f_{conv} - fator de conversão de real para dólar [US\$/R\$];

T_{conc} - tarifa elétrica da concessionária sem impostos [R\$/kWh].

Em seu site, a SAEG (2022) fornece o valor do custo de água como R\$ 20,11 nos primeiros 10 m³ utilizados. Após esse volume, o custo segue em R\$ 2,76/m³

5.4 PAYBACK

Laranci, Silveira e Lamas (2002) também fizeram o equacionamento do retorno do investimento, definindo o rendimento anual esperado, como mostrado na equação 55.

$$G_{H_2} = P_{\text{sistema}} \times H (T_{H_2} - C_{H_2}) \quad (55)$$

Sendo:

C_{H_2} - custo de produção de hidrogênio [US\$/kWh];

G_{elet} - rendimento anual esperado [US\$/ano];

H - Período de operação da planta [h/ano];

P_{sistema} - potência do sistema [kW];

T_{H_2} - preço do hidrogênio da concessionária [US\$/kWh].

O valor médio verificado em estados americanos é de US\$13,44/kg (JEAN BARONAS; ACHTELIK, 2017 apud MICENA, 2020) e sabendo que o PCI do hidrogênio é de 33,32 kWh/kg, é possível verificar que $T_{H_2} = \text{US\$ } 0,40/\text{kWh}$.

5.5 CÁLCULOS ECONÔMICOS

Para os cálculos econômicos, são apresentados os parâmetros em comum a todo o equacionamento, fazendo considerações de valores necessários. Posteriormente, é possível observar os cálculos econômicos individuais de cada tipo de produção de hidrogênio verde e para o sistema híbrido. A taxa de energia elétrica na cidade de Guaratinguetá é dada pela concessionária EDP Bandeirantes, tendo os parâmetros apresentados na Tabela 13, fornecidos pela ENEL (2022) ou estabelecidos por operações. Foi considerada uma taxa de US\$ 1,00 a cada R\$ 5,00, para efeito de cálculo.

Tabela 13: Taxa elétrica e parâmetros

Parâmetro	Valor	Unidade
COFINS	7,6	%
ICMS	25	%
PIS	1,65	%
T_{conc}	0,64	R\$/kWh
f_{conv}	1/5	US\$/R\$
T_{elet}	0,19	US\$/kWh

Fonte: Adaptado ENEL (2022)

O cálculo do valor investido em cada uma das plantas será considerado também o valor de todos os demais equipamentos que formam cada um dos sistemas. Seus valores de compra são fornecidos na Tabela 14.

Tabela 14: Valores dos equipamentos dos sistemas

Equipamento	Preço (US\$)
Balanço de sistema (Controladores, suportes, inversores, cabos e conexões)	5 997,66
Eletrolisador	7 662,50
Total de investimento em equipamentos	13 660,16

Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021)

O total de investimento em equipamentos para o sistema é de US\$ 13 660,16, que é somado em cada custo de investimento na planta para determinar o custo total de investimento no sistema. O custo do eletrolisador se mostra bastante reduzido devido a obtenção tem isenções de impostos. Para uma análise de sensibilidade, o cálculo foi feito com 3%, 6%, 9% e 12% de taxa de juros.

5.5.1 Cálculo econômico da produção de hidrogênio verde solar

O sistema de geração elétrica solar do laboratório do IPBEN – Guaratinguetá foi adquirido em maio de 2018, tendo o projeto no valor final de US\$ 3900,00, como os materiais descritos na Tabela 15.

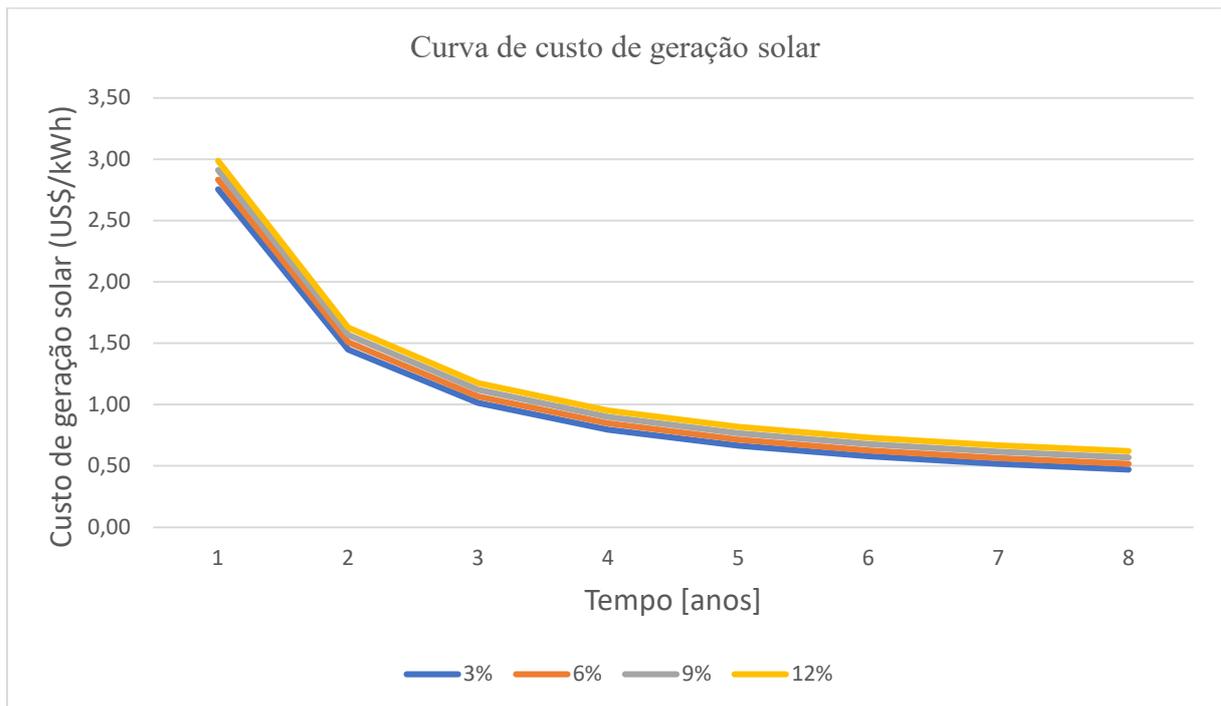
Tabela 15: Parâmetros para determinação de custo de geração de energia elétrica solar

Parâmetro	Valor	Unidade
Investimento da planta	3900,00	US\$
Potência do sistema	1,85	kW
Potência elétrica do eletrolisador	1	kW
Taxa energia elétrica	0,19	US\$/kWh
Tempo	2190,00	h/ano

Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021); ANEEL (2022)

Na Figura 24 é mostrada a curva do custo de produção de energia elétrica por fonte solar ao longo dos anos. É notado que o custo tem uma redução gradual, tendendo a manter custos de operação e manutenção, variando entre de US\$ 0,52/kWh a US\$ 0,67/kWh.

Figura 24: Curva de custo de geração solar



Fonte: Elaboração Própria

O custo do hidrogênio solar é dado pelos gastos de produção do mesmo. Para o custo do hidrogênio verde solar são considerados os parâmetros da Tabela 16.

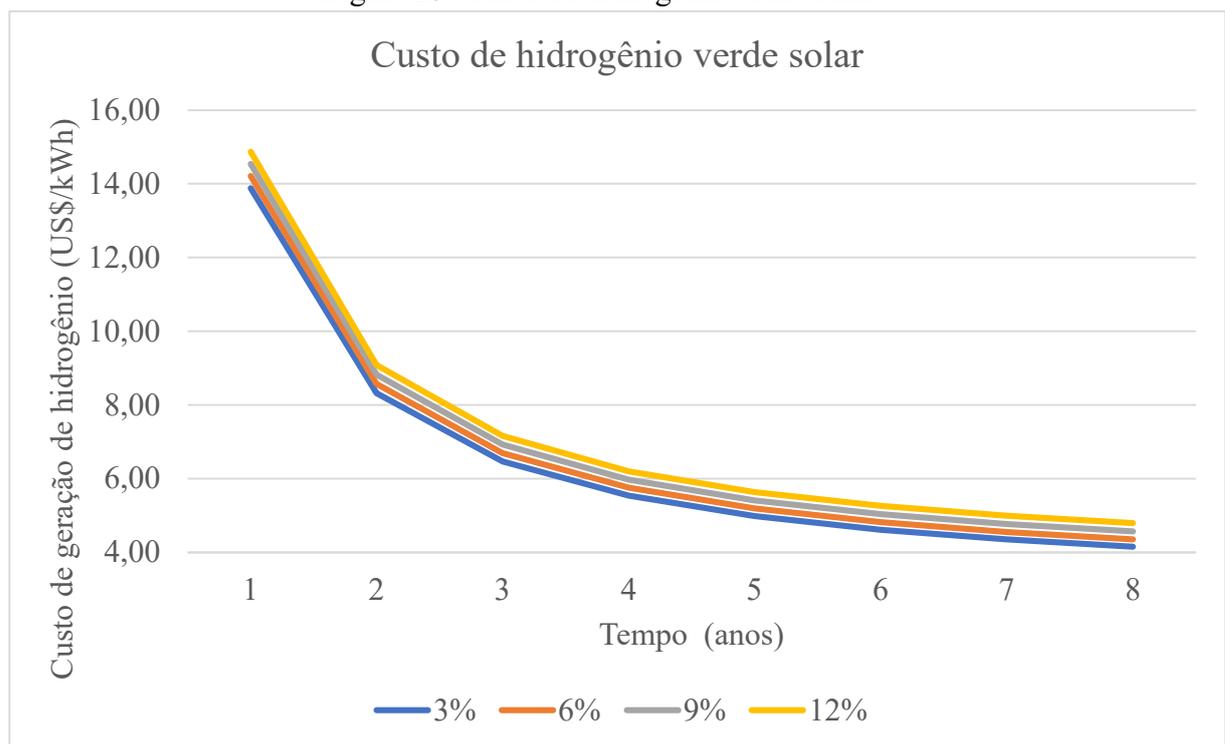
Tabela 16: Parâmetros para cálculo de custo de hidrogênio verde solar

Parâmetro	Valor	Unidade
Investimento da planta	3900,00	US\$
m _{H2}	119,90	kg
m _{H2O}	959,20	kg

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 25 é mostrada a curva de custos da produção de hidrogênio verde solar.

Figura 25: Custo do hidrogênio verde solar



Fonte: Elaboração Própria

Após o período de sete anos, os valores tendem a se estabilizar entre US\$ 4,33 /kWh e US\$ 4,97 /kWh de hidrogênio produzido. Esse valor sofre uma oscilação grande devido à análise de sensibilidade adotada e aos valores dos equipamentos de geração de hidrogênio verde.

5.5.2 Cálculo econômico da produção de hidrogênio verde eólico

Inicialmente são observados na Tabela 17 os parâmetros necessários para o cálculo do custo da geração de hidrogênio verde eólico em função do tempo em anos do fator f e posteriormente o gráfico pela função obtido. Em seguida é mostrado o custo do hidrogênio verde tal qual sua curva.

Os parâmetros tempo de hora por ano (H) e potência do sistema (P_{sistema}). Para a obtenção da torre eólica foi necessário um investimento de US\$ 6800,00, em 26 de julho de 2019.

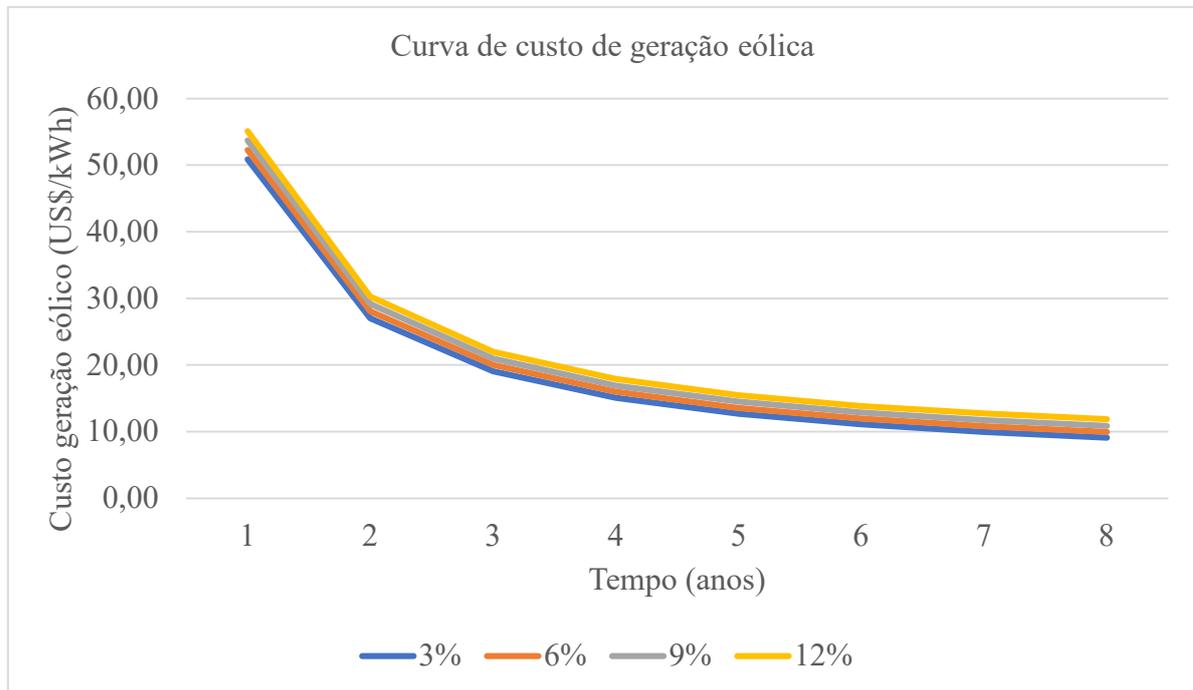
Tabela 17: Parâmetros para determinação de custo de geração de energia elétrica eólica

Parâmetro	Valor	Unidade
Investimento da planta	6800,00	US\$
Taxa energia elétrica	0,19	US\$/kWh
Tempo	3532	h/ano
Potência do sistema	0,032	kW
Potência elétrica do eletrolisador	1	kW

Fonte: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2021); ANEEL (2022)

Os parâmetros da Tabela 17 podem ser utilizados para a determinação da função do custo de geração de energia elétrica em função do tempo em anos, observada na Figura 26.

Figura 26: Curva de custo de geração eólica



Fonte: Elaboração Própria

Após o período de sete anos, aproximadamente, o custo entra em estabilidade, tendo baixa variação, entre US\$ 9,93 /kWh e US\$ 12,69 /kWh. O custo de hidrogênio verde eólico anual é estabelecida com os dados apresentados na tabela 18.

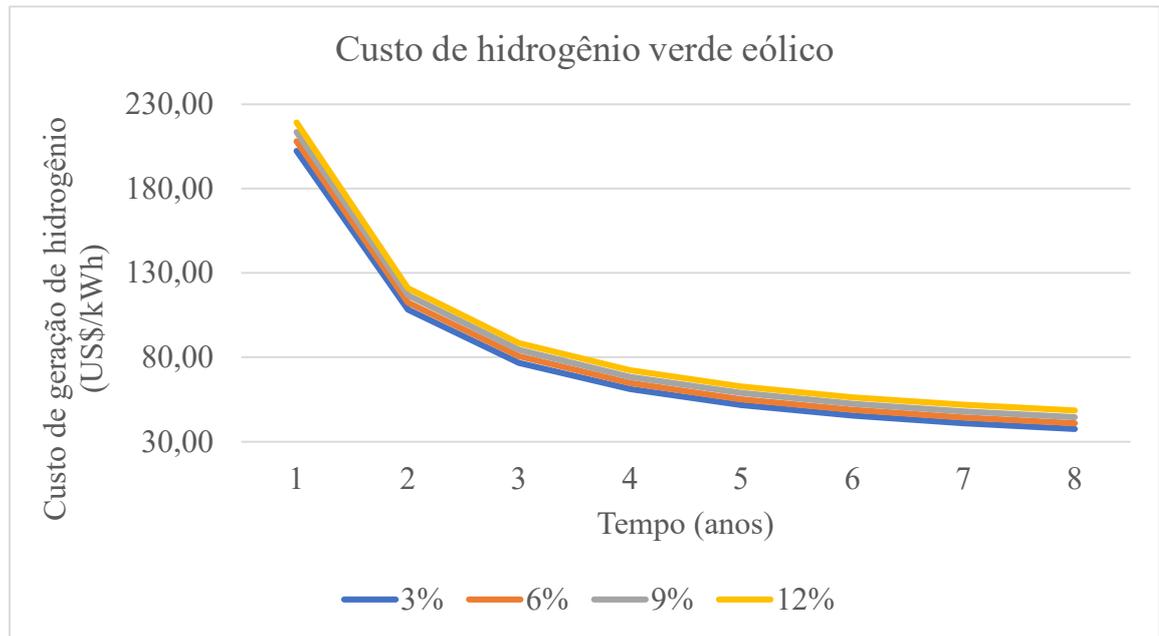
Tabela 18: Parâmetros para cálculo de custo de hidrogênio verde eólico

Parâmetro	Valor	Unidade
Investimento da planta	6800	US\$
mH ₂	13,8	kg
mH ₂ O	110,4	kg

Fonte: Elaboração própria

Com isso, é possível ter a curva de custos do hidrogênio verde eólico, como mostrado na Figura 27.

Figura 27: Custo do hidrogênio verde eólico



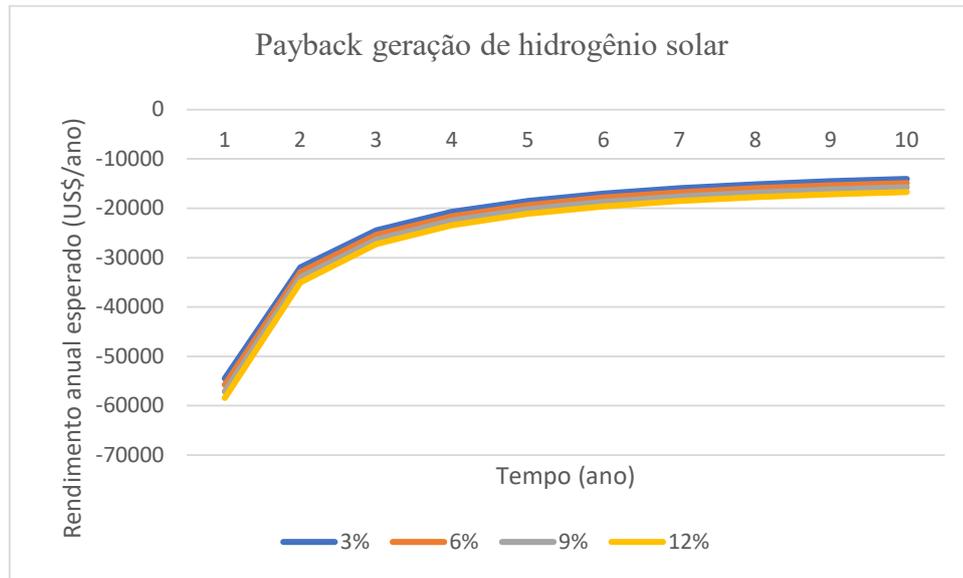
Fonte: Elaboração Própria

São observados valores altos dos custos de produção de hidrogênio verde eólico, o que pode ser deduzido que os baixos índices de ventos e os alto custos dos equipamentos para a produção de hidrogênio verde. A variação de custos é muito alta, entre US\$ 40,92/kWh e US\$ 51,81/kWh.

5.5.3 Cálculo do *payback*

O cálculo do *payback* do SHPH é feito com base nas curvas de custos de geração de energia elétrica solar e eólica. Na Figura 28 é mostrada a curva do *payback* do sistema de geração de energia de fonte solar.

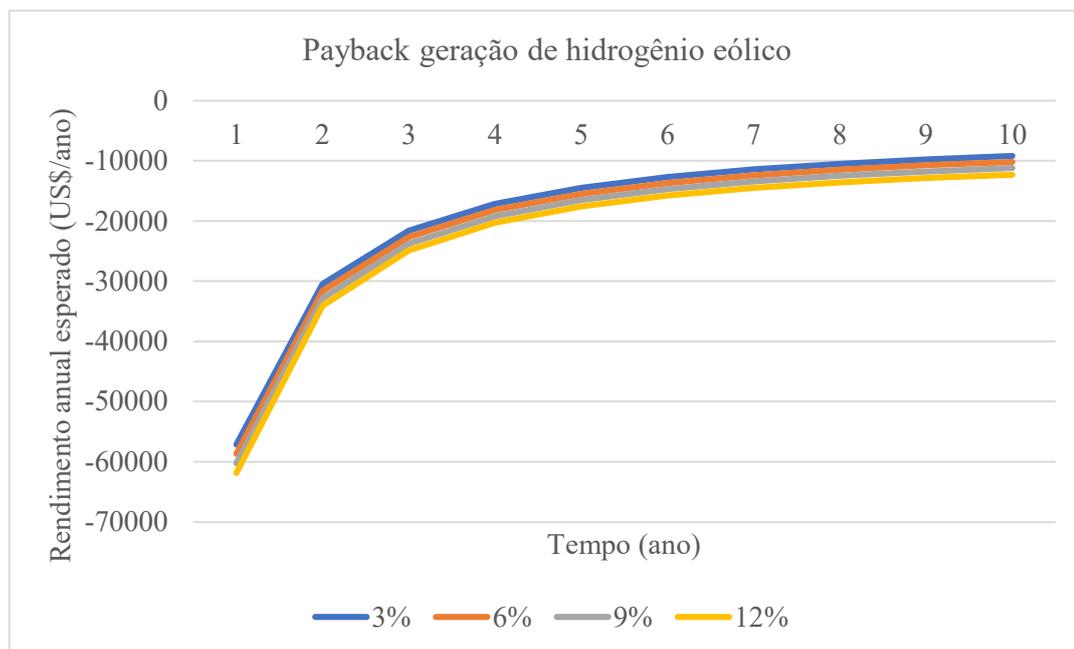
Figura 28: Curva de payback do sistema de geração de hidrogênio verde solar



Fonte: Elaboração Própria

É possível observar que a curva de *payback*, nessas condições, como é mostrado na Figura 28, nunca terá retorno. Isso se deve aos altos custos do eletrolisador e da célula a combustível concomitante com uma baixa produção de hidrogênio. Para tanto, como as condições de geração de hidrogênio verde eólico se mostraram ainda piores que as da geração de hidrogênio verde solar, é esperado um resultado menos interessante, como mostrado na Figura 29.

Figura 29: Curva de payback do sistema de geração de energia eólica



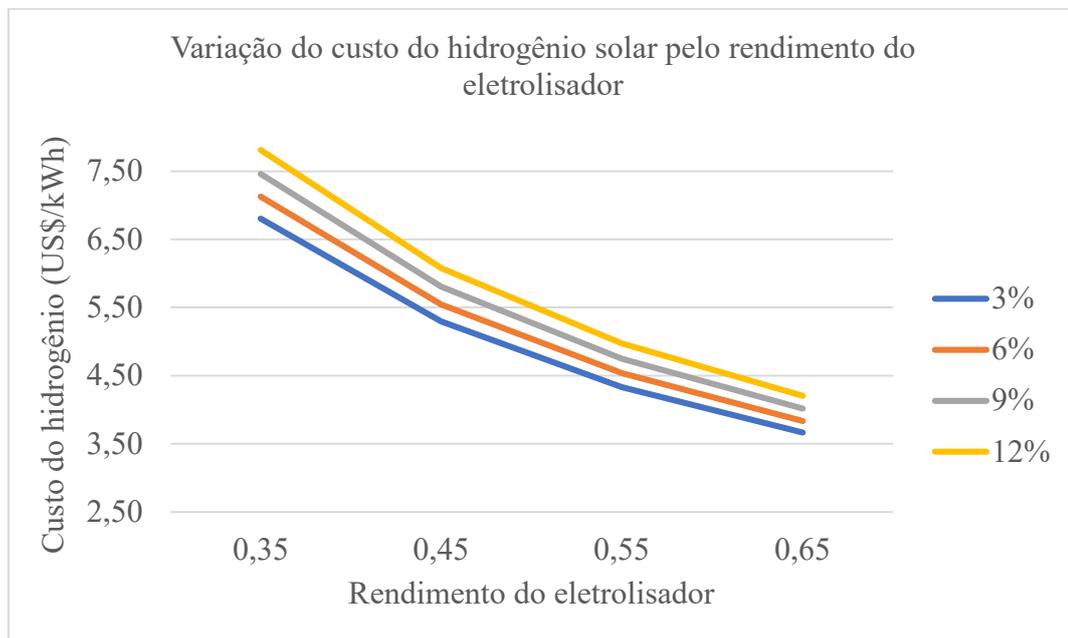
Fonte: Elaboração Própria

A exemplo do *payback* da geração de energia elétrica solar, a geração de energia elétrica eólica não terá retorno devido aos altos custos dos equipamentos de geração de hidrogênio.

5.5.4 Comparação da variação da eficiência do eletrolisador

Como a eficiência do eletrolisador estudado foi adotada em 55% para os cálculos, foi estudada a influência da mesma na produção de hidrogênio verde do SHPH do laboratório do IPBEN – Guaratinguetá, mantendo fixo todos os demais valores. Para isso, foi considerado o mesmo ano de estabilização dos custos do hidrogênio, sete anos, e feita a variação de cada tipo de fonte de energia separadamente. Na Figura 30 é apresentado os custos do hidrogênio verde solar em sete anos com variação de 10% de eficiência.

Figura 30: Variação do custo de hidrogênio solar pelo rendimento do eletrolisador

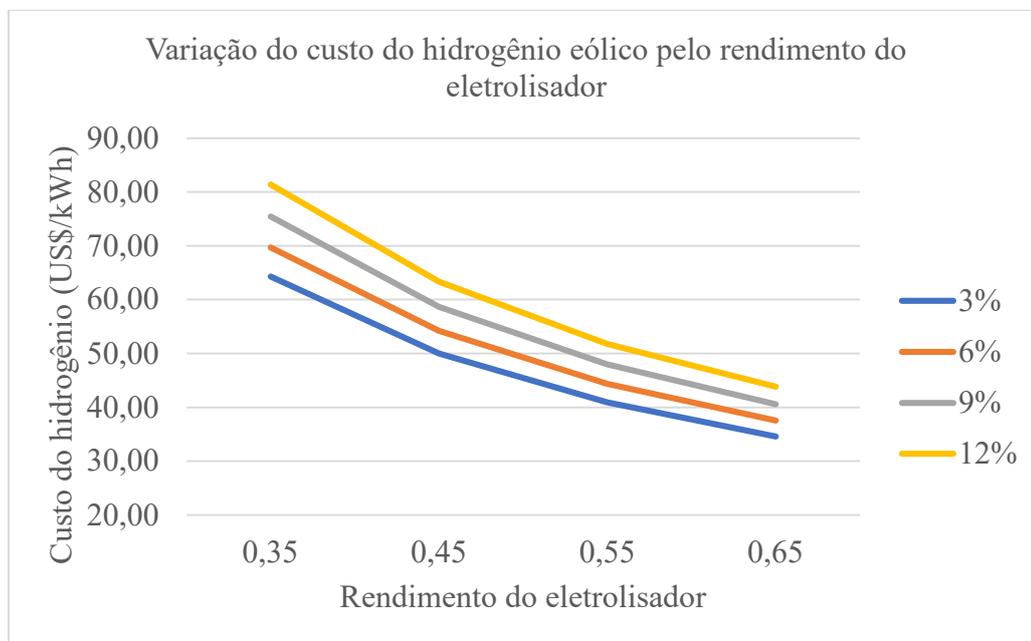


Fonte: Elaboração Própria

Pode-se observar que o decaimento de custo com o aumento de eficiência é linear, gerando menores custos com maiores eficiências. Na figura 30 é possível observar que o maior custo seria com rendimento anual de 12% e eficiência de 35%, tendo um custo de US\$ 7,28/kWh, porém o menor custo, de US\$ 3,41/kWh, é calculado com rendimento anual de

3% e eficiência do eletrolisador de 65%. Na Figura 31 é mostrada a mesma relação, no tempo de sete anos, porém da produção de hidrogênio verde eólico.

Figura 31 - Variação do custo de hidrogênio eólico pelo rendimento do eletrolisador



Fonte: Elaboração própria

Para a variação de custos de hidrogênio eólico em relação ao rendimento do eletrolisador segue a mesma tendência que o estudo mostrado para a variação do hidrogênio solar, porém o maior custo, com o rendimento de 35% e o rendimento anual de 12%, o valor é de US\$ 81,41/kWh e o menor, com rendimento de 65% e rendimento anual de 3%, é de US\$ 34,62/kWh.

6 ANÁLISE AMBIENTAL

Em dezembro de 2019, foi apresentado o Pacto Ecológico Europeu (EUROPEAN COMMISSION, 2022). O *Green Deal*, Acordo Verde, visa superar diferentes desafios, como mudanças climáticas e degradação ambiental. Em 2022, o plano *REPowerEU* para reduzir rapidamente a dependência de combustíveis fósseis e transição verde foi introduzida como parte do *Green Deal*. O hidrogênio vai desempenhar um papel central na fase de transição energética (EUROPEAN COMMISSION, 2022). É necessária então a parametrização do impacto ambiental nas formas de obtenção do hidrogênio.

Na análise ambiental é importante a quantificação do impacto ambiental do sistema e métodos utilizados, visando a determinação da equivalência de gases que o representa. Para determinação de tais parâmetros, Cardu e Baica (1999) realizaram testes com motores de combustão interna e propuseram um indicador de eficiência ecológica, denominado, “Indicador de Poluição”, que é mostrado na equação 56.

$$\varepsilon = [c_e \cdot \varphi(\eta, \pi) \cdot \psi(\pi)]^n \quad (56)$$

Onde

c_e - deve ser calculado pelas condições de contorno;

ε - a eficiência ecológica;

η - rendimento do processo de produção de hidrogênio;

π - indicador de poluição [kgCO_2/MJ];

n - expoente a ser determinado pelas condições de contorno.

Posteriormente, Viola (2015), propôs uma adaptação dos cálculos para serem utilizados em fontes alternativas de energia. A substituição do indicador de poluição π pelo Potencial de Aquecimento Global (PAG) medido em $\text{kgCO}_2/\text{kJH}_2$. Isso foi feito pois o indicador de poluição de energias renováveis não expressa totalmente as medidas no cálculo. Com isso, a equação global fica expressa na equação 57 e o rendimento do sistema é expressa na equação 58.

$$\varepsilon = [c_e \cdot \varphi(\eta, \text{PAG}) \cdot \psi(\text{PAG})]^n \quad (57)$$

$$\eta = \eta_{\text{fonte}} \cdot \eta_{\text{eletr}} \quad (58)$$

Em que o η_{fonte} o rendimento de geração da energia elétrica e η_{eletr} o rendimento do eletrolisador. A eficiência global do sistema é o fator que determina o aproveitamento da energia em dada situação. Com isso, é possível determinar a função φ na equação 59. Assumindo $\psi(\text{PAG})$ tenha o formato da equação 60. (VIOLA, 2015) Assim, é possível estabelecer a eficiência ecológica das fontes renováveis.

$$\varphi = \frac{\eta}{\eta + \text{PAG}} \quad (59)$$

$$\psi = \ln(K - \text{PAG}) \quad (60)$$

Em que K é uma constante a ser determinada. Assim, a eficiência ecológica pode ser determinada pela equação 61.

$$\varepsilon = \left[c_e \cdot \frac{\eta}{\eta + \text{PAG}} \cdot \ln(K - \text{PAG}) \right]^n \quad (61)$$

A determinação dos parâmetros da equação 49, segundo Cardu e Baica (1999), dependem de condições de contorno para se estabelecer os valores de c_e , K e n. Para tal, são estabelecidas as seguintes condições de contorno:

Condição 1: Se $\text{PAG} = 0 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, $\varepsilon = 1$, para qualquer η ;

Condição 2: Se $\text{PAG} = 70,1 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, $\varepsilon = 0$, para qualquer η , sendo esse 10% maior que o PAG do lignito (adaptado VIOLA, 2015)

Condição 3: Se $\text{PAG} = 0,34 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$, $\varepsilon = 0,99$, para $\eta = 0,78$, sendo esses o indicador, eficiência ecológica e eficiência global, respectivamente, da hidrelétrica (BRAGA, 2014).

Na condição 1 é expressa a menor emissão equivalente possível, mostrando a maior eficiência ecológica, evidenciando na equação 60 que $\ln(K - \text{PAG}) = 0$, sendo $K = 71,1$. Tal qual na condição 2, que faz a consideração da maior emissão possível, 110% da emissão de lignito, e a menor eficiência ecológica possível. Com isso, a equação 60 é expressa nos termos da condição 2, $c_e = \frac{1}{\ln(71,1-0)} = 0,235$. Já sabido os valores de c_e e K, a condição 3 possibilita a determinação do valor de $n = 0,0022$, sendo sintetizadas na equação 62.

$$\varepsilon = [0,235 \cdot \frac{\eta}{\eta + \text{PAG}} \cdot \ln(71,1 - \text{PAG})]^{0,028} \quad (62)$$

A equação 61 define a eficiência ecológica do SHPH conforme Poder de Aquecimento Global médio, determinação dos rendimentos individuais e do rendimento do eletrolisador. Nesse trabalho o rendimento do eletrolisador foi adotado como 55,0%.

6.1 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

O cálculo da eficiência ecológica de Cardu e Baica (1999), adaptado para as fontes de energias renováveis, observado na equação 61, depende do Potencial de Aquecimento Global e da eficiência do sistema. Viola (2015), estabeleceu os valores de PAG, como mostrados na Tabela 19.

Tabela 19: Potencial de Aquecimento Global

Fonte de energia Elétrica	PAG médio (kgCO ₂ /kgH ₂)
Eólica	0,68
Solar	2,7
Lignito	63,7

Fonte: VIOLA (2015); GHANDEHARIUN, KUMAR (2016)

Com a incidência mensal G_{FV} e as medidas reais do painel fotovoltaico, foi possível calcular, a partir da Análise Energética, por média ponderada com as horas dos meses do ano, considerando os dois anos, o rendimento real do painel fotovoltaico do IPBEN-Guaratinguetá como $\eta_{FV} = 15,7\%$. Segundo Sherif, Barbir e Verizoglu (2005), a eficiência de uma turbina eólica tem uma variação média de 33 a 38%, raramente passando de 40%. Portanto, será adotado um rendimento eólico médio de $\eta_{eólica} = 35\%$, por semelhança ao C_p adota nos cálculos energéticos. Com isso, é possível determinar a eficiência ecológica de cada processo pela equação 61, como mostrado na Tabela 20.

Tabela 20: Eficiência total e Eficiência ecológica de cada sistema

η_{elet}	η_{solar}	$\eta_{\text{eólica}}$	$\varepsilon_{\text{solar}}$	$\varepsilon_{\text{eólica}}$
55,0%	15,7 %	35,0 %	91,6 %	96,3 %

Fonte: Elaboração Própria

Mesmo com o rendimento do SHPH sendo baixo, a eficiência ecológica solar $\varepsilon_{\text{solar}} = 91,6\%$, o que representa uma alta eficiência ecológica, e a eficiência ecológica eólica $\varepsilon_{\text{eólica}} = 96,3\%$, que representa uma eficiência ecológica ainda maior em relação a solar, o que representa ser um tipo de energia limpa e ter uma geração de energia ecologicamente correta.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou um Sistema Híbrido de Produção de Hidrogênio instalado no laboratório do IPBEN – Guaratinguetá. O sistema opera com fonte de energia elétrica renovável solar fotovoltaica e eólica, caracterizando uma produção de hidrogênio verde. A planta consta além da fonte geradora de energia, com a associação de um eletrolisador, associado a uma célula a combustível e a um reservatório de hidrogênio. Também consta de inversores, e outros periféricos.

A produção de hidrogênio verde solar se mostra mais vantajosa do que a produção de hidrogênio verde eólico nas condições apresentadas, visto que os parâmetros de energia solar fotovoltaicos se mostram satisfatórios e os de energia eólica não para a implantação na cidade de Guaratinguetá.

Do ponto de vista energético, uma comparação dos dados obtidos pelo sistema de medição com os dados foi realizada, se mostrando bastante aceitáveis para uma base comparativa real, dando ênfase à mitigação de carbono fornecida pelo aplicativo ShinePhone; o mesmo aplicativo registra a geração de energia do sistema fotovoltaico. Os dados eólicos estimados também tiveram resultados aceitáveis, tornando a comparação com o sistema solar fotovoltaico possível.

A produção de energia solar fotovoltaica, no período de dois anos, foi registrada como 8073,10 kWh, representando uma produção de hidrogênio verde solar, no mesmo período, de aproximadamente 119,9 kg de hidrogênio, operando numa vazão volumétrica de 0,35 Nm³/h. A produção de energia eólica estimada foi de 565,2 kWh, no período de dois anos, representando uma produção de hidrogênio verde eólico de aproximadamente 9,3 kg, no mesmo período, com uma vazão volumétrica de 0,02 Nm³/h. A massa produzida de hidrogênio verde solar foi de aproximadamente 12,9 vezes maior do que a produção de hidrogênio verde eólico, devido as condições naturais da cidade Guaratinguetá e da tipografia do SHPH.

Os parâmetros econômicos são determinados em função dos parâmetros energéticos calculados, leva em consideração a produção de energia elétrica de cada fonte e a produção de hidrogênio, dependendo dos valores de custos de produção de eletricidade de cada um deles. O custo de produção tanto de eletricidade como de hidrogênio considera taxas de juros de 3%, 6%, 9% e 12%, a fim de fazer uma análise de sensibilidade das medidas, determinando melhores intervalos de custos tanto para sistema solar fotovoltaico quanto para sistema eólico.

A boas condições de sol na cidade e o custo de investimento em equipamento para a geração de energia fotovoltaica tiveram grande influência nos resultados. A eletricidade gerada em sistema fotovoltaico apresentou variação entre US\$ 0,52/kWh a US\$ 0,67/kWh, para um período de amortização de capital de sete anos; enquanto custo de produção de hidrogênio verde solar se situou entre US\$ 4,33 /kWh e US\$ 4,97 /kWh considerando o mesmo período. Após esse período os custos apresentam variações muito pequenas, representando em grande parte, o custo de operação do sistema. No caso da produção de energia eólica esta variou de US\$ 9,93 /kWh e US\$ 12,69 /kWh, também para um período de sete anos, apresentando ainda um custo de hidrogênio verde eólico entre US\$ 40,92/kWh e US\$ 51,81/kWh, para o mesmo período. Os altos valores nos custos de geração de energia eólica e de geração de hidrogênio verde eólico são consequências do baixo rendimento da torre eólica na localidade da instalação e dos altos custos de investimentos associados a planta importada.

O custo da energia elétrica fotovoltaica calculado foi de aproximadamente 18,8 vezes menor que o custo de energia elétrica eólica, em média. Já a produção de hidrogênio verde solar foi calculada como aproximadamente 10,42 vezes menor que a de hidrogênio verde eólico. Com uma tarifa de hidrogênio considerada de US\$ 0,40/kWh (US\$ 13,44/kg), o *payback* da geração de hidrogênio verde fica comprometido, se mostrando inviável nas condições apresentadas.

As eficiências dos sistemas de produção de hidrogênio verde foram calculadas considerando $\eta_{\text{solar}} = 15,7\%$ e $\eta_{\text{eólico}} = 35\%$, e rendimento do eletrolisador de 65%, resultando em 10,2% e 22,8% respectivamente. A eficiência ecológica da produção de hidrogênio verde indicada em base solar foi de $\varepsilon_{\text{solar}} = 91,6\%$ e a indicada eólica foi de $\varepsilon_{\text{eólica}} = 96,3\%$, denotando sistemas ecologicamente corretos, gerando menos impacto ao meio ambiente, apresentando baixo Poder de Aquecimento Global.

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Análise exergética do SHPH;
- Análise com dados coletados reais da geração de energia elétrica de fonte eólica para uma melhor comparação com as estimativas;
- Análise de ciclo de vida do sistema fotovoltaico e do sistema eólico;
- Análise técnica e econômica do aumento de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, com análise de sensibilidade;
- Estudo de *payback* para a venda de hidrogênio molecular;
- Análise ambiental do carbono mitigado do sistema eólico;

- Considerar outras localidades e outras capacidades de geração de hidrogênio verde.

REFERÊNCIAS

- ACAR, C.; BESKESE, A.; TEMUR, G.T. Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 43, p. 18059-18076, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.024>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 47, p. 24136–24154, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>. Acesso em: 18 out. 2022.
- ANEEL, **Ranking da tarifa residencial**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>. Acesso em: 09 ago. 2022.
- AREFEEN, S.; DALLAS, T. Low-cost racking for solar photovoltaic systems with renewable tensegrity structures. **Solar Energy**, Oxford, v. 224, p. 798–807, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.020>. Acesso em: 17 fev. 2023.
- BAHGAT, A.B.G. *et al.* Maximum power point tracking for PV systems using neural networks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 30, p. 1257-1268, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.011>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- BORETTI, A. White is the color of hydrogen from concentrated solar energy and thermochemical water splitting cycles. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 46, p. 20790–20791, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.178>. Acesso em: 18 Out. 2022.
- BRAGA, L. B. **Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/115997>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- BUTTLER, A.; SPLIETHOFF, H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**. Oxford, v. 82, p. 2440–2454, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- CAMPOS, V. A. F. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais de sistemas híbridos aplicados em edificações familiares e propriedades rurais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183561>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- CAMPOS, V. A. F; SILVEIRA, J. L. Technical and economic analyses of a photovoltaic plant on a garage structure. *In*: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 13., Santiago. **Anais [...]**. Santiago, 2019.

CANADIAN SOLAR INC. **PV module product datasheet 325~350W**, Ontario: Canadian Solar Inc, 2016.

CARDU, M; BAICA, M. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, London, v. 40, p. 1569-1575, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00041-2). Acesso em: 20 jan. 2020.

CHEN, X. M. *et al.* General method to obtain recommended tilt and azimuth angles for photovoltaic systems worldwide. **Solar Energy**, Oxford, v. 172, p. 46-57, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.045>. Acesso em: 15 nov. 2022.

CHOE, C. *et al.* Critical aspect of renewable syngas production for power-to-fuel via solid oxide electrolysis: integrative assessment for potential renewable energy source. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 161, 112398, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112398>. Acesso em: 20 out. 2022.

CRESESB. **Energia eólica: Princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 18 set. 2020.

CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 18 set. 2020.

CRESESB. **Potencial eólico: atlas do potencial eólico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico. Acesso em: 18 set. 2020.

DUFOUR, J. *et al.* Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources. **Internacional Journal of Hydrogen Energy**. London, v. 37. p. 1173–1183, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.135>. Acesso em: 18 out. 2022.

ELETRÔNICA PT. **Energia solar**. [S.l., 2022]. Disponível em: <https://www.electronica-pt.com/energia-solar>. Acesso em: 03 out. 2022.

ENEL. **Impostos e outros encargos**. São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/impostos-e-outros-encargos.html. Acesso em: 13 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **European green deal**, Brussels, 2022. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>. Acesso em: 13 out. 2022.

FLOYD, T.L. **Electronic devices: electron flow version**, 9 ed., London: Pearson, 2011.

GHANDEHARIUN, S.; KUMAR, A. Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in western Canada. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 41,

p. 9696–9704, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.077>. Acesso em: 25 jul. 2022.

GIPE, P. **Wind power: renewable energy for home, farm and business**. Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 2004.

GWL. **Wind turbine grid inverter: installation and operation manual**. Prague: GWL a.s., [2019]. Disponível em: https://files.gwl.eu/inc/_doc/attach/StoItem/5049/Manual_Inverter_Instalation_EN.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

HENKENSMEIER, D. *et al.* Overview: state-of-the art commercial membranes for anion exchange membrane water electrolysis. **Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage**, New York, v. 18, p. 1-46, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4047963>. Acesso em: 17 fev. 2023.

HOWARTH, R.W.; JACOBSON, M.Z. How green is blue hydrogen? **Energy Science & Engineering**, Oxford, v. 9, p. 1676–1687, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ese3.956> Acesso em: 10 jun. 2022

IEA. **The COVID pandemic has slowed progress towards sustainable energy goals even as renewables continue to gain ground**. Paris: International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/news/the-covid-pandemic-has-slowed-progress-towards-sustainable-energy-goals-even-as-renewables-continue-to-gain-ground>. Acesso em: 15 set. 2022.

IEA. **Global hydrogen review 2021**. Paris: International Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Acesso em: 15 set. 2022.

IRENA. **Green hydrogen: a guide to policy making**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 13 dez. 2022.

KHAN, M.A. *et al.* Recent progresses in electrocatalysts for water electrolysis. **Electrochemical Energy Review**, Warsaw, v. 1, p. 483–530, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41918-018-0014-z#citeas>. Acesso em: 18 fev. 2023.

KHOULOU, B.; TAHAR, B.; HICHEM, M. Wind characteristics analysis and application of control strategy for wind system based on direct power control. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, Yogyakarta, v. 13, n. 3, p. 1721-1733, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1721-1733>. Acesso em: 17 nov. 2022.

KOTOWICZ, J. *et al.* Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy. **Energy**, London, v. 118, p. 156–171, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.148>. Acesso em: 20 jan. 2022.

KNIER, G. **How do photovoltaics works?**, *In*: NASA Science, [Washington], 2008. Disponível em: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>. Acesso em: 21 jan. 2020.

- KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/pt-br.php>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- KROPOSKI, B. *et al.* Electrolysis: information and opportunities for electric power utilities. **National Renewable Energy Laboratory**, Golden, v. [s.n.], 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/892998>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- LARANCI, P.; SILVEIRA J.L.; LAMAS W.Q. Solar 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project. **Exacta**, São Paulo, v.10, n. 1, p 58-69, 2012. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/2890/2243>. Acesso em: 30 jan. 2020.
- LIPONI, A. *et al.* Impact of wind speed distribution and management strategy on hydrogen production from wind energy. **Energy**, London, v. 256, 124636, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124636>. Acesso em: 28 jun. 2022.
- MELO, L. S. *et al.* **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para alimentar um sistema de produção de hidrogênio eletrolítico**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais[...]**. Gramado: COBENS 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/107/107>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- MICENA, R. P. **Estação de produção e abastecimento de hidrogênio solar: análise técnica e econômica**. 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Energia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/192426>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- MOURA, C. H. S.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q. Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: a technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 45, p. 31585-31598, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.198>. Acesso em: 08 jul. 2022.
- MOHSIN, M.; RASHEED, A.K.; SAIDUR. R. Economic viability and production capacity of wind generated renewable hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 43, p. 2621-2630, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.113>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- NANTONG R&X ENERGY TECHNOLOGY. **User manual: H model 2000W vertical axis wind 91 generator**, Jiangsu, 2019.
- NECHACHE, A., HODY, S. Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: a short review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 149, 111322, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111322>. Acesso em: 17 fev. 2023.
- PENG, H.Y.; LIUS, H.J.; YANG, J.H. A review on the wake aerodynamics of H-rotor vertical axis wind turbines. **Energy**, Oxford, v. 232, 121003, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121003>. Acesso em: 08 out. 2022.

- PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**, 2 ed., São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 15 set. 2022.
- REHMAN, S. *et al.* A review of energy extraction from wind and ocean: technologies, merits, efficiencies, and cost. **Ocean Engineering**, Oxford, v. 267, 113192, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113192>. Acesso em: 18 fev. 2023.
- ROBALINHO, E.; SANTOS, K. A. Célula a combustível tipo PEMFC: energia renovável e eficiente. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 13, nº. 3, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/18059>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- ROBERTS, J. J. **Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/99329>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- ROBERTS, J. J. ; PRADO, P. O. Evaluación del potencial de generación de energía eólica en el partido de general pueyrredon. *In*: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 9., Mar del Plata, Argentina. **Anais [...]**. Mar del Plata, Argentina. 2011.
- RODRIGUES, R. P. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL ÉTNICO RACIAL, 7., 2019, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande, 2019. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607. Acesso em: 22 nov. 2022.
- RODRÍGUEZ, C.R. *et al.* Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Cordoba, Argentina, from wind resources. **International Journal of Hydrogen Energy**, London v. 35, p. 5952-5956, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.101>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- RUIZ, J.M; **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Energia, UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/143418>. Acesso em: 20 de jan.2020.
- SACRAMENTO, E.M. *et al.* A hydrogen energy system and prospects for reducing emissions of fossil fuels pollutants in the Ceara state – Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v.33, p 2132-2137, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.018>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- SAEG. **Das tarifas de água e esgoto ii**: categoria residencial. Guaratinguetá, 2022. Disponível em: <https://saeg.net.br/tarifas/>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- SANTOS, D. M. F., SEQUEIRA, A.C.C., FIGUEIREDO J, L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, Dartmouth, v. 36, p. 1176–1193, 2013.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800017>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SCHMIDT, O. *et al.* Future cost and performance of water electrolysis: an expert elicitation study. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 42, p. 30470–30492, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>. Acesso em: 21 jan. 2020.

SEPULVEDA, T.T; MARTINEZ, L. Optimization of a hybrid energy system for an isolated community in Brazil. **International Journal of Renewable Energy Research**, Ankara, v. 6, p. 1476-1481, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i4.4724.g6936>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SHEN, F.; WANG, R.; TUCKER, M.C. Long term durability test and postmortem for metal-supported solid oxide electrolysis cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 474, 228618, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228618>. Acesso em: 18 fev. 2023.

SILVA, E. P. **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio**. Campinas: Unicamp, 1991.

SILVEIRA, J. L. Energia: crise e planejamento. **Com Ciência**. São Paulo, 2001. Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/energiaeletrica/energia13.htm>. Acesso em: 21 jan. 2020.

SHARMA, D.; MEHRA, R.; RAJ, B. Comparative analysis of photovoltaic technologies for high efficiency solar cell design. **Superlattices and Microstructures**, London, v. 153, 106861, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106861>. Acesso em: 17 fev. 2023.

SHERIF, S.A; BARBIR, F; VEZIROGLU, T.N. Wind energy and the hydrogen economy – review of the technology. **Solar Energy**, Oxford, v. 78, p. 647-660, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.01.002>. Acesso em: 20 jan. 2022.

SHIVA KUMAR, S., HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – a review. **Material Science for Energy Technologies**. Beijing, v. 2, p. 442–454, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002> Acesso em: 17 fev. 2023.

SHIVA KUMAR, S., HIMABINDU, V. Boron-doped carbon nanoparticles supported palladium as an efficient hydrogen evolution electrode in PEM water electrolysis. **Renewable Energy**, Oxford, v. 146, p. 2281–2290, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.068>. Acesso em: 17 fev. 2023.

SMITH, R.P. *et al.* Introduction to semiconductor processing: fabrication and characterization of p-n junction silicon solar cells. **American Journal of Physics**, Melville, v. 86, p. 740–746, 2018. Disponível em: <https://aapt.scitation.org/doi/pdf/10.1119/1.5046424>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SRINIVASAN, S.; OGDEN, J. **Fuel cells: from fundamentals to applications**. New York: Springer, p. 375 – 438, 2006.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Relatório universal final IPBEN – Guaratinguetá**, Processo CNPq nº 424899/2016-7, Guaratinguetá, 2021.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen: a focus on acidification and renewable hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 44, p. 19426–19433, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.101>. Acesso em: 17 out. 2022.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**, 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

VIOLA, L.; **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. 2015. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Elétrica) Departamento de Energia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123056>. Acesso em: 20 jan. 2020.

WANG, S. *et al.* Defect engineering assisted support effect: IrO₂/N defective g-C₃N₄ composite as highly efficient anode catalyst in PEM water electrolysis. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 419, 129455, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129455>. Acesso em: 18 jan. 2022.

WANG, J. *et al.* Flexible and wearable fuel cells: a review of configurations and a applications. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 551, 232190, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232190>. Acesso em: 17 out. 2022.

WHOLE WIN (BEIJING) MATERIALS SCI. & TECH. CO., LTD., **Operation manual: for QL-2000 hydrogen generators**. Beijing, China, 2019.

XUAN, H.A. *et al.* Use of hybrid MCDM methods for site location of solar-powered hydrogen production plants in Uzbekistan. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v.52, 101979, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101979>. Acesso em: 25 jan. 2022.

YANG, G., *et al.* A novel PEMEC with 3D printed non-conductive bipolar plate for low-cost hydrogen production from water electrolysis. **Energy Conversion and Management**, London, v. 182, p. 108–116, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.046>. Acesso em: 18 mai. 2001.

YODWONG, B. *et al.* AC-DC converters for electrolyzer applications: state of the art and future challenges. **Electronics**, Basel, v. 9, n. 6, 912, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics9060912>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ANEXO A – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE IRRADIÂNCIA TEÓRICA

Segundo Bakieri (2009) apud. Chen *et al.* (2018) o ângulo solar zenital pode ser calculado pela equação 63.

$$\cos \theta_z = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \varphi + \operatorname{cos} \varphi \operatorname{cos} \delta \operatorname{cos} \omega \quad (63)$$

Em que φ a latitude local e ω o ângulo horário. A declinação solar δ pode ser calculada conforme equação 64 (DUFFIE e BECKMAN, 2013, apud CHEN *et al.*, 2018).

$$\delta = 180 [0,006918 - 0,399912 \operatorname{cos} B_s + 0,070257 \operatorname{sen} B_s - 0,006758 \operatorname{cos}(2B_s) + 0,000907 \operatorname{sen}(2B_s) - 0,002697 \operatorname{cos}(3B_s) + 0,00148 \operatorname{sen}(3B_s)] \div \pi \quad (64)$$

Onde B_s pode ser calculado conforme equação 65, se considerar d os dias euclidianos.

$$B_s = 360 \times (d - 1) / 365 \quad (65)$$

Ainda segundo Duffie e Beckman (2013) apud. Chen *et al.* (2018), é possível determinar o ângulo de incidência da radiação direta no Plano do Arranjo (PDA) conforme equação 66.

$$\begin{aligned} \cos \theta_b = & \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \varphi \operatorname{cos} \beta - \operatorname{sen} \delta \operatorname{cos} \varphi \operatorname{sen} \beta \operatorname{cos} \gamma + \operatorname{cos} \delta \operatorname{cos} \varphi \operatorname{cos} \beta \operatorname{cos} \omega + \\ & \operatorname{cos} \delta \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \beta \operatorname{cos} \gamma \operatorname{cos} \omega + \operatorname{cos} \delta \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \omega \end{aligned} \quad (66)$$

Sendo β a inclinação do módulo FV em relação à horizontal e γ o ângulo azimutal. Os parâmetros a_{cs} e b_{cs} referentes ao método de Perez *et al.* (1990) apud. Chen *et al.* (2018) são dados pelas equações 67 e 68.

$$a_{cs} = \operatorname{Max} (0, \cos \theta_b) \quad (67)$$

$$b_{cs} = \operatorname{Max} (\cos 85^\circ, \cos \theta_b) \quad (68)$$

Os parâmetros A_m , B_m e C_m foram determinados por Bakirei (2009), conforme exposto na Tabela 21.

Tabela 21: Constantes mensais A_m , B_m e C_m

Mês	A_m (W/m ²)	B_m	C_m
Janeiro	1229,475	0,142	0,058
Fevereiro	1213,713	0,144	0,060
Março	1185,340	0,156	0,071
Abril	1134,900	0,180	0,097
Mai	1103,375	0,196	0,121
Junho	1087,613	0,205	0,134
Julho	1084,460	0,207	0,136
Agosto	1106,528	0,201	0,122
Setembro	1150,663	0,177	0,092
Outubro	1191,645	0,160	0,073
Novembro	1220,018	0,149	0,063
Dezembro	1232,628	0,142	0,057

Fonte: Bakirei (2009) apud Campos (2017)