



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FARIAS PIMENTEL

**PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE PARA
ABASTECIMENTO DA FROTA DE ÔNIBUS NA CIDADE DE SOBRAL**

SOBRAL

2023

LUCAS FARIAS PIMENTEL

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE PARA
ABASTECIMENTO DA FROTA DE ÔNIBUS NA CIDADE DE SOBRAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Campus de Sobral
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do grau
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profa. Dra. Vanessa Siqueira
de Castro Teixeira.

SOBRAL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P699p Pimentel, Lucas.
PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE PARA ABASTECIMENTO DA
FROTA DE ÔNIBUS NA CIDADE DE SOBRAL / Lucas Pimentel. – 2023.
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira.

1. Hidrogênio Verde. I. Título.

CDD 621.3

LUCAS FARIAS PIMENTEL

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE PARA
ABASTECIMENTO DA FROTA DE ÔNIBUS DA CIDADE DE SOBRAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Campus de Sobral
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do grau
bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 06 / 12 / 2023 .

BANCA EXAMINADORA

Professora Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Francisco Gean Dias da Silva Filho
Engenheiro Eletricista

Professor Dr. Adson Bezerra Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus e a minha família, principalmente a minha mãe, namorada, avó, irmã, irmão e meu padrasto, por todo o apoio, todo o amor e toda a força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À Deus, pelo dom da vida e por guiar meus passos.

À minha mãe, Maria Veridiana, pelo apoio em todos os momentos e por me proporcionar todas as condições possíveis para possibilitar a minha formação.

À minha avó, Maria Vilani, pelo grande incentivo, cuidado e ajuda que teve a mim durante todo o período de faculdade.

À minha namorada, Amanda Livia, pelo total apoio e encorajamento.

À minha orientadora, professora Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira, por ter me orientado com tanta paciência e dedicação, possibilitando-me chegar à reta final.

Agradeço a todos que, de alguma forma, estiveram presentes nesse longo percurso, me ajudando com palavras de incentivo e carinho.

“Ó mestre, fazei que eu procure mais
Consolar que ser consolado
Compreender que ser compreendido
Amar que ser amado
Pois é dando que se recebe
É perdoando que se é perdoado
E é morrendo que se vive
Para a vida eterna.”

(Fagner)

RESUMO

Os combustíveis fósseis foram de grande ajuda para o desenvolvimento da sociedade em que vivemos, porém, trouxe junto com seu uso um aumento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, causando uma aceleração no aumento das temperaturas globais e impactando fortemente no efeito estufa. Para minimizar esses danos a sociedade propõe uma transição energética a fim de emitir menos gases do efeito estufa, esse trabalho propõe a aplicação do Hidrogênio sustentado por Energia Renovável para a diminuição da emissão de gases do efeito estufa no setor de transporte da cidade de Sobral, no Brasil, a partir da substituição dos ônibus coletivos movidos a diesel por ônibus com célula de combustível movidos a hidrogênio. Para atender a nova frota de ônibus é necessário uma produção de 457,38 kg por dia do gás hidrogênio, onde passa por diversos processos até ser abastecido pelos 21 ônibus. Todo o sistema de produção, armazenamento e abastecimento necessita de uma energia total 27754 kWh por dia, com isso foi dimensionado um Parque Solar que atende a essa demanda. Por fim, foi feita uma análise econômica que mostrou um Payback negativo ao final de 20 anos, principalmente pelo alto custo dos ônibus movidos a célula de combustível de hidrogênio, porém são tecnologias que tendem a diminuir seu preço ao passar dos anos, essa troca é compensatória pois é muito grande a quantidade de componentes nocivos que se lança anualmente na atmosfera da ordem de toneladas.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Gases do Efeito Estufa. Ônibus movidos a hidrogênio.

ABSTRACT

Fossil fuels were of great help to the development of the society in which we live, but with their use they brought an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, causing an acceleration in the increase in global temperatures and strongly impacting the greenhouse effect. To minimize this damage, society proposes an energy transition in order to emit fewer greenhouse gases. This work proposes the application of Hydrogen supported by Renewable Energy to reduce greenhouse gas emissions in the transport sector of the city of Sobral, in Brazil, by replacing diesel-powered public buses with fuel cell buses powered by hydrogen. To serve the new bus fleet, it is necessary to produce 457.38 kg per day of hydrogen gas, which goes through several processes until it is supplied by the buses. The entire production, storage and supply system requires a total of 27,754 kWh of energy per day, so a Solar Park was designed to meet this demand. Finally, an economic analysis was carried out which showed a negative Payback at the end of 20 years, mainly due to the high cost of buses powered by hydrogen fuel cells, but these are technologies that tend to reduce their price over the years and the change pays off. as the amount of harmful components that are released into the atmosphere annually is very large and amounts to tons.

Keywords: Green Hydrogen. Greenhouse gases. Hydrogen-powered buses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Emissão na Produção de Combustível e Processos Industriais	15
Figura 2 - Fontes e Cores do Hidrogênio	18
Figura 3 - Projetos de Hidrogênio Verde Anunciados no Brasil.....	20
Figura 4 - Produção de Hidrogênio	21
Figura 5- Eletrólise por Óxido Sólido	22
Figura 6 - Diagrama da Eletrólise Alcalina	23
Figura 7- Eletrolisador Alcalino Nel Hydrogen	24
Figura 8- Diagrama da Eletrólise PEM	25
Figura 9- Eletrolisador PEMEC	25
Figura 10 - Diagrama de um Compressor a Pistão de Dois Estágios	26
Figura 11- Veículo Movido a Célula de Combustível.....	28
Figura 12- Célula Fotovotaica	29
Figura 13 - Diagrama de uma Turbina de Eixo Horizontal.....	33
Figura 14 - Nacele e seus Componentes.....	34
Figura 15- Urbino 12 Hydrogen	35
Figura 16- Diagrama com os Principais Componentes de uma Estação	37
Figura 17 - Estação de Eletrólise MC250.....	38
Figura 18 - Compressor Haug.Sirius 33G	39
Figura 19 - Dados de irradiação média solar da Cidade de Sobral.....	42
Figura 20- Estação de Inversão SIW750-3.1-600	42
Figura 21 - Projeto de Instalação da Estação de Eletrólise.....	47
Figura 22- Diagrama Inversor SIW750-3.1-600	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Top 5 Países Emissores de GEE's por Transporte	14
Gráfico 2 - Geração e Carga de uma Unidade Consumidora	32
Gráfico 3- Produção Média Anual de Energia V150	41
Gráfico 4- Distribuição de Weibull para a cidade de Sobral.....	49
Gráfico 5- Produção Média Anual de Energia V126	49
Gráfico 6 - Produção Média Anual de Energia V90	50
Gráfico 7 - Comparação dos Combustíveis ao longo de 20 anos.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais dados Aerogerador V150-4.2MW IEC S	40
Tabela 2 - Dados da Central de Inversão SIW750-3.1-600.....	43
Tabela 3- Dados Placa Solar 665-LP210-M-66-MH.....	43
Tabela 4 - Tabela de Custos	44
Tabela 5- Quantificação Econômica dos Gases do Efeito Estufa	45
Tabela 6 - Energia e Água necessárias para o Eletrolisador.....	46
Tabela 7- Custos de Aquisição	51
Tabela 8 - Custo dos GEE's	52

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ABH ₂	Associação Brasileira do Hidrogênio
CIPP	Complexo Industrial Porto Pecém
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COP26	26 Conferência das Nações Unidas
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
GEE's	Gases do Efeito Estufa
H ₂	Gás Hidrogênio
HSP	Horas Soalr Pico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
NO _x	óxidos de Nitrogênio
NOCT	Nominal Operation Temperature of Cell
O ₂	Gás Oxignio
ONS	Operador Nacional do Sistema
PEM	Proton- Exchange Membrane
PEMEC	Proton- Exchange Membrane Eletrolysis
SAAE	Serviço Autnomo de água e Esgoto
STC	Standart Test Conditions
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	A CADEIA DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO.....	17
2.1	O Hidrogênio	17
2.1.1	<i>O Hidrogênio no Brasil</i>	18
2.2	Produção do Hidrogênio por meio da Eletrólise	21
2.2.1	<i>Tipos de Eletrólise</i>	22
2.2.1.1	<i>Óxido Sólido</i>	22
2.2.1.2	<i>Alcalina</i>	22
2.2.1.3	<i>Membrana de Eletrólito Polimérica</i>	24
2.3	Processo de Compressão	25
2.4	Armazenamento de Hidrogênio.....	26
2.5	Veículo a Célula de Combustível	27
3	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	29
3.1	Energia Solar	29
3.2	Energia Eólica.....	32
4	METODOLOGIA	35
4.1	A Cidade de Sobral.....	35
4.2	Dimensionamento do Sistema	36
4.2.1	<i>Estação de Eletrólise</i>	37
4.2.2	<i>Compressor</i>	38
4.2.3	<i>Estação de Reabastecimento</i>	39
4.2.4	<i>Tanque de Armazenamento</i>	40
4.3	Parque Eólico.....	40
4.4	Parque Solar.....	41
4.5	Viabilidade Econômica.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Estação de eletrólise	46
5.2	Compressor.....	47
5.3	Estação de Reabastecimento.....	47
5.4	Tanque de Armazenamento	48
5.5	Planta de Geração Eólica.....	48
5.6	Planta de Geração Solar.....	50
5.7	Viabilidade Econômica.....	51
6	CONCLUSÕES.....	54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
----------------------------------	----

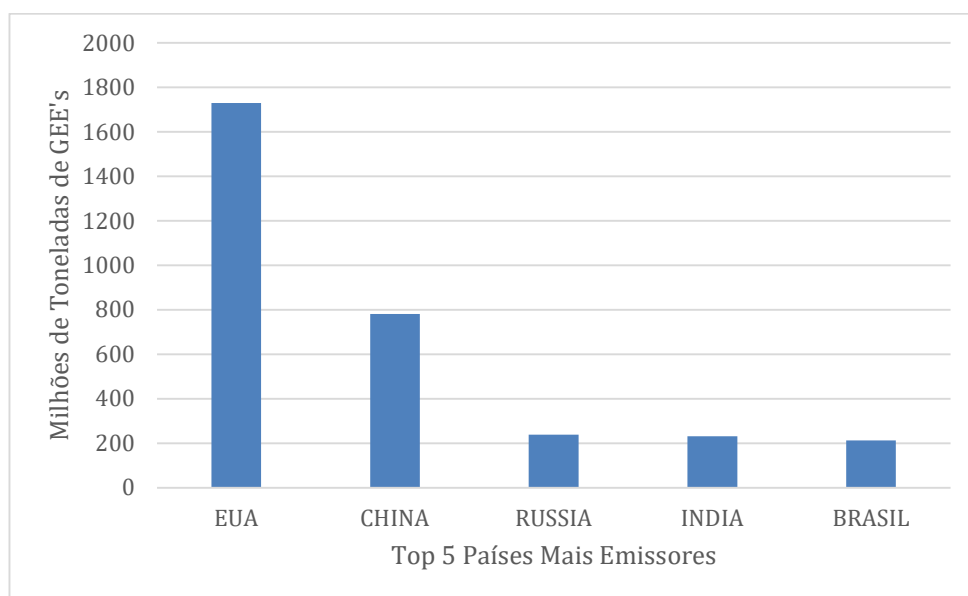
1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XIX foi criada uma das maiores invenções que atingiria todo o planeta: o motor a combustão interna. O uso dessa nova tecnologia inovaria o meio de transporte, Nikolaus August Otto e posteriormente Rudolf Diesel foram os principais responsáveis pelo motor com ciclo Otto e o motor a Diesel, no entanto a humanidade não imaginaria que essas formas de propulsão seriam detentoras de grande parte da emissão de gases do efeito estufa (GEE's) algumas décadas a frente.

O dióxido de carbono (CO₂), principal gás do efeito estufa, atingiu o valor médio de 410 ppm no ano de 2019. No período pré-industrial, período que simboliza o equilíbrio dos gases no mundo, apresentava valores de 278 ppm do dióxido de carbono presente naturalmente na atmosfera em pequena concentração. Isso mostra um aumento de 147% no nível natural do dióxido de carbono, que simboliza 66% dos Gases do Efeito Estufa. (PAULA, 2022).

Cerca de 14% das emissões anuais de GEE's no mundo vem do setor de transporte (WRI BRASIL, 2019), o gráfico 1 mostra os cinco maiores países emissores, considerando apenas o transporte no ano de 2019.

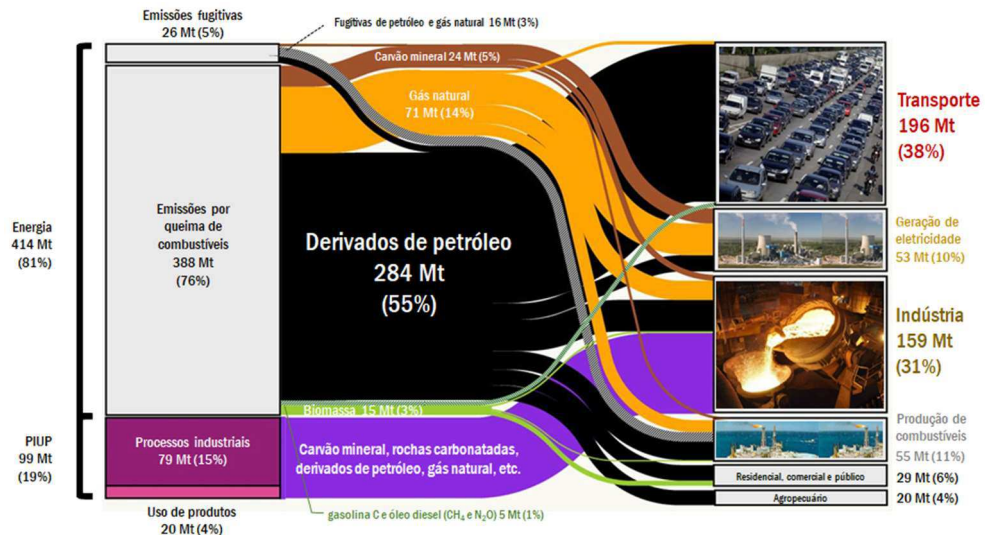
Gráfico 1 – Top 5 Países Emissores de GEE's por Transporte



Fonte: Adaptado de Shiyong e Mengpin, 2019

O Brasil emitiu no ano de 2019 o total de 2,2 bilhões de toneladas de gases do efeito estufa de acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente. Desse total o setor de transporte contribuiu com a emissão de 196 milhões de toneladas de GEE's, isso equivale a 9,12% de toda a emissão. A Figura 1 mostra os principais combustíveis responsáveis pela emissão em suas finalidades. (IEMA, 2020).

Figura 1- Emissão na Produção de Combustível e Processos Industriais



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2020

Na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, ocorrida em 2021, um dos principais temas abordados foi a emissão de gases do efeito estufa no setor de transporte. Foi proposto uma transição no transporte coletivo e no combustível utilizado, onde 100 governos nacionais assinaram a Declaração de Glasgow que trata de carros e ônibus com zero emissão.

Com toda essa preocupação em relação ao meio ambiente e ao efeito estufa, os veículos com motores elétricos vêm ganhando grande notoriedade, onde cada vez mais se vê novas tecnologias que podem se tornar a solução para esse problema.

O veículo movido a célula de energia, tendo como combustível o hidrogênio aliado a energias renováveis, tem potencial para auxiliar na resolução desse problema, porém, é uma tecnologia nova e com alto valor de implementação.

Esse problema pode ser contornado com inclusão de políticas públicas, como a cidade escocesa de Aberdeen que inaugurou a primeira frota de ônibus movida a hidrogênio verde no mundo no ano de 2021, tendo em vista a diminuição de 1 kg de CO₂

por quilômetro rodado, e São Paulo que fez o lançamento de um projeto de produção de hidrogênio a partir do etanol para abastecer três ônibus coletivos públicos movidos a célula de combustível de hidrogênio verde, que deve entrar em operação até o fim de 2024.

Levando em consideração que utilizando o Hidrogênio aliado com energias renováveis para sua produção, toda a cadeia de transporte pode ser descarbonizada. Baseado nisso, esse trabalho propõe a substituição do transporte público da cidade de Sobral com o objetivo de reduzir a emissão de gases do efeito estufa desse setor, levando em consideração a troca da frota de ônibus movidos a combustíveis fósseis por veículos com propulsão elétrica baseados em células de combustível, com a utilização de Hidrogênio Verde.

Foram definidos os objetivos para a concretização desse trabalho:

- Dimensionar o sistema de produção de Hidrogênio, incluindo a compressão, armazenamento e forma de abastecimento.
- Dimensionar um Parque Eólico e um Parque Solar, com capacidade de geração suficiente a fim de abastecer a cadeia de produção de hidrogênio e escolher entre os dois qual melhor serviria para instalação na cidade de Sobral.
- Analisar a substituição dos ônibus de forma econômica, avaliando os custos e impactos ambientais.

2 A CADEIA DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

2.1 O Hidrogênio

O hidrogênio é um gás inodoro e incolor e o elemento mais abundante do universo, pelo seu poder de combustão o mesmo possui várias aplicações sendo algumas delas: produção de amônia, metanol, peróxido de hidrogênio, polímeros e solventes, hidrogenação de gorduras e óleos, produção de vitaminas, produção de produtos farmacêuticos, desencadeador de processos químicos, agente redutor na produção e tratamento do aço, fabricação de vidros, soldagens, fonte de energia para células de energia, estocar energia no excesso de produção de energia solar e eólico, entre outras aplicações. (WHITE MARTINS, 2023).

Com a certa dificuldade de encontrar o gás hidrogênio puro na natureza, a humanidade encontrou formas de extração, essas formas são catalogadas em cores e cada uma tem suas particularidades como: a fonte da matéria prima para dar energia ao processo ou a própria forma de extração. De acordo com Julia Azevedo (2023) esses são os principais métodos de extração:

- Hidrogênio Preto ou Marrom: é produzido a partir da eletrólise da água, utilizando como combustível o carvão mineral.
- Hidrogênio Cinza: tem como processo a reforma do vapor do Gás Natural. A água (H_2O) e o metano (CH_4) são colocados em altas temperaturas e submetidos a altas pressões, produzindo assim o hidrogênio (H_2) e o dióxido de carbono (CO_2). Um processo de alta poluição ambiental e atualmente a maneira mais utilizada.
- Hidrogênio Azul: tem sua produção igual ao hidrogênio cinza, diferenciando no destino do dióxido de carbono (CO_2) que ao invés de ser jogado na atmosfera é armazenado e reutilizado.
- Hidrogênio Turquesa: é produzido por pirólise, no processo o gás natural é submetido a altas temperaturas tendo como produto o hidrogênio (H_2) e o carbono em estado sólido. Esse tipo de produção necessita que a energia utilizada para aquecimento do gás natural seja de fontes renováveis.
- Hidrogênio Rosa: produzido a partir da eletrólise da água utilizando como fonte de energia a energia nuclear.

- Hidrogênio Verde: é fabricado utilizando a eletrólise da água, necessita de energia renovável como fonte.

A Figura 2 ilustra bem as cores, fontes e processos de extração do hidrogênio.

Figura 2 - Fontes e Cores do Hidrogênio



Fonte: Irena (2020).

2.1.1 O Hidrogênio no Brasil

Entre todos os processos de extração o que vem ganhando grande visibilidade no Brasil é o Hidrogênio Verde, que necessita de uma fonte de energia renovável para ser extraído. O Brasil tem grande capacidade de produção de energia renovável, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2023), as fontes de energia eólica e solar terão um aumento de produção de novembro de 2023 até dezembro de 2027 de 26.984 para 34.314 MW e 10.656 para 18.703 MW respectivamente, isso é um acréscimo de 1,88% para eólica e 3,00% para solar, um considerável aumento e ainda com capacidade maior para expansão no futuro.

Esses dados mostram que o Brasil tem grande potencial para ser um grande produtor de Hidrogênio Verde, isso atraiu muitas empresas para implementação de plantas de produção de hidrogênio, de acordo com a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2, 2021) estão em processos de implementação 42 projetos pelo Brasil, de vários tamanhos e em diferentes fases de construção. A Figura 3 mostra a localização dos projetos e o tipo de energia renovável utilizada.

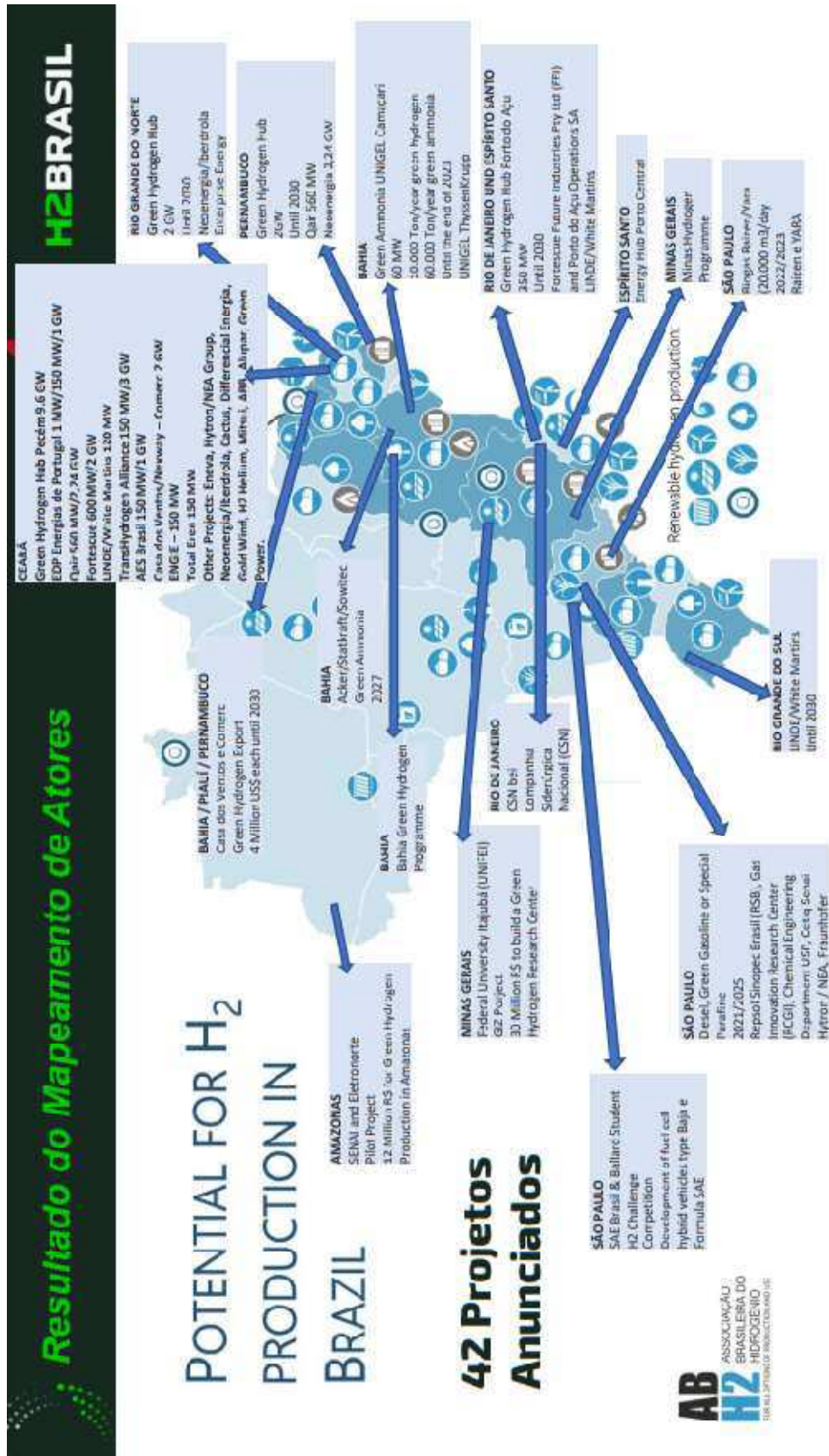
Parte desses empreendimentos estão localizados no nordeste do país, onde o estado do Ceará se destaca pela construção da planta de produção da Qair com localização no Porto do Pecém.

“De acordo com o presidente do Complexo Industrial do Porto do Pecém (CIPP), Hugo Figueiredo, o porto trabalha com a meta de ter uma participação de 25% do volume total de Hidrogênio Verde recebido pelo Porto de Rotterdam, na Holanda, principal porta de entrada para o combustível na Europa.” (LIVIA NEVES, 2023).

O estado do Ceará tem grande destaque por dar incentivos estaduais, que junto aos incentivos federais mostram uma grande atratividade pelos investidores, alguns deles são: isenção do ICMS (decreto estadual 33.251/2019), suspensão de COFINS de importação, suspensão de PIS e PASEP de importação, dentre outros incentivos. O presidente da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) do Porto do Pecém declarou de acordo com os incentivos que: “Isso torna o Hidrogênio Verde produzido no Ceará mais competitivo. Os estudos de Mckinsey, da Bloomberg, já posicionam o hidrogênio verde produzido no Brasil com um dos maiores competitivos do mundo.” (EDUARDO NEVES, 2023)

O estado do Ceará tem grande potencial Eólico e Solar, tendo então capacidade de produção em grande escala do hidrogênio, para exportação e importação.

Figura 3 - Projetos de Hidrogênio Verde Anunciados no Brasil

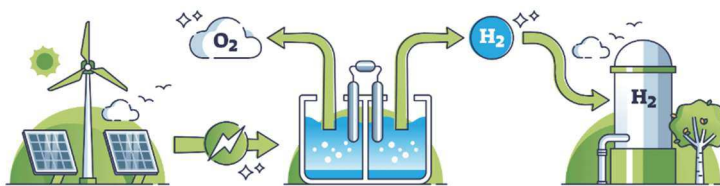


Fonte: ABH2, 2021

2.2 Produção do Hidrogênio por meio da Eletrólise

O Hidrogênio Verde, como já mencionado, se dá pelo processo de eletrólise da água onde a fonte de energia para toda a cadeia de produção deve ser originada a partir de energias renováveis. Essa energia alimenta o eletrolisador, que junto a uma solução aquosa com eletrólitos, tem como produto o gás hidrogênio (H₂) e o gás oxigênio (O₂). O hidrogênio é separado e submetido a altas pressões para aumentar a sua densidade de energia e se obter um melhor uso do mesmo. A Figura 4 mostra uma forma de produção de maneira genérica.

Figura 4 - Produção de Hidrogênio



Fonte: Process Sensing, 2023

Na reação se passa uma corrente elétrica em solução aquosa com eletrólitos através de eletrodos, produzindo o hidrogênio (H₂) e o oxigênio (O₂). Esses eletrodos aos quais se passa a corrente elétrica tem como definição: ânodo e cátodo, onde o ânodo é o polo positivo e o cátodo é o polo negativo.

“Quando se aplica a força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo, há passagem de corrente entre os eletrodos desencadeando reações eletrolíticas para a evolução de hidrogênio no cátodo (redução) e o oxigênio no ânodo (oxidação).” (FURLAN, 2012). Com isso, a reação genérica da eletrólise pode ser mostrada da seguinte forma:



A eletrólise ocorre em células que são juntas através dos seus eletrodos formando pilhas, que são um dos principais componentes dos eletrolisadores. As células podem ser ligadas em série ou paralelo formando as configurações unipolar e bipolar respectivamente, onde a primeira tem sua tensão final igual ao valor da tensão da célula e a segunda tem sua tensão final a soma das tensões das células.

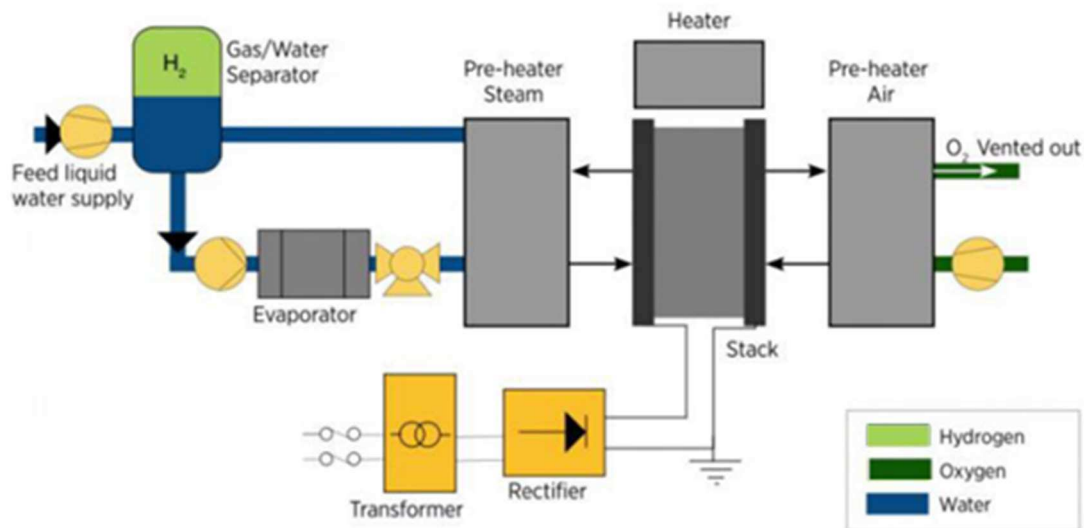
O processo de eletrólise pode ser feito de três maneiras diferentes, são eles: pilha eletrolítica de óxido sólido, alcalina e membrana de eletrólito polimérica. (SOUZA, 2020).

2.2.1 Tipos de Eletrólise

2.2.1.1 Óxido Sólido

A eletrólise de Óxido Sólido é o processo químico onde é utilizado o vapor de água em altas temperaturas. As altas temperaturas implicam em um processo complexo, em referência a estabilização dos materiais, por outro lado, comparada as outras formas de eletrólise essa configuração tem a maior eficiência. Mesmo com tamanha eficiência essa tecnologia não é utilizada em eletrolisadores comerciais e se encontra em desenvolvimento. (BRAGA, 2015). A Figura 5 representa o diagrama dessa forma de eletrólise.

Figura 5- Eletrólise por Óxido Sólido



Fonte: IRENA, 2018

Os eletrodos utilizados são cerâmicas porosas com uma composição de Zircônia estabilizada por Óxido Trítio no polo negativo (cátodo) e no positivo (ânodo) Manganita de Lantânio dopada com Estrôncio. A solução de eletrólitos contém Zircônia também estabilizada por Óxido Trítio. (LAGUNA-BERCERO, 2012, apud BRAGA, 2015). Explicar um pouco mais sobre a eletrólise

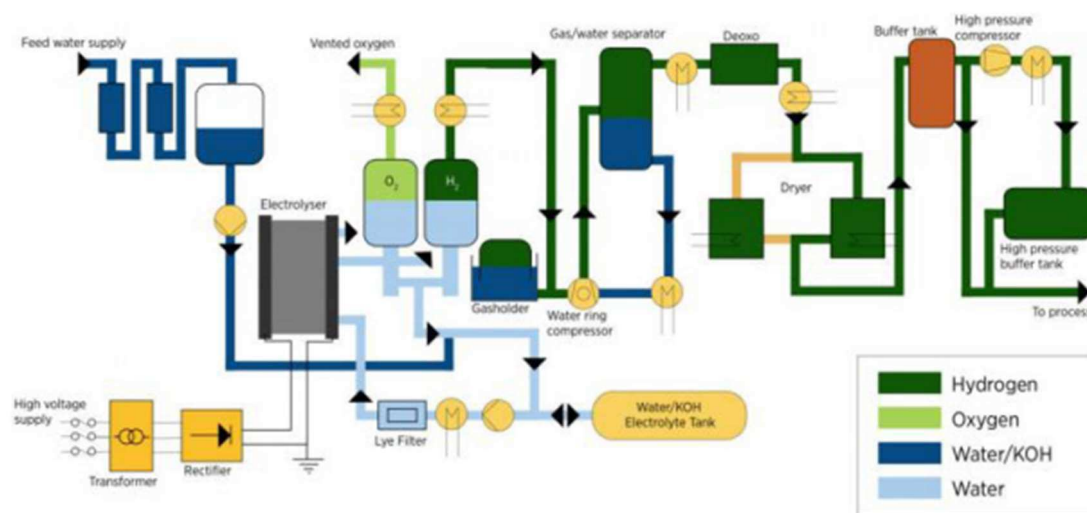
2.2.1.2 Alcalina

A eletrólise Alcalina utiliza, na maioria dos casos, hidróxido de potássio como solução eletrolítica, com níveis entre 20% a 30% da solução aquosa, sendo

atravessado por uma corrente com densidade de $1000\text{-}3000\text{ A/m}^2$. Essa densidade de corrente é inversamente proporcional a eficiência do processo por conta das perdas pelo calor. Os eletrodos nesse processo têm uma distância entre si por um diafragma, de forma a controlar a eficiência e a segurança, mantendo os gases dos produtos separados. (ZENG; ZHANG, 2010 *apud* CARMO, 2013).

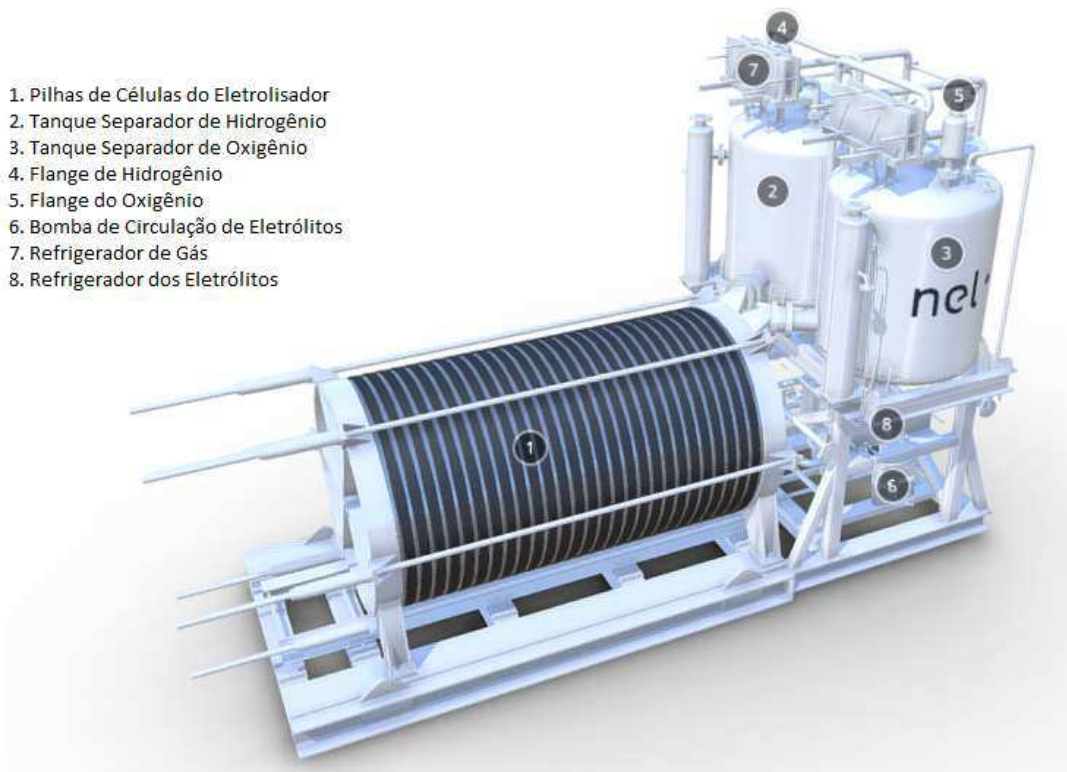
Apesar disso, a eletrólise alcalina conseguiu grande espaço na produção de hidrogênio no meio comercial, tendo eletrolisadores produzindo na faixa de Megawatts. A Figura 6 mostra um diagrama do processo de eletrólise alcalina e a Figura 7 mostra um modelo tridimensional de um eletrolisador comercial com seus principais componentes.

Figura 6 - Diagrama da Eletrólise Alcalina



Fonte: IRENA, 2018

Figura 7- Eletrolisador Alcalino Nel Hydrogen



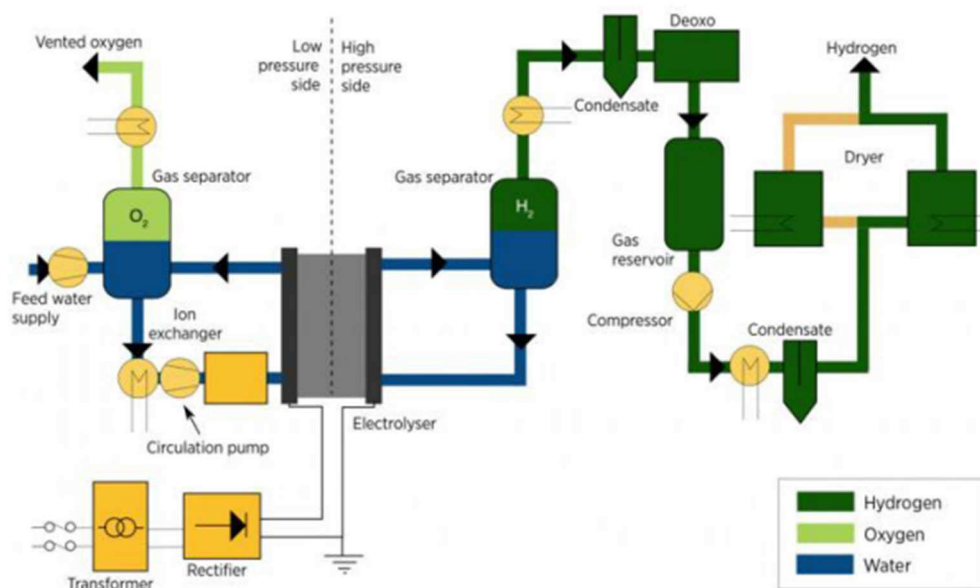
Fonte: Adaptado e traduzido de Nel Hydrogen, 2021

2.2.1.3 Membrana de Eletrólito Polimérica

O cenário da Eletrólise passou por grandes mudanças na década de 60, quando a empresa General Electric introduziu o eletrolisador em membrana de eletrólito de polimérico sólido, essa reação ficou conhecida no meio comercial por PEM (*Proton-Exchange Membrane*), que ocorre pela separação de duas semi-células por uma membrana com os eletrodos montados sobre a membrana, o eletrólito é a própria membrana. Nessa reação o ambiente é altamente ácido por conta da membrana, tem-se então que fazer uso de metais nobres para os eletrodos, onde os principais utilizados são: a platina para o cátodo e o irídio para o ânodo, tornando esse processo caro. (CARMO, 2013)

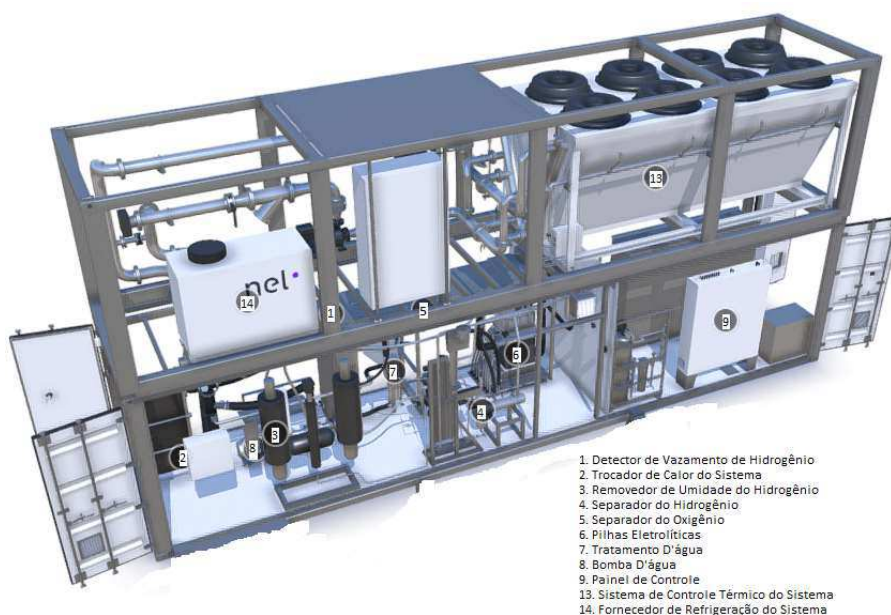
A Figura 8 mostra o diagrama de funcionamento da tecnologia PEMEC (Proton-Exchange Membrane Electrolysis), e a Figura 9 mostra uma imagem tridimensional do eletrolisador PEMEC com seus principais componentes, esses eletrolisadores de grande porte são alocados em contêineres para facilitar o manuseio e a instalação.

Figura 8- Diagrama da Eletrólise PEM



Fonte: IRENA, 2018

Figura 9- Eletrolisador PEMEC



Fonte: Nel Hydrogen, 2021

2.3 Processo de Compressão

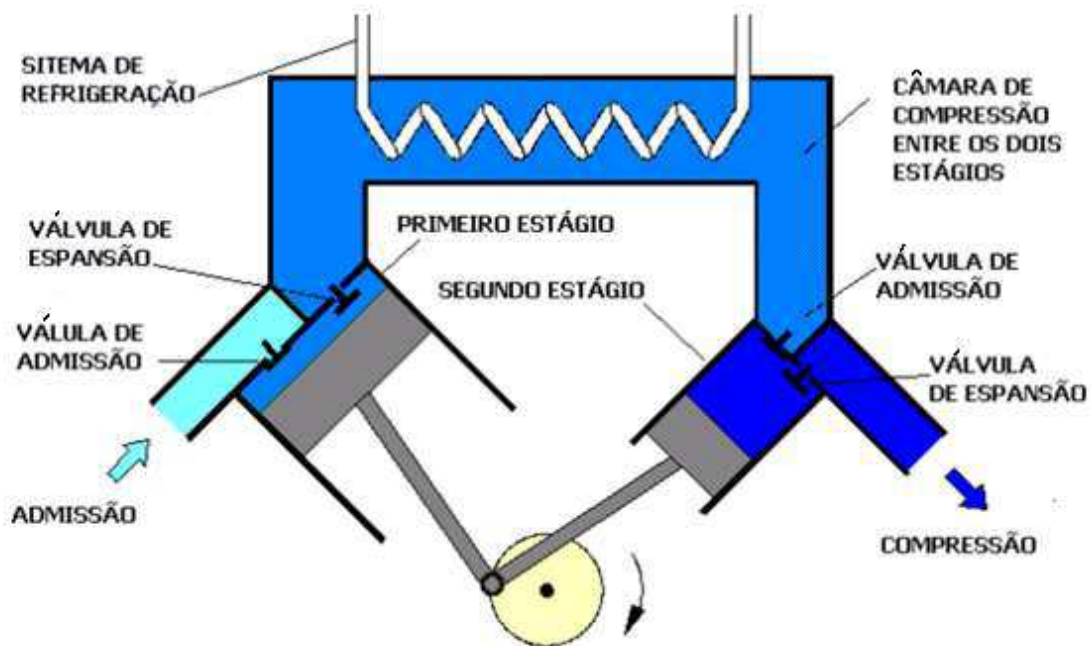
Para o hidrogênio ter uma melhor eficiência, deve passar por um processo de compressão. Esse processo se dá pelo uso de compressores e tanques de armazenamento com pressões diferentes, o hidrogênio que sai do eletrolisador vai para o tanque de baixa

pressão e logo após passa pelo compressor, sendo comprimido e direcionado para o tanque de alta pressão.

Existe vários métodos de compressão diferentes, mas todos se baseiam na diminuição do volume que o gás ocupa para comprimi-lo. Uma das formas é a utilização de um compressor dois tempos, que faz uso do sistema biela-manivela, onde o pistão comprime o gás.

Pode alcançar altas pressões de forma satisfatória utilizando pistões em série, cada pistão um estágio, para cada estágio que o gás passa ele é mais comprimido. Essa maneira apresenta um problema, no momento da compressão o gás aumenta a sua temperatura, com isso se faz uso de trocadores de calor entre cada estágio afim de se trabalhar com uma temperatura controlada. Compressores comerciais utilizam de 2, 4, 6 ou mais estágios em pares, na Figura 10 mostra de forma exemplificada o processo de compressão do compressor com dois estágios que será utilizado nesse trabalho.

Figura 10 - Diagrama de um Compressor a Pistão de Dois Estágios



Fonte: CANAVESI, 2023

2.4 Armazenamento de Hidrogênio

O hidrogênio não vai ser por total utilizado no momento de produção, então tanques de armazenamento próprios para suportá-los são cruciais no processo. Assim

como o gás natural ele pode ser armazenado e estocado de forma a ser utilizado quando necessário. Como outros combustíveis ele pode ser transportado para outros locais ou pode ser mantido no local onde foi feita sua produção, esse deslocamento não é tão eficiente pois o hidrogênio deve ser mantido a certas temperaturas e ao ser transportado há variações de pressão e temperatura, havendo necessidade de um controle no seu transporte. Com todo esse controle necessário, a utilização de forma estacionária possui menores exigências para peso e volume no processo de estocagem. (ABE *et al.*, 2019).

O hidrogênio em estado gasoso tem um poder calorífico baixo comparado a outros combustíveis, como o gás natural, com isso o seu uso a baixas pressões tornaria o processo pouco eficiente. Esse problema pode ser contornado com o aumento da pressão do gás, com a finalidade de aumentar a densidade energética e torná-lo mais viável para uso, para isso deve-se utilizar sistemas de armazenamento específicos. Segundo Moradi e Groth (2019) os tanques de armazenamento são classificados da seguinte forma:

- a) Tanques metálicos, compostos de aço e alumínio, utilizados para pressões até 50 MPa.
- b) Tanque de aço parcialmente envolvidos com fibra de vidro ou carbono bobinado, os mesmos tem seção cilíndrica e são utilizados para pressões de 45 MPa a 80 MPa.
- c) Tanque de fibra de carbono revestido com alumínio, utilizado para pressões até 45 MPa.
- d) Tanque sem compostos metálicos, com composição totalmente de vidro de carbono ou fibra de vidro revestido com material polimérico, aguenta as maiores pressões, designado para pressões de até 100 Mpa.

O tanque de fibra de carbono revestido com alumínio e o tanque sem compostos metálicos tem como finalidade o uso em veículos, sendo armazenado para transporte ou para uso do veículo como energia, isso se dá por conta do baixo peso e maior resistência dos tipos de tanques.

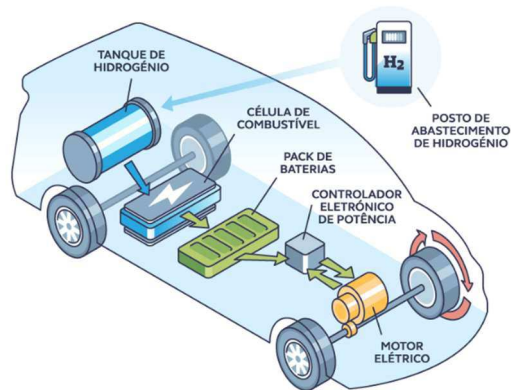
2.5 Veículo a Célula de Combustível

O hidrogênio verde tem grande destaque na aplicação em transporte coletivo, onde vem ganhando bastante espaço em países da Europa. A tecnologia de célula de combustível a hidrogênio vem ganhando grande notoriedade, pois aliada com energias renováveis consegue descarbonizar toda uma cadeia.

O veículo a célula de combustível é uma das configurações de veículos com motor elétrico, a célula de combustível usa o hidrogênio do tanque de armazenamento de

alta pressão e junto ao oxigênio extraído da atmosfera reage produzindo eletricidade e vapor de água. Essa eletricidade alimenta o banco de baterias que através de um controlador alimenta o motor elétrico do veículo, o vapor de água é eliminado pelo escapamento. A Figura 11 mostra um modelo básico de um veículo movido a célula de combustível com seus principais componentes.

Figura 11- Veículo Movido a Célula de Combustível



Fonte: Automóvel Clube de Portugal, 2023

Existem várias composições de células, como nos eletrolisadores, porém a mais difundida no meio é a Proton-Exchange Membrane (PEM), suas principais qualidades são: a alta densidade de potência, rápida inicialização, robustez e capacidade de operar com temperaturas mais baixas (OLABI *et al.*, 2017).

3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

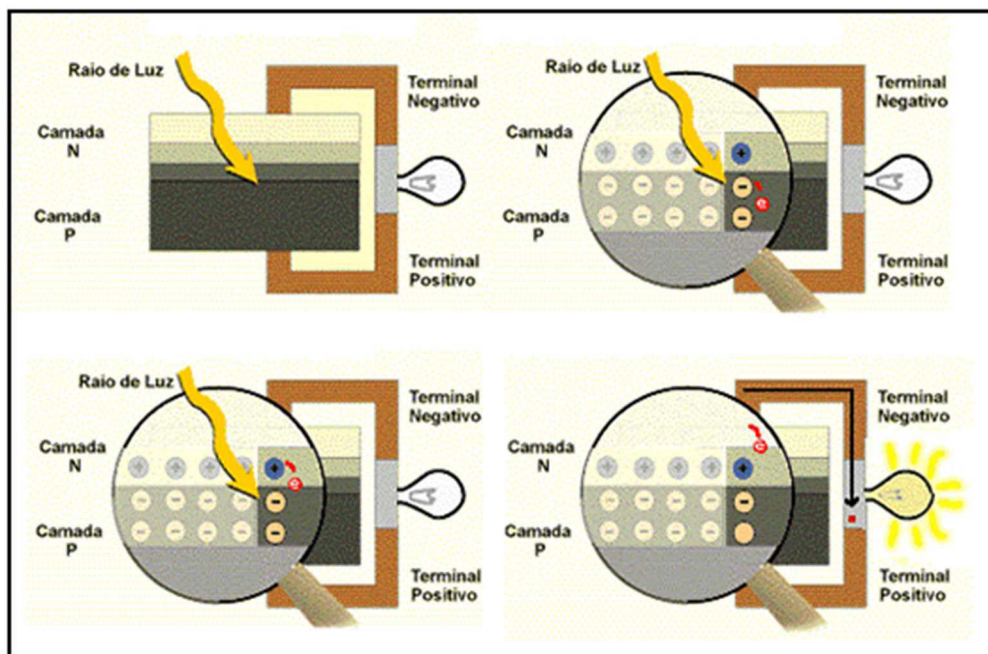
Para produção do Hidrogênio Verde, necessita-se de uma fonte de alimentação limpa para toda a cadeia de produção, nesse trabalho foram escolhidos dois tipos de fonte: energia solar e eólica.

3.1 Energia Solar

A energia solar é uma das maiores fontes de energia renovável do planeta e com grande crescimento nos últimos anos, a mesma tem como fonte a radiação solar proveniente das reações de fusão que ocorrem no sol, essas reações liberam energia que se propaga pelo espaço e parte chega ao planeta Terra.

Essa irradiação chega ao topo da atmosfera com uma média de 1.353 W/m^2 (GRADELLA, 2012), porém, não é toda essa energia que chega à superfície da Terra, apenas 51% dessa energia atinge o solo, o restante da energia é absorvido pelas camadas da atmosfera ou refletida para o espaço. Essa parcela de energia que chega à superfície da Terra pode ser absorvida pelos painéis solares e transformada em energia elétrica.

Figura 12- Célula Fotovoltaica



Fonte: CRESESB

A Figura 12 mostra a célula fotovoltaica com seus componentes e o efeito. O painel solar é um dos integrantes do sistema fotovoltaico, é composto por duas camadas de matérias semicondutores dopados, uma do tipo N que tem excesso de elétrons e outra do tipo P que tem déficit de elétrons. Essas duas camadas são unidas e quando há incidência do fóton sobre a placa solar os elétrons na banda de valência absorvem a energia dos fótons, ficando excitados saltando para a banda de condução se tornando elétrons livres e conseguem passar para a junção PN onde alguns chegam até o semicondutor P. Esse efeito gera uma corrente elétrica de corrente contínua que é enviada através de cabos para o inversor, que pode ser ligada a rede elétrica, a baterias ou aos dois, transformando a corrente contínua em corrente alternada. A Figura 12 mostra a célula fotovoltaica com seus componentes e o efeito.

No processo de confecção das placas, as células fotovoltaicas são conectadas em arranjos série e paralelo, formando ao fim uma placa fotovoltaica que pode ser classificada em mono ou policristalina, que por sua vez, podem ser rearranjadas em série ou em paralelo de forma a suprir o inversor. De acordo com Gradella (2012) a quantidade de painéis é calculada pela equação (2), onde $P_{instlFv}$ é a potência calculada necessária para a demanda da planta é a potência total do parque e $P_{Painél}$ é a potência da placa que deseja ser utilizada.

$$N_p = \frac{P_{instlFv}}{P_{Painél}} \quad (2)$$

Os painéis são submetidos a testes STC (Standard Test Conditions) e NOCT (Nominal Operation Temperature of the Cell). No STC, as condições nas quais as placas são testadas são 1000 W/m^2 a 25°C , com uma referência de irradiação solar de massa de ar 1.5, no NOCT a temperatura a qual é imposta é 20°C com uma massa de ar de 1 m/s com uma irradiação de 800 W/m^2 . Esses testes são importantes, pois dão os valores de tensão e corrente nominal do painel, importantes para o dimensionamento. De acordo com Peruzo (2011) antes do dimensionamento deve-se calcular a verdadeira tensão nominal, já que a temperatura pode ser diferente a de teste, com a fórmula (3):

$$V_{ocmax} = Voc + Voc * \left[(Temp - STC) * \frac{TcVoc}{100} \right] \quad (3)$$

Onde Voc é a tensão de circuito aberto em condições STC, Temp é a temperatura média da região onde os painéis serão instalados, STC é a temperatura a condições de teste e por último TcVoc é o coeficiente de temperatura de tensão. Com isso, pode-se calcular a quantidade de strings e a quantidade de painéis em cada strings com as fórmulas (4) e (5).

$$NP_{Séries} = \frac{V_{MI}}{V_{ocmax}} \quad (4)$$

Para a quantidade de painéis em série conectadas no inversor, calculamos através da razão entre a tensão contínua máxima do inversor na entrada de tensão (V_{MI}) pela tensão máxima desenvolvida pela placa (V_{ocmax}).

$$N_{Strings} = \frac{I_{MI}}{I_{maxCC}} \quad (5)$$

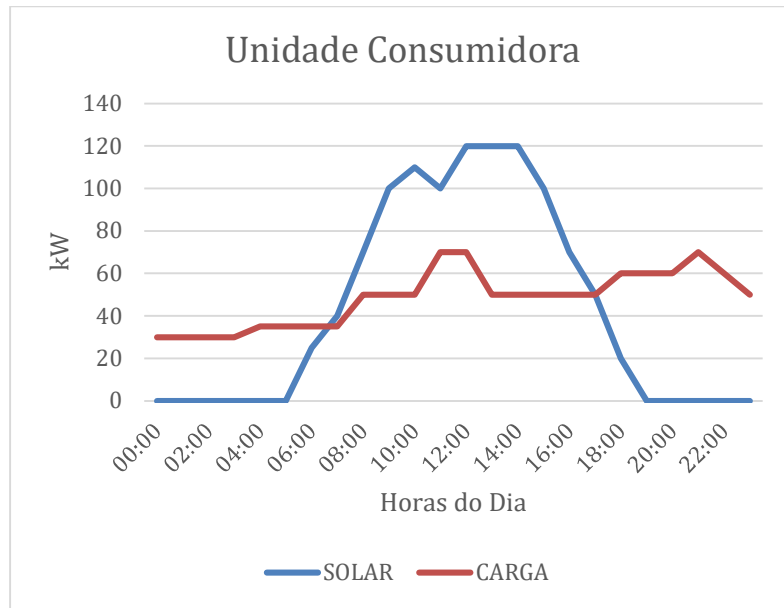
Para a quantidade strings conectadas no inversor, calculamos através da razão entre corrente contínua máxima recomendada na entrada do inversor (I_{MI}) pela corrente de curto circuito da placa (I_{maxCC}).

A energia gerada no sistema depende muito do clima, sendo uma fonte não despachável, pois não há o controle da geração. Com essa limitação, se faz uso de baterias e da própria rede elétrica, esses sistemas são denominados off-grid e on-grid. O inversor quando gera energia maior que a carga envia o excedente para alimentar as baterias ou a rede, quando a carga for maior que a geração do inversor a mesma é alimentada pelas baterias ou pela rede.

O Gráfico 2 exemplifica a geração do sistema fotovoltaico em relação a carga da unidade consumidora, pode ser visto que há uma variação de geração durante as horas do dia onde há maior geração quando o sol está em seu pico, às 12:00 horas, e durante a noite não há geração. Foi criado uma forma de representar a incidência média diária por meio de Horas-Solar-Pleno (HSP), esse fator é definido como o tempo médio de irradiação solar em determinada localização. Seu valor é dado pela razão da irradiação média solar diária I_{rg} e a irradiação padrão de teste I_{rSTC} , que tem seu valor de $1000W/m^2$ como já mencionado, determinado por (6):

$$HSP = \frac{I_{rg}}{I_{rSTC}} * \left[\frac{\frac{kWh}{m^2} \cdot dia}{1 kW/m^2} \right] \quad (6)$$

Gráfico 2 - Geração e Carga de uma Unidade Consumidora



Fonte: Autor Próprio

3.2 Energia Eólica

A energia eólica é baseada na transformação de energia cinética dos ventos em energia mecânica através de pás, o vento é formado a partir do movimento de massas de ar indo de áreas de alta para baixa pressão, essa variação vem da radiação solar ocorrendo da seguinte forma: quando a radiação atinge a superfície e é absorvida essa energia aquece as massas de ar próximas que trocam de espaço com as massas de ar com menor temperatura, aliado com a rotação do planeta cria os ventos. O fluxo de massa de vento em determinada área está relacionado com a potência disponível para geração elétrica, como mostra a equação (7). (HODGE, 2011).

$$P = \frac{1}{2} * \dot{m} * V^2 \quad (7)$$

Onde o fluxo de massa de ar pode ser dado pela equação (8).

$$\dot{m} = \rho * A * V \quad (8)$$

Na equação (8), a massa específica do fluido é dado por ρ , A é a área e V é a velocidade do fluido, substituindo a equação (8) em (7) obtém-se (9).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (9)$$

A equação (9) mostra que a área varrida pelas turbinas e a velocidade são diretamente proporcionais a potência disponível, porém a potência disponível dos ventos não pode ser totalmente transformada em energia elétrica devido a fatores na construção

da turbina. Há um limite para extração denominado *Limite de Betz*, calculado a partir de uma análise de disco atuador envolvendo distribuições de pressão, esse limite é dado como o coeficiente de potência máximo (CP_{max}) de valor aproximado 0,5926. (HODGE, 2011).

O coeficiente de potência é um limite que não pode ser atingido. Devido a isso é feita a modelagem da distribuição de probabilidade de vento, denominada de Distribuição de Weibull, calculado com a equação (10). (HODGE, 2011)

$$h(V, k, c) = \frac{k}{c} * \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (10)$$

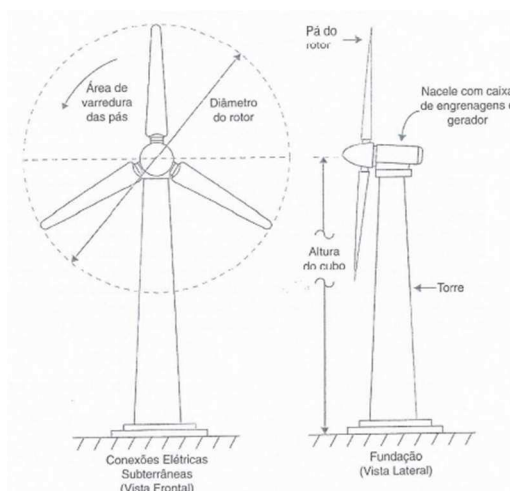
Onde “k” é parâmetro de forma e “c” é o parâmetro de escala, onde o parâmetro de forma controla a forma de distribuição e o parâmetro de escala controla o valor de modo, a velocidade mais provável que possa ocorrer (HODGE, 2011).

Segundo HODGE (2011) a equação (11) calcula o valor da energia eólica extraída no espaço de um ano em determinada localização, considerando o ano com 8760 horas.

$$Energia = \frac{Cp * \rho}{2} * \int_0^{\infty} h(V, k, c) * 8760 * V^3 dV \quad (11)$$

A construção da turbina tem grande importância na energia que é extraída dos ventos, os principais tipos de turbinas utilizadas comercialmente são: as de eixo horizontal e as de eixo vertical, onde as de eixo horizontal tem grande domínio (HODGE, 2011).

Figura 13 - Diagrama de uma Turbina de Eixo Horizontal



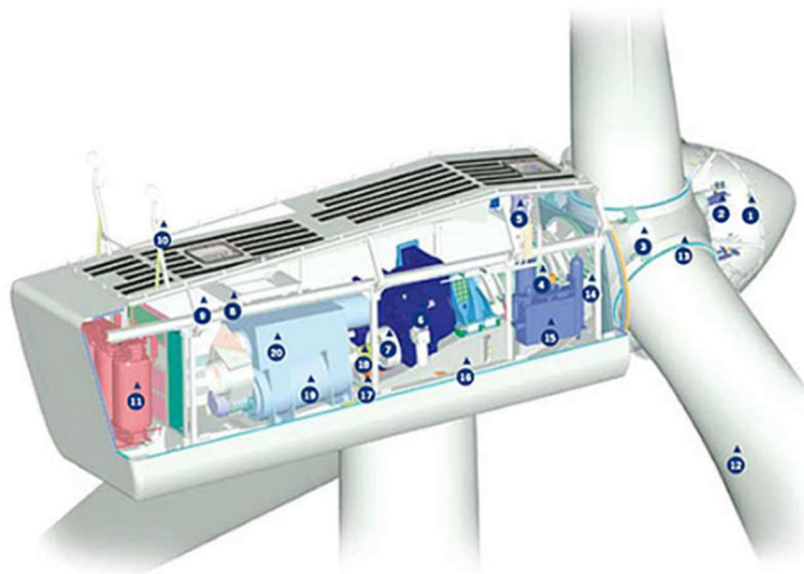
Fonte: HODGE, 2011

A figura 13 mostra o diagrama de uma turbina de eixo horizontal, onde os principais componentes e suas funções são:

- Pás: tem como função varrer uma determinada área com a força dos ventos transferindo energia cinética em energia mecânica para o rotor.
- Rotor: local onde é fixado as pás e transfere a energia mecânica para o gerador transformando em energia elétrica.
- Nacele: cubículo onde fica os principais componentes responsáveis pela boa atuação da turbina se encontram, principalmente os responsáveis por converter energia mecânica em energia elétrica.
- Torre e Fundação: tem como principal função manter os componentes em determinada altitude com máxima estabilidade.

A nacele como já falado é o cubículo onde fica os principais equipamentos, eles podem ser melhores vistos na Figura 14.

Figura 14 - Nacele e seus Componentes



- | | |
|--|--|
| 1 - Controlador do Cubo | 11 - Transformador de alta tensão |
| 2 - Controle <i>pitch</i> | 12 - Pás |
| 3 - Fixação das pás no cubo | 13 - Rolamento das pás |
| 4 - Eixo principal | 14 - Sistema de trava do rotor |
| 5 - Aquecedor de óleo | 15 - Sistema hidráulico |
| 6 - Caixa multiplicadora | 16 - Plataforma da nacele |
| 7 - Sistema de freios | 17 - Motores de posicionamento da nacele |
| 8 - Plataforma de serviços | 18 - Luva de acoplamento |
| 9 - Controladores e Inversores | 19 - Gerador |
| 10 - Sensores de direção e velocidade do vento | 20 - Aquecimento de ar |

Fonte: VESTAS

4 METODOLOGIA

4.1 A Cidade de Sobral

A cidade de Sobral é um município no estado do Ceará, fundada no século XVII e o polo comercial mais importante do norte do estado. Conta com um território de 2.068 km² e com uma população de 203.023 habitantes (IBGE, 2022).

Hoje o principal meio de transporte interurbano é o Transol, de acordo com a Secretaria de Transporte da Cidade de Sobral, a frota conta com 26 veículos onde 21 estão em atividade, percorrendo diariamente uma média de 180 km cada.

A proposta desse trabalho visa a troca dos ônibus movidos a combustível fóssil por uma nova frota movida a célula de combustível, onde o hidrogênio será o combustível, foi escolhido de forma representativa o modelo comercial Urbino 12 Hydrogen da empresa Solaris, mostrado na Figura 15.

Esse veículo tem capacidade de acomodar 82 passageiros, com um motor que consegue desenvolver uma tração de 250kW, sendo alimentado por célula de combustível, do tipo PEMEC, e um banco de baterias. O seu tanque de combustível comporta 37,5 kg de hidrogênio (H₂) a uma pressão de 35 MPa, dando ao veículo uma autonomia de até 340 km (Solaris, 2021).

Figura 15- Urbino 12 Hydrogen



Fonte: SOLARIS

4.2 Dimensionamento do Sistema

O dimensionamento da proposta pode variar de acordo com o cálculo da demanda, a partir da variação de ônibus substituídos, consumo médio dos ônibus e a distância média percorrida diariamente. Nesse trabalho serão usados os valores dados pela Secretaria de Transporte da Cidade de Sobral para análise e validação. Com o valor da demanda diária calculada, procurou-se um eletrolisador comercial compatível com a produção do hidrogênio necessário. Foi extraído o tempo de operação necessária diariamente, a potência necessária e a taxa de produção por hora.

A partir do valor de produção da estação de eletrólise, foi calculada a quantidade de compressores e o seu consumo. A estação de reabastecimento foi calculada a partir da necessidade de abastecimento dos ônibus.

Em seguida, com toda a energia necessária calculada, levando em conta todos os processos, foi analisada a melhor alternativa de alimentação para todo o processo de produção, estocagem e abastecimento da planta de hidrogênio, sendo considerado para análise uma planta solar ou eólica, analisando qual melhor atenderia as necessidades de forma viável.

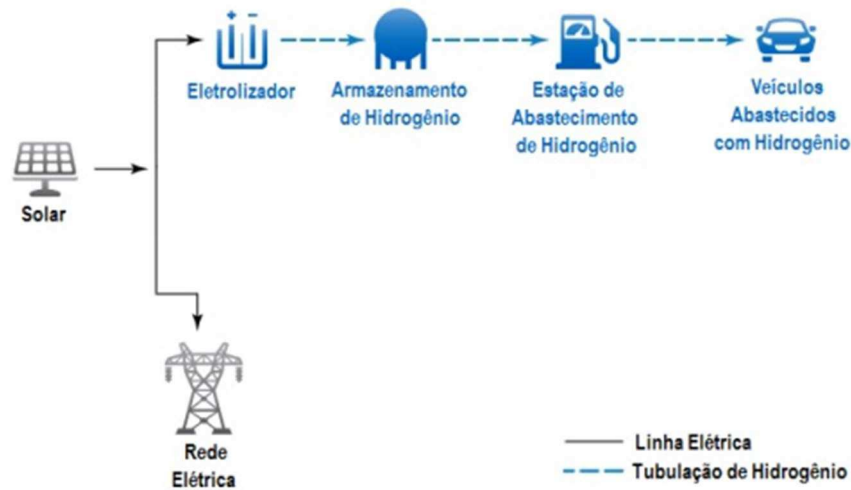
Com o equipamento necessário escolhido, foram calculados os valores necessários para implementação de todo o projeto, fazendo um comparativo entre a proposta desse trabalho, com ônibus movidos a célula de combustível abastecidos com hidrogênio, e o modelo utilizado atualmente, com ônibus com motores de combustão interna movidos a diesel, levando em consideração todos os gastos e as emissões de GEE's, que são o principal motivo da proposta.

Os componentes calculados, desde a planta de produção de energia renovável à planta de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio são:

- 1 estação de eletrólise de 1.250 MW.
- 10 compressores de 21 cv.
- 1 estação de reabastecimento
- 2 inversores de 3000 kW
- 8440 placas monocristalinas 665 W

A Figura 16 mostra o diagrama com os principais componentes de uma estação de eletrólise.

Figura 16- Diagrama com os Principais Componentes de uma Estação



Fonte: Adaptado de National Renewable Laboratory, 2014.

4.2.1 Estação de Eletrólise

Para o cálculo do eletrolisador, primeiro se faz necessário o cálculo da demanda necessária de hidrogênio diariamente (D_H) em kg, que pode ser obtida através do produto do número de veículos (N_V), o consumo médio de hidrogênio do ônibus (C_m) em kg/km, a distância média percorrida diariamente (L_D), em km, e um fator de segurança (F_s), equação (12).

$$D_H = N_V * C_m * L_D * F_s \quad (12)$$

Com a demanda diária, é escolhido um eletrolisador que tenha capacidade de produção igual ou maior que a demanda. Com a folha de dados do eletrolisador em mãos, pode-se calcular a energia necessária para alimentação do mesmo, através da equação (13).

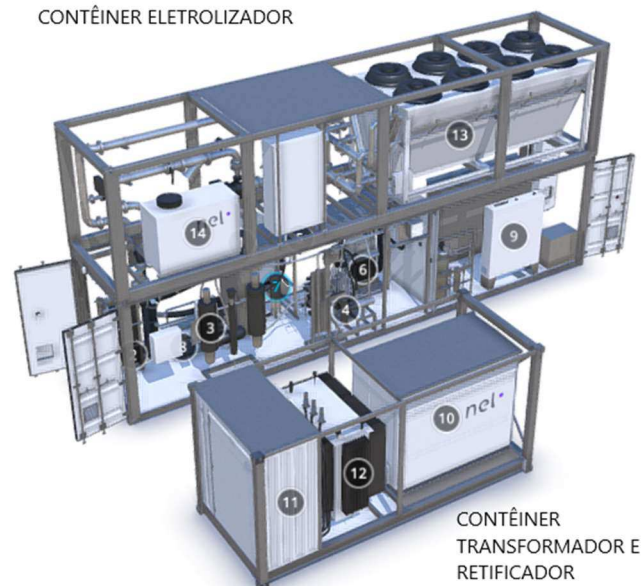
$$E_{Eel.Eletrolisador} = P_{Eletrolisador} * T \quad (13)$$

Onde $P_{Eletrolisador}$ é a potência do eletrolisador em kW e T é o tempo necessário de operação diário da estação em horas, onde pode ser obtido através da razão da demanda necessária por dia pela demanda de produção do eletrolisador convertido em horas.

A Figura 17 mostra um modelo tridimensional da estação de eletrólise que será utilizada no trabalho para melhor compressão construtiva, modelo MC250 da

empresa Nel Hydrogen, com uma potência de 1.250 kW e dimensões em metros de 12,2*2,5*3, comprimento, largura e altura respectivamente, para o contêiner do eletrolisador dimensões em metros de 6,1*2,5*2,6, comprimento, largura e altura respectivamente, para o contêiner de transformação de energia.

Figura 17 - Estação de Eletrólise MC250



Fonte: Nel Hydrogen, 2021.

4.2.2 Compressor

Para calcular a quantidade de compressores e a energia necessária para alimentá-los, é preciso primeiro ter a pressão de saída do gás na estação de eletrólise e até qual nível se quer elevá-la, com isso escolhe-se um compressor baseado na sua folha de dados. Para calcular a quantidade de compressores necessária primeiro calcula-se a taxa de compressão (Tx_c) do compressor escolhido, em kg/h, através do produto da densidade do gás, D_g em kg/m^3 , que irá ser comprimido e o poder de pressurização do compressor escolhido, Pr_c em m^3/h .

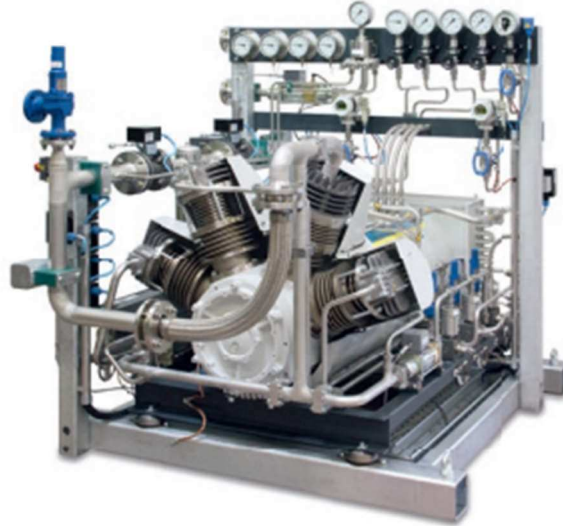
$$Tx_c = D_g * Pr_c \quad (14)$$

O número de compressores e o tempo de uso são ajustados a partir da taxa de compressão e a quantidade que será comprimida diariamente. Ao fim se calcula a energia elétrica necessária diariamente para os compressores ($E_{ele.Compressores}$) pela equação (15), onde $P_{Compressores}$ é a potência do compressor em kW, t é o tempo de uso diário em horas e N é o número de compressores.

$$E_{ele.Compressores} = P_{Compressores} * t * N \quad (15)$$

A Figura 18 mostra o compressor que foi escolhido para esse trabalho, a título de cálculo.

Figura 18 - Compressor Haug.Sirius 33G



Fonte: SAUER COMPRESSORS

4.2.3 Estação de Reabastecimento

Com a perda de pressão do hidrogênio no momento do abastecimento, deve-se manter a temperatura do mesmo, com isso, o principal gasto de energia no momento de abastecimento é com o equipamento de regulação de temperatura, o consumo é caracterizado pela massa do hidrogênio resfriado em função da temperatura ambiente. (ELGOWAINY *et al.*, 2017). Então é calculado a energia necessária pela variação com a temperatura do tanque e a ambiente, mostrada na equação (16).

$$CE_{Hrs} = \frac{0.3}{1.6e^{-0.018T_{amb}}} + \frac{25 * \ln(T_{amb}) - 2}{D_H} \quad (16)$$

A partir daí se calcula a energia elétrica gasta no posto de reabastecimento diariamente ($E_{EL.hrs.ABS}$), considerando que a demanda diária de produção do hidrogênio (D_H) seja totalmente abastecida, a equação (17) mostra esse procedimento.

$$E_{EL.hr .ABS} = CE_{Hrs} * D_H \quad (17)$$

4.2.4 Tanque de Armazenamento

O tamanho do tanque de armazenamento varia de acordo com a forma estratégica de abastecimento adotada, o tanque deve ter capacidade suficiente para armazenar a demanda diária. Com isso a capacidade do tanque é igual a demanda diária, tendo seu volume e tamanho variado de acordo com a condição de temperatura e pressão em que o gás é submetido.

4.3 Parque Eólico

Para o dimensionamento de um parque eólico, deve-se considerar três variáveis: a demanda de energia a ser produzida, a localização de instalação do parque eólico e o equipamento específico a ser utilizado. Para calcular a energia produzida pelos ventos de um determinado local, deve-se usar (10) e (11) citadas no capítulo 3. A primeira calcula a frequência de ventos pela distribuição de Weibull e a segunda calcula a energia que pode ser gerada a partir dessa distribuição.

$$h(V, k, c) = \frac{k}{c} * \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (18)$$

$$Energia = \frac{c_p * \rho}{2} * \int_0^{\infty} h(V, k, c) * 8760 * V^3 dV \quad (19)$$

Os dados para calcular as equações (18) e (19) foram retirados do Atlas Eólico e Solar do Ceará, um site que disponibiliza dados meteorológicos baseados em modelos numéricos, ressaltando que esses dados não substituem as medições anemométricas feitas para implementação de projetos reais, contudo, podem ser utilizados para compor a análise teórica desse trabalho.

O aerogerador escolhido para compor esse estudo a nível de cálculo e disponibilização comercial, foi o V150-4.2MWTM IEC S com uma torre de 150 metros. O principal fator de escolha desse modelo foi porque o fator de forma “k” que ele necessita era o único que coincidia com os dados retirados do Atlas Eólico e Solar do Ceará. Os principais dados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais dados Aerogerador V150-4.2MW IEC S

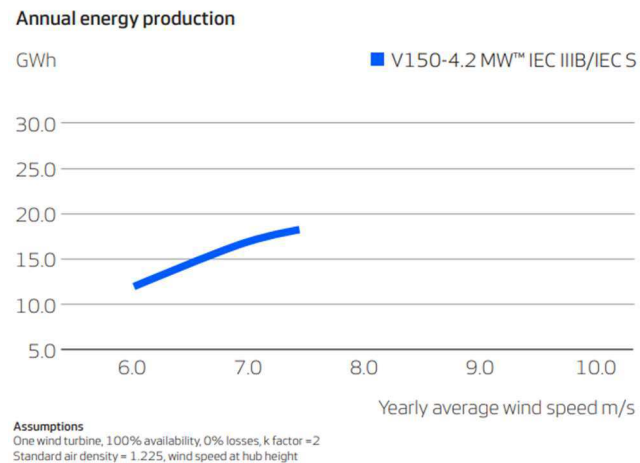
Aerogerador V150-4.2MW IEC S	
Potência Nominal	4200 kW
Velocidade de Vento Entrada da Turbina	3 m/s

Velocidade de Vento Saída da Turbina	24.5 m/s
Área de Varredura	17671 m ²
Diâmetro do Rotor	150 m

Fonte: Vestas

A empresa Vestas, responsável pela produção do Aerogerador, também disponibiliza a produção média anual baseados na velocidade média, como pode ser visto no Gráfico 3.

Gráfico 3- Produção Média Anual de Energia V150



Fonte: Vestas

4.4 Parque Solar

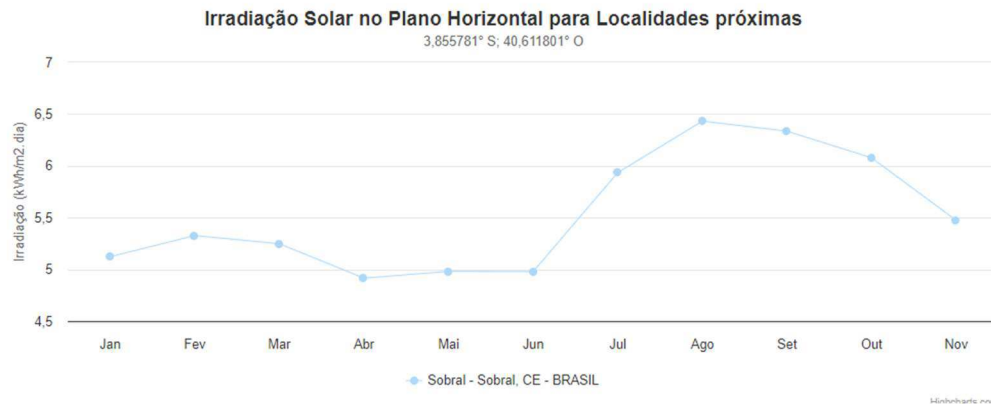
De acordo com *Markvart e Castaner (2003)*, a potência instalada (kW) em um parque solar é calculada pela equação (20).

$$P_{instFv} = \frac{E_{eltotal}}{\eta_{total} * HSP} \quad (20)$$

Onde $E_{eltotal}$ é a energia elétrica (kWh.dia) necessária produzida para abastecer a planta de produção de hidrogênio, η_{total} é a eficiência total da planta solar, HSP é o valor de Horas-Solar-Pleno média da localização onde será instalada a planta. Os dados de HSP foram retirados do Centro de Referência para energia Solar e Eólico Sérgio S. de Brito, que disponibiliza dados do potencial HSP mensal médio das regiões do Brasil. Na Figura 19, podem ser vistos os dados de irradiação média solar anuais para a cidade de Sobral que serão utilizados para base de cálculos, ressalto que esses dados não substituem as medições anemométricas que são realizadas para implementação de projetos reais, porém, podem ser utilizados para compor a análise teórica desse trabalho.

Figura 19 - Dados de irradiação média solar da Cidade de Sobral

		Latitude: 3,855781° S		Longitude: 40,611801° O		Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
#	Estação	Município	UF	País	Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sobral	Sobral	CE	BRASIL	3,801° S	40,649° O		7,4	5,12	5,33	5,25	4,92	4,98	4,98	5,25	5,93	6,43	6,34	6,08	5,47	5,51	1,52



Fonte: CRESESB, 2023

A estação de inversão escolhida para compor esse trabalho foi o SIW750-3.1-600 da empresa WEG com sede no Brasil. A Figura 21 mostra o interior e o exterior da estação e a Tabela 2 mostra os principais dados da estação de inversão que serão úteis para os cálculos da planta solar.

Figura 20- Estação de Inversão SIW750-3.1-600



Fonte: WEG

Tabela 2 - Dados da Central de Inversão SIW750-3.1-600

Inversor SIW750-3.1-600			
Entrada CC		Entrada CA	
Máxima Corrente Recomendada	4920 A	Potência cosØ=1 (-10°C a +40°C)	3150 kVA
Máxima Tensão	1500 V	Potência cosØ=0,95 (-10°C a +40°C)	3000 kW
Faixa de MPPT	874V-1350V	Potência cosØ=1 (-10°C a +40°C)	2910 kVA
Número de MPPT	2	Potência cosØ=0,95 (-10°C a +40°C)	2760 kW
Número de Entradas CC	20	Máxima Corrente	3055 A
Sobredimensionamento de Potência	150%	Tensão de Saída	600 V

Fonte: WEG

A quantidade de painéis é calculada pela equação (3), dada no capítulo 3. Com a quantidade mínima de painéis, se determinam os arranjos de série e paralelo de acordo com as equações (4) e (5).

$$N_p = \frac{P_{instlFv}}{P_{Painél}} \quad (21)$$

$$NP_{Séries} = \frac{V_{MI}}{V_{ocmax}} \quad (22)$$

$$N_{Strings} = \frac{I_{MI}}{I_{maxCC}} \quad (23)$$

Onde $P_{instlFv}$ é a potência a ser instalada no parque solar calculada a partir da equação (20). Para a quantidade de painéis em série, se faz a razão da tensão máxima de corrente contínua do inversor (V_{MI}) pela tensão máxima desenvolvida pela placa (V_{ocmax}). Para as strings, se calcula pela razão entre corrente máxima recomendada na entrada de corrente contínua do inversor (I_{MI}) pela corrente de curto circuito da placa (I_{maxCC}).

O painel escolhido a título de cálculo foi o modelo Lepton Mono 665-LP210-M-66-MH, com uma potência nominal de 665 W ocupando um espaço de 3,11 m². (SOU ENERGY, 2023). A Tabela 3 apresenta os principais dados da placa mencionada.

Tabela 3- Dados Placa Solar 665-LP210-M-66-MH

Características elétricas STC	
Potência	665 W
Tensão de Circuito Aberto	46,18 V
Corrente de Curto Circuito	18,31A
Tensão de Alimentação Máxima	38,21V
Corrente de Alimentação Máxima	17,40A
Eficiência do Módulo	21,41%
Características elétricas NMOT	

Potência	503W
Tensão de Circuito Aberto	42,86V
Corrente de Curto Circuito	15,01
Tensão de Alimentação Máxima	35,42V
Corrente de Alimentação Máxima	14,19
Eficiência do Módulo	16,18%
Característica de Temperatura	
NMOT	41 ±3°C
Coefficiente de Temp. de VOC (%/°C)	-0,28
Coefficiente de Temp. de VOC (%/°C)	0,05
Coefficiente de Temp. de Pmáximo (%/°C)	-0,36

Fonte: SOU ENERGY, 2023

4.5 Viabilidade Econômica

A análise econômica tem grande importância, pois a partir dela as entidades públicas e privadas podem criar interesse pela proposta, com isso, foi montado uma tabela de custo de compra, operação, manutenção e vida útil dos equipamentos comerciais tratados nesse trabalho, os valores foram obtidos através de pesquisas disponibilizadas e literaturas, expostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de Custos

EQUIPAMENTO	Custo de Aquisição	Vida Útil
Planta eólica	1.473 US\$/kW (IRENA,2020)	30 anos (WISER; BOLLINGER,2019)
Planta Solar	795 US\$/kW (GREENER,2019)	25 anos (MICENA,2020)
Eletrolisador	3.424*Peletrolisador US\$ (GRÜGER et al 2018)	20 anos (GRÜGER et al.,2018)
Compressor	40.035*Pcompressor US\$ (PEREIRA,2022)	20 anos (GRÜGER et al.,2018)
Tanque de BP	1.001 US\$/kG (PEREIRA,2022)	20 anos (PEREIRA,2022)
Tanque de AP	1.534 US\$/kG (FCH JU,2017)	20 anos (FCH JU,2017)
Subsistema de Operação	285 US\$/Kg/dia (PEREIRA,2022)	20 anos (PEREIRA,2022)
HRS	1,13 US\$/Kg/dia (FCH JU,2017)	20 anos (GRÜGER et al.,2018)

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de FCH JU (2017), GRÜGER et al.,2018, IRENA (2020), MICENA (2020), Miranda et al (2017), WISER; BOLLINGER (2019) e PEREIRA (2022).

Essa proposta traz benefícios, dentre eles: corte de gastos com combustível fósseis e redução na emissão de GEE's. Segundo Paiva (2021) gases nocivos emitidos na combustão de materiais fósseis podem ser quantificados economicamente como mostra a Tabela 5.

Tabela 5- Quantificação Econômica dos Gases do Efeito Estufa

Gás	Valor (US\$/t) (PAIVA,2021)	Quantidade (g/Km) (AGUIAR et al., 2015) (RIBEIRO, 2011)
CO2	108,21	1280
CO	673,32	1,5
Nox	3.445,08	1,89
Hidrocarbonetos	2.980,41	0,17
Material Particulado	17.622,05	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de PAIVA (2021), AGUIAR et al.,2015 e RIBEIRO (2011).

A Tabela 5 quantifica economicamente os principais gases, através da valoração da emissão de cada gás, emitidos por veículos pesados movidos a diesel em marcha lenta. Outros gases também são emitidos, porém em quantidade muito pequena, a emissão depende de vários fatores e a tabela os leva em consideração utilizando valores médios, como o combustível utilizado, o peso carregado e até mesmo a velocidade de pilotagem do veículo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desse trabalho consideram a substituição da frota ativa de ônibus intermunicipal de Sobral, ao todo são 21 ônibus, por ônibus movidos a célula de combustível alimentada por hidrogênio (FCEB), mostrando dados da descarbonização e a viabilidade.

Os indicadores podem ser adaptados para se adequar a cronogramas de testes e à implementação gradual do projeto. Os indicadores utilizados foram a rodagem média diária de 180 km, o consumo médio do FCEB escolhido de 0,11 kg/km de hidrogênio (H₂), o número de ônibus necessários que ao total são 21 e um fator de segurança de 1,1 para a produção. Esses dados inseridos na equação (12) nos dá o resultado de uma demanda diária necessária de 457,38 kg/dia.

5.1 Estação de eletrólise

Baseado na demanda diária, foi escolhida a estação de eletrólise MC250 da empresa Nel Hydrogen, que tem capacidade de produção diária de 531 kg de hidrogênio (H₂), com uma potência de 1.250 kW. Uma estação é suficiente para a produção e conta com uma folga de 14% na produção, conseguindo produzir a quantidade necessária em aproximadamente 21 horas. Inserindo esses dados na equação (13) obtemos um valor de 26.250 kWh.dia necessário para o eletrolisador e seus equipamentos auxiliares.

O eletrolisador também necessita ser alimentado por água potável, de acordo com o fabricante, o eletrolisador necessita de 705 litros de água por hora, isso nos dá 31,3 litros de água para a produção de 1 kg de hidrogênio. Para atender à necessidade, será preciso 14,331 kg de água. A tabela 6 mostra os dados obtidos para o eletrolisador.

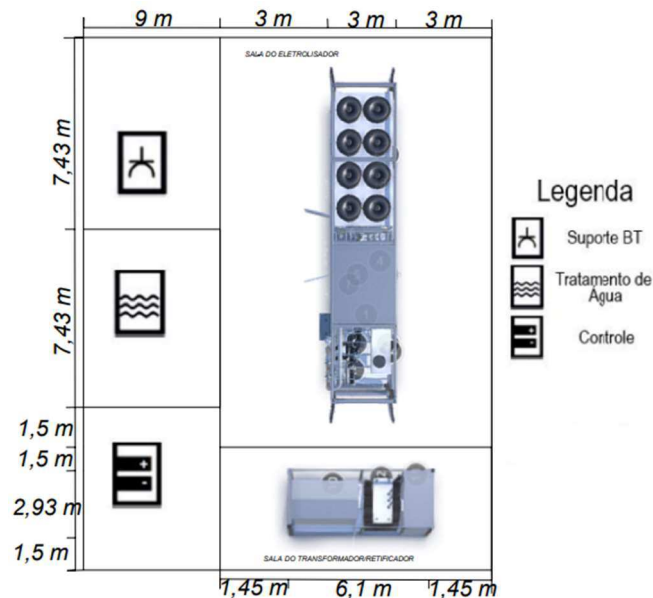
Tabela 5 - Energia e Água necessárias para o Eletrolisador

Análise Energética		Balanço de Massa	
		H ₂ O	14.331 kg
$E_{EL.hrs.EL}$	26250 kWh.dia	H ₂	457,38 kg

Fonte: Autor Próprio

A Figura 22 mostra um projeto simplificado do local de instalação do eletrolisador, com suporte BT, estação de tratamento d'água, espaço de controle da planta, espaço para o contêiner do eletrolisador e espaço para o contêiner do retificador com o transformador.

Figura 21 - Projeto de Instalação da Estação de Eletrólise



Fonte: Autor Próprio

5.2 Compressor

Os compressores devem atender uma demanda diária de 457,38 kg de hidrogênio (H_2), há uma pressão de 2 MPa, e eleva-la há uma pressão de 45 MPa. Foi escolhido para base de cálculo o compressor HAUG SIRIUS 33G com um poder de vazão (Pr_c) de 66 m^3/h com uma potência ($P_{Compressores}$) de 15,9 kW. O hidrogênio possui densidade (D_g) de 0,08987 kg/m^3 , de acordo com a equação (14) a taxa de compressão mínima é de 5,93142 kg/h para um compressor. Com 10 compressores necessitaria de aproximadamente de 8 horas de trabalho por dia.

A energia elétrica que será gasta no processo de compressão ($E_{ele.Compressores}$) de acordo com a equação (15) é de 1272 kWh.dia.

5.3 Estação de Reabastecimento

Segundo FCH JU (2017), uma estação de reabastecimento de grande porte tem capacidade de abastecer até 6000 kg/dia, logo se faz necessário apenas uma estação. O principal gasto de energia, como já foi dito no capítulo 4, é o consumo específico para variação de temperatura. Calculando o consumo específico (CE_{Hrs}) com uma temperatura ambiente de 35°C (T_{AMB}) obteve-se a um valor de 0,5089, de acordo com a equação (16). A partir daí, pôde-se calcular o valor gasto de energia elétrica diário na estação de reabastecimento, chegando a um valor de 232 kWh.dia, de acordo com a equação (17).

5.4 Tanque de Armazenamento

Esse estudo considera que o tanque de armazenamento fique próximo à estação de eletrólise, diminuindo os gastos com transporte. Serão dois tanques, um de baixa pressão alimentador pela estação de eletrólise e o segundo de alta pressão alimentado pelo compressor e com saída para abastecimento dos ônibus. O tanque de baixa pressão terá capacidade de armazenar a demanda de produção diária de 457,38 kg com uma pressão de 2 MPa há 27°C , nessas condições o hidrogênio se encontra com uma densidade de $1,61 \text{ kg/m}^3$, de acordo com Micena (2021), fazendo uma razão dos valores chegamos há um tanque com capacidade de $288,36 \text{ m}^3$.

O tanque de alta pressão também tem capacidade de suportar a demanda diária de produção, porém com uma pressão de 45 MPa há uma temperatura de 27°C , o hidrogênio se encontra com uma densidade de $28,184 \text{ kg/m}^3$, de acordo com CMB.Tech (2021), assim fazendo uma razão o tanque de alta pressão necessita de $16,23 \text{ m}^3$ de volume.

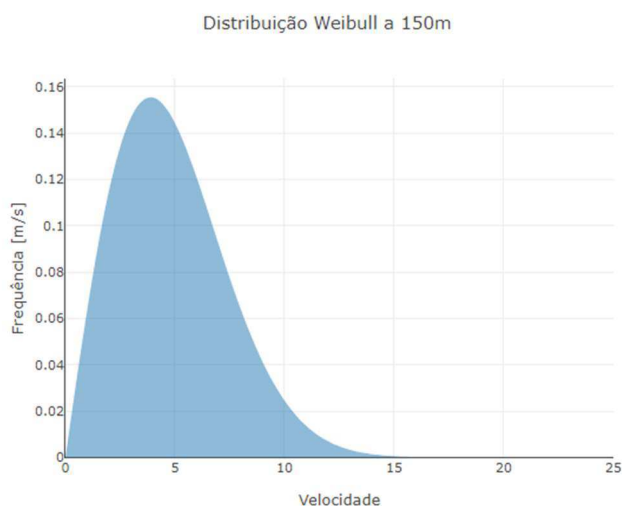
5.5 Planta de Geração Eólica

Para a planta eólica, o cálculo para a distribuição de Weibull é essencial, por sorte o Atlas eólico e Solar disponibiliza o gráfico com a curva da distribuição para a cidade de Sobral, como visto no Gráfico 4. Esse gráfico considera uma altura de 150 metros, um fator de forma “k” de 2.0, um fator de escala “c” de distribuição de Weibull

de 5,5 m/s, um fator de capacidade média anual médio de 17,2% e uma densidade do ar de 1,15 kg/m³.

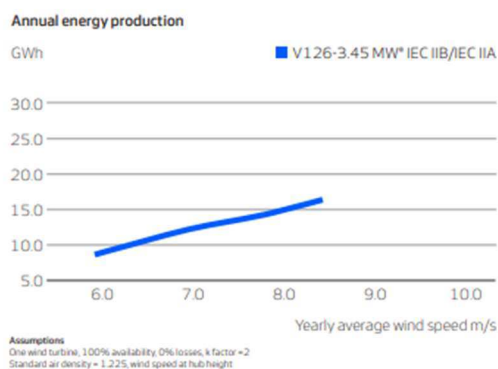
Considerando os valores de produção média anual da turbina escolhida, de acordo com o Gráfico 3, a frequência de ventos de velocidade alta é muito baixa. Com uma velocidade média de 4,9 m/s não é suficiente para uma produção aceitável da turbina. Examinando outras turbinas com tamanhos e potências diferentes, foi analisado que a velocidade não conseguiria atingir uma produção aceitável nas mesmas. Isso mostra que os ventos de Sobral não têm uma constância de velocidade alta para uma produção de energia eólica aceitável para esta aplicação. Os Gráficos 5 e 6 mostram a produção média anual baseado na velocidade média anual dos ventos de turbinas Vestas, com 126 e 90 metros de altura e potências de 4 e 2 MW, respectivamente.

Gráfico 4- Distribuição de Weibull para a cidade de Sobral



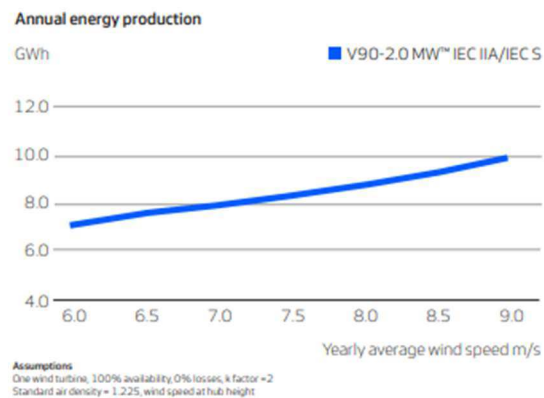
Fonte: Atlas Eólico e Solar do Ceará, 2023

Gráfico 5- Produção Média Anual de Energia V126



Fonte: Vestas

Gráfico 6 - Produção Média Anual de Energia V90

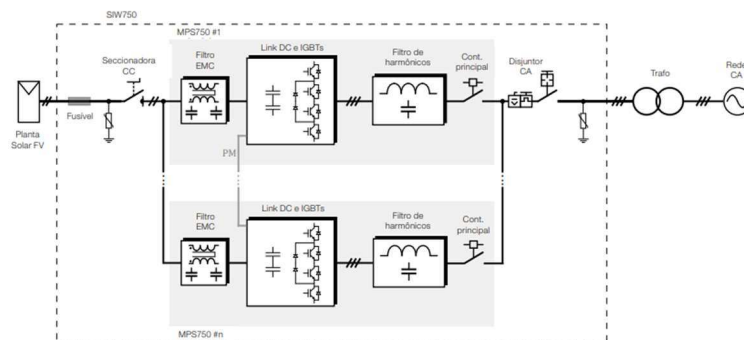


Fonte: Vestas

5.6 Planta de Geração Solar

Utilizando a equação (20), inserindo os valores de irradiação média da cidade de Sobral de 5,51 (kWh/m².dia), dado na Figura 20, o valor de energia necessária diariamente em toda a planta de produção de hidrogênio de 27.754 kWh.dia e um fator de eficiência de 0,9 obtém-se um valor de 4.991 kW, fazendo um produto desse valor com o fator de segurança de 1,1 encontra um valor de 5.490 kW de potência mínima para instalação. Foram escolhidos duas centrais de inversão solar da WEG de grande capacidade, modelo SIW750-3.1-600 para título de cálculo, com uma potência de 3000 kWp a uma temperatura de -10°C há +40°C. A Figura 22 mostra o diagrama de funcionamento da central inversora.

Figura 22- Diagrama Inversor SIW750-3.1-600



Fonte: WEG

Para cálculo da quantidade de placas mínimas necessárias, utilizou-se a equação (21), calculou-se um valor de 8.416 placas da marca Lepton com potência de 665W. De acordo com os dados do inversor e da placa disponível nas Tabelas 2 e 3, o

inversor escolhido comporta essa quantidade de placas. Ele tem entrada de até 20 strings, então foi feito um aumento na quantidade de placas para cada strings ficar com um valor igual, aumentando para 8440 placas sendo 4220 para cada inversor, dispostas em 20 circuitos de 211 placas.

A placa escolhida ocupa um espaço de $3,11 \text{ m}^2$, então todas as placas ocupam uma área útil total de 26164 m^2 , essa área é apenas 80% da planta total do parque de energia solar, já que entre as placas se faz necessário espaço para manutenção, passagem de transporte e evitar sombreamento de uma fileira por cima da outra. A área total do parque ficaria em 32705 m^2 em hectares um valor de 3,27, não é um espaço tão grande comparando as grandes fazendas de energia solar.

5.7 Viabilidade Econômica

Após quantificar todos os itens necessários e suas potências para toda a cadeia de produção de hidrogênio e da planta de energia, foram calculados os custos necessários para aquisição dos mesmos, de acordo com a Tabela 4 foi criada a Tabela 7 com os valores de custos. Foram adicionados valores complementares para a aquisição em relação ao valor final calculado, sendo eles: 5% para a preparação do terreno, 10% do valor para engenharia, 5% para contingências e 3% para permissões, de acordo com Micena (2020).

A Tabela 7 mostra os custos de cada parte do projeto, tendo um custo final de aproximadamente US\$ 12,27 milhões, considerando a vida útil da planta solar de 25 anos e a planta de eletrólise de 20 anos.

Outro custo que pode ser calculado é o valor da água necessária para produção do hidrogênio, de acordo com a Serviço Autônomo de Água e Esgoto, distribuidora de água do Ceará, o valor do m^3 é R\$33,53 para categoria industrial acima de 50 m^3 , considerando a densidade da água 1000 kg/m^3 o valor gasto anualmente é de R\$ 480.518,43,00, levando em consideração a taxa de câmbio do dólar de R\$ 4,95, retirado no dia 20 de outubro de 2023, o gasto em dólar seria de US\$ 97.074,00.

Tabela 6- Custos de Aquisição

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	INVESTIMENTO(US\$)
Planta Solar	6000 kW	4.770.000,00
Eletrolisador	1250 kW	2.890.905,00
Compressor	10 x 15,9 kW	854.365,00

Tanque de BP	464,65 kg	465.115,00
Tanque de AP	464,65 kg	694.652,00
Subsistema de Operação	464,65 kg/dia	132.426,00
Posto de Abastecimento	1 x 6000 kg/dia	170.000,00
TOTAL		9.977.463,00
PREPARAÇÃO DE TERRENO		498.873,15
PERMISSÕES		299.323,90
CONTIGÊNCIAS		498.873,15
ENGENHARIA		997.746,30
INVESTIMENTO TOTAL		12.272.279,50

Fonte: Autor Próprio

Calculando os custos anuais com combustível para a frota utilizada atualmente, com um uso de 0,4 l/km de diesel para 21 veículos percorrendo em média 180 km por dia, se encontra uma quantidade necessária diariamente de 1512 litros de óleo diesel. De acordo com a Petrobras, o preço do óleo diesel coletado no mês de outubro de 2023 está com um valor médio para o consumidor de R\$ 6,22, já considerando os impostos, tendo assim um custo anual de R\$ 3.432.693,60, fazendo a conversão para o dólar utilizando a taxa de câmbio de R\$ 4,95 se obtém um valor de US\$ 696.286,70.

Sabendo a quantidade de quilômetros percorrido pelos ônibus diariamente de 180 km para cada veículo, a frota ativa contendo 21 veículos, pode-se calcular com o auxílio da tabela 5 os valores referentes a emissão dos gases pelos veículos.

Tabela 7 - Custo dos GEE's

Gás Emitido	Quantidade (t, anual)	Valor Anual (US\$)
CO ₂	1.766,02	191.100,60
CO	2,07	1.393,78
Nox	2,61	8.991,65
Hidrocarbonetos	0,23	685,5
Material Particulado	0,23	4.053,07
Valor Total:		206.224,60

Fonte: Autor Próprio

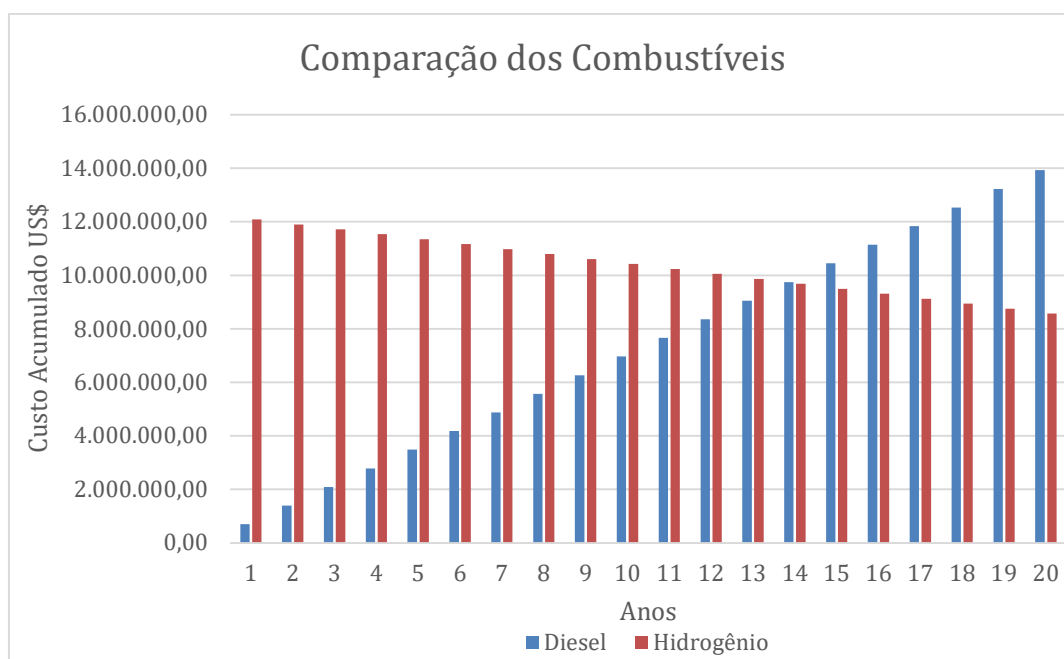
Com a efetivação da proposta, os valores gastos com óleo diesel seriam trocados pelo custo de aquisição de todo o projeto com o valor da água, e seria descontado o valor dos gases emitidos na atmosfera.

Um grande impasse em toda a proposta é o alto custo de aquisição dos novos veículos que custam em torno de US\$ 350.877,72, segundo Miranda (2018), enquanto o

ônibus normal custa em média US\$ 87.719,30. A troca total da frota de 21 veículos custaria em torno de US\$ 7.368.432,12.

No Gráfico 7, foi feita uma comparação dos combustíveis ao longo de 20 anos, pois é o tempo de vida útil da planta de geração de hidrogênio, nesse mesmo gráfico é considerado o valor do diesel comparado com todo o custo de implementação do hidrogênio, somado aos gastos com água e abatido os valores dos gases de efeito estufa que não serão mais gerados, o valor da troca dos ônibus não foi considerado.

Gráfico 7 - Comparação dos Combustíveis ao longo de 20 anos



Fonte: Autor Próprio

O Gráfico 7 mostra ao fim de 20 anos uma economia de US\$ 5.358.206,00 do uso do hidrogênio em relação ao diesel, esse valor conseguiria custear 72,71% da nova frota de ônibus. Considerando que é uma tecnologia nova e tende a ter seu preço diminuído ao longo dos anos, é um valor aceitável considerando uma quantidade de 1771 toneladas de GEE's lançados na atmosfera anualmente pela frota de ônibus movidos a diesel.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho almejou a elaboração de uma proposta de aplicação do Hidrogênio Verde produzido a partir de Energia Renovável no transporte coletivo na cidade de Sobral. Dessa forma, foi definido o dimensionamento e análise de uma estação de produção e abastecimento de hidrogênio verde.

Com a finalidade de entender a proposta, primeiramente foi feita uma revisão sobre a tecnologia de produção de Hidrogênio, Energia Eólica, Energia Solar e sobre veículos movidos a célula de combustível.

Em seguida, com a metodologia adotada, foi realizado uma análise técnica com o objetivo de calcular os principais parâmetros. Foi calculada uma demanda necessária diária de 457,38 kg de gás hidrogênio para atender a frota de 21 ônibus. Foi idealizado uma estação de eletrólise a fim de suprir essa demanda com capacidade de produção de 531 kg/dia de gás hidrogênio e uma potência de 1250 kW. Com os parâmetros em mãos foi calculada uma demanda diária de energia de 26.250 kWh.

Para comprimir todo o gás hidrogênio produzido pela estação, foi utilizado 10 compressores com potência de 15,9 kW, necessitando de uma energia diária de 1272 kWh. Os volumes dos tanques foram calculados em 288,36 m³ para o de baixa pressão (2 MPa) e 16,23 m³ para o de alta pressão (45 MPa). E por fim uma estação de abastecimento que necessita de uma demanda diária de energia de 232 kWh.

Com a demanda energética total calculada para a produção de hidrogênio de 27.754 kWh por dia, foi analisado, qual fonte de energia atenderia a planta de hidrogênio sendo instalada na cidade de Sobral, Solar ou Eólica. Foi examinado que o potencial Eólico da cidade de Sobral para a finalidade dessa proposta não é viável, por outro lado o potencial Solar consegue atender a demanda. Foi dimensionado então um parque solar com 8416 placas com potência de 665 W cada placa e duas estações inversoras de 3000 kW cada, ocupando um espaço de 32705 m².

Por fim, foi feita uma análise econômica da substituição da frota atual de veículos por ônibus movidos a célula de combustível, abastecidos com hidrogênio, dando

um valor total de projeto de US\$ 19.640.711,62 considerando a planta de geração solar, planta de geração do hidrogênio e a troca dos 21 ônibus. Para uma melhor visão do leitor foi separado o valor dos projetos do valor dos ônibus, onde comparando apenas os combustíveis ao longo de 20 anos houve um Payback de US\$ 5.358.206,00, valor esse que conseguiria custear 70,71% da nova frota de ônibus.

Dessa forma, pode-se afirmar que a tentativa de diminuir a emissão de gases do efeito estufa através da troca de ônibus movidos a combustíveis fósseis por ônibus movidos a célula de combustíveis abastecidos com hidrogênio verde é viável, em virtude da disponibilização comercial dos equipamentos necessários e da quantidade de gases que deixarão de ser emitidos na atmosfera.

Por outro lado, olhando pelo lado econômico, ainda não se tem um Payback positivo por conta do alto valor dos ônibus. A partir de uma ação de incentivo público, esse problema poderia ser contornado, visando um ganho de produção em escala que com o tempo diminuiria os valores de aquisição, ou o incentivo da produção dos equipamentos e veículos no país considerando que a maioria dos equipamentos são importados, com tudo isso fortalecendo a cadeia do Hidrogênio Verde.

Destaca-se o não aproveitamento do gás Oxigênio também produzido pela planta de eletrólise, que poderia ter um fim comercial a fim de melhorar o Payback.

Tendo em vista trabalhos futuros, pode-se citar uma planta de produção para abastecimentos de outros veículos, também pode-se citar um trabalho considerando alguma finalidade para o gás oxigênio produzido. Outras fontes de energia podem ser analisadas, como a biomassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABH2. **3º Congresso Brasileiro de Hidrogênio**. Disponível em: <https://abh2.org/3-cbh2>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ACP. **Carros a Hidrogênio ou Elétricos**. Disponível em: <https://www.acp.pt/eletricos/tudo-sobre-eletricos/manutencao-de-um-eletrico/detalhe/carros-a-hidrogenio-ou-eletricos>. Acesso em: 18 set. 2023.

ADECE. **Atlas Eólico e Solar do Ceará**. 2023. Disponível em: <http://atlas.adece.ce.gov.br/>. Acesso em: 22 ago. 2023

AGUIAR, S. D. O. et al. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. **Transportes**, v. 23, n. 3, p. 35, 2015.

ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? **Revista USP**, [S. l.], n. 103, p. 13-24, 2014. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p13-24. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/99279> Acesso em: 31 ago. 2023.

AZEVEDO, Julia. **Cores do hidrogênio e suas tecnologias**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/cores-do-hidrogenio/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

BERTO, Alessandra. **Módulos Fotovoltaicos – Parâmetros Técnicos**. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/blog/modulos-fotovoltaicos-parametros-tecnicos/>. Acesso em: 19 out. 2023.

BRAGA, Gustavo Garcia Arantes. Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável. 2015. 80 f. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/131893>. Acesso em: 7 nov. 2021.

CDP. Como os governos estaduais brasileiros enfrentam a mudança do clima? **Resumo das respostas dos estados brasileiros ao questionário de Estados & Regiões de 2020 do CDP**, 82 p. 4, 2021. Disponível em: https://6fefcbb86e61af1b2fc4c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/005/845/original/CDP-relatorio-governoseclimaFINAL_.pdf?1628892687 Acesso em: 08 ago. 2023.

CAGECE. **Estrutura Tarifária**. 2023. Disponível em:

<https://www.cagece.com.br/produtos-e-servicos/precos-e-prazos/estrutura-tarifaria/>.

Acesso em 29 set. 2023.

CAPONI R, MONFORTI F A, BOCCI E, VALENTI G, DELLA PIETRA M.

Thermodynamic modeling of hydrogen refueling for heavy-duty fuel cell buses and comparison with aggregated real data. **International Journal Hydrogen Energy**. v. 46, n.35, p. 18630 - 18643, 2021.

CARMO, M. et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 12, p. 4901 - 4934, 2013.

CMB.TECH. **Hydrogen Tools**. 2021. Disponível em: <https://cmb.tech/hydrogen-tools>.

Acesso em: 08 set. 2023.

CRESESB. **Energia Solar fotovoltaica**. Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321.

Acesso em: 17 set. 2023.

CRESESB. **Potencial Solar – SunData v 3.0**. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 17 set. 2023.

CUNHA, E. A. A., SIQUEIRA, J. A. C., NOGUEIRA, C. E. C. e DINIZ, A. M.

Aspectos históricos da energia eólica no brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, 2019

DELOITTE CHINA. Fueling the Future of Mobility. **Hydrogen and fuel cell solutions for transportation**. Vol. 1, 2020.

ELGOWAINY, A.; REDDI, K.; LEE, D.,Y.; RUSTAGI, N.; GUPTA, E. Techno-economic and thermodynamic analysis of pre-cooling systems at gaseous hydrogen refueling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v: 42, n. 49, p. 29067-29079, 2017

FAERMAN, H.; FREIRE, W. Brasil pode ser hub de exportação de hidrogênio. **Canal Energia**, 2020. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/especiais/53146389/brasil-podeser-hub-de-exportacao-dehidrogenio>. Acesso em: 29 set. 2023.

FARIAS, Rubens. **Apostila de Pneumática**. Disponível em: <http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/apostila%20de%20pneumatica.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

FCH JU, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2017). **New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots**. Disponível em: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:fAhzYtm59H0J:newbusfuel.eu/wpccontent/uploads/2017/03/NewBusFuel_D4.3_Guidance-document-for-large-scalehydrogenrefuelling_final.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br&client=opera. Acesso em: 27 set. 2023.

FERREIRA, Paulo Fabrício Palhavam. Infraestrutura para Uso Energético do Hidrogênio: Estações de Abastecimento para Veículos com Células a Combustível. **Tese** (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

FERREIRA DA SILVA, Sandra Sereide; ALVES, Allan Carlos; CAVALCANTI RAMALHO, Ângela Maria. Energia eólica e complementaridade energética: Estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na Região Nordeste do Brasil. **Qualitas Revista Eletrônica**, [S.l.], v. 19, n. 3, p. 53-72, junho 2020. ISSN 1677-4280. Disponível em: <http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/view/5640>. Acesso em: 10 set. 2023.

FURLAN, André Luís. Análise técnica e econômica do uso do hidrogênio como meio armazenador de energia elétrica proveniente de fontes eólicas. **Tese** (Doutorado). Campinas, 84 SP: [s.n.], 2012. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/263953/1/Furlan_AndreLuis_D.pdf. Acesso em 05 out. 2023.

GALLANDAT, N., ROMANOWICZ, K. and ZUTTEL, A. An Analytical Model for the Electrolyser Performance Derived from Materials Parameters. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 5, p. 34-49, 2017.

GEODESING. **Conhecimento básico sobre o recurso solar**. Disponível em: https://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html. Acesso em: 03 out. 2023.

GODOY, G. A. R. Rodovia do hidrogênio Brasil - Paraguai: estudo técnico, econômico e ambiental. 2013. 163 p. **Tese** (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264135>. Acesso em: 29 set. 2023.

GRÜGER, F.; DYLEWSKI, L.; ROBINIUS, M.; STOLTEN, D. Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. **Applied Energy**, Londres, v. 228, n. July, p. 1540–1549, 2018

HODGE, B. Keith. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 324p.

HOSSEINI, M.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. **Journal of Power Sources**, Lausanne, v. 221, p. 372–380, 2013.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. 2021. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>. Acesso em: 27 set. 2023.

H2FUTURE. **A European Flagship Project for Generation and Use of Green Hydrogen**. 2019. Disponível em: <https://www.h2future-project.eu/images/news/H2FUTUREshortdescription.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

IPCC. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press

IBGE. **SOBRAL**. 2022. Disponível em:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sobral/panorama>. Acesso em: 22 ago. 2023

IEMA. **As emissões brasileiras de gases do efeito estufa nos setores de Energia e de processos Industriais em 2019**. 2020. Disponível em:

<https://energiaambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>. Acesso em: 22 set. 2023.

IRENA. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, **International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2018.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2019, **International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2020.

KOTOWICZ, J; BARTELA, Ł.; WEŁCEL, D.; DUBIEL, K. Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy. **Energy**, Amsterdam. v. 118, p. 156–171, 1 jan. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216318229> . Acesso em: 15 out. 2023.

KREUER, K. D. On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells. **Journal of Membrane Science**, 2000.

LINARDI, M. **Introdução a Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**, 1.ed., São Paulo, SP: Artiliber, 2010.

MICENA, Raul Pereira. Estação de produção e abastecimento de hidrogênio solar: análise técnica e econômica. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.

MIRANDA, P. E. V. de. **Ônibus movido a hidrogênio desenvolvido no Brasil é destaque em conferência mundial**. 2018. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2018/06/17/onibus-movido-a-hidrogenio-desenvolvido-nobrasil-e-destaque-em-conferenciamundial/#:~:text=Paulo%20Em%C3%ADlio%20de%20Miranda%2C%20coordenador>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MIRANDA, P. E. V. de; CARREIRA, E. S.; NUNES, I. G. S. Brazilian hybrid electric hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol.42, pp. 13949-13959, 2017.

MORADI, R; GROTH, K M. Hydrogen Storage and delivery: Review of the state-of-the-art technologies and risk and reliability analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, 44(23), pp. 12254-12269, 2019

NEL HYDROGEN. **Water eletrolysers**. 2023. Disponível em: <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/>. Acesso em: 4 ago. 2023.

NEVES, Livia. **Com portos no Nordeste à frente, já há 42 projetos de hidrogênio verde no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/04/27/com-portos-no-nordeste-a-frente-estudo-identifica-42-projetos-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 23 set. 2023.

NOAA. **Global Monitoring Laboratory**. 2023. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 25 out. 2023.

NUB. **COP26 discute setor de transporte e proposta para texto final**. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/158058-cop26-discute-setor-de-transportes-e-propostas-para-texto-final>. Acesso em: 11 out. 2023.

ONS. **Evolução da capacidade instalada do SIN – Novembro de 2023 / Dezembro de 2027**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 09 out. 2023.

PAIVA, V. R. C. Monetização dos Benefícios Sociais e Ambientais da Eletrificação das Frotas de Ônibus. **9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 DIGITAL)**. v. 9. n. 1. 2021.

PEIXOTO, Karoline Paula. **Quantificação da Concentração de Dióxido de Carbono (CO₂) na Cidade de Ji-Paraná-Rondônia** – Universidade Federal de Rondônia, Departamento de Engenharia Ambiental, 2022.

PETROBRAS. **Como são formados os Preços > Diesel**. 2023. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-diesel>. Acesso em 27 set. 2023.

REIS, P. **Células de Combustível: Principais tipos e características**. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-tipos/>. Acesso em: 2 nov. 2023.

RIBEIRO, Carlos Henrique. **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Brasília, 2011.

RODRIGUES, R P. SOUZA, J E S. TAMBOR J H M. As Células a Combustível de Hidrogênio: Suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. **Anais do VII Seminário Internacional Ético Racial**. v. 7. n. 1. 2019.

SÃO PAULO GOVERNO DO ESTADO. **Hidrogênio renovável: entenda a tecnologia e as vantagens do projeto do Governo de SP**. 2023. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/hidrogenio-verde-entenda-a-tecnologia-e-as-vantagens-do-novo-projeto-do-governo-de-sp/#:~:text=centro%20de%20pesquisa,-,O%20hidrog%C3%AAnio%20produzido%20na%20esta%C3%A7%C3%A3o%20experimental%20ser%C3%A1%20usado%20para%20abastecer,exclusivamente%20no%20campus%20da%20USP>. Acesso: 28 ago. 2023.

SAUER. **Hydrogen Compressors: Dependable up to 500 bar – anywhere, anytime, anygas**. 2023. Disponível em:

https://www.ynna.cz/obrazkysoubory/sauer_hydrogen_compressors_en-378c4.pdf?redir. Acesso em 17 out. 2023.

SILVA, E. P. da. **Introdução À Tecnologia e Economia do Hidrogênio**. Unicamp: Campinas, 1991.

SHIYING, Wang; MENGPIN, Ge. **Transporte é a fonte de emissões que mais cresce. Veja o que dizem os números**. 2019. Disponível em:

<https://www.wribrasil.org.br/noticias/transporte-e-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-veja-o-que-dizem-os-numeros>. Acesso em: 25 out. 2023.

SOUZA, Ana Beatriz Barros. Análise comparativa do potencial da utilização de energia elétrica armazenada na forma de hidrogênio para aplicação energética e veicular. 2020. 1 recurso online (92 p.) **Dissertação** (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

TECMUNDO. **Ônibus movidos a hidrogênio começam a rodar na Escócia**. 2021.

Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/mobilidade-urbana-smart-cities/211702-escocia-ganha-primeira-frota-onibus-movidos-hidrogenio-mundo.htm#:~:text=A%20cidade%20escocesa%20de%20Aberdeen,CO2%20a%20cada%20quil%C3%B4metro%20percorrido>. Acesso em: 02 nov. 2023.

UFC. **Sobral**. Disponível em: <https://sobral.ufc.br/sobre/sobral/>. Acesso: 12 out. 2023

VARELLA, Carlos. **Histórico e Desenvolvimento dos Motores de Combustão Interna**. Disponível em:

http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/historico_e_desenvolvimento_dos_motores.pdf. Acesso: 15 out. 2023

VESTAS. **4 MW PLATAFORM**. Disponível em:

<https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform>. Acesso em: 25 set. 2023.

VESTAS. **2 MW PLATAFORM**. Disponível em:

<https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform>. Acesso em: 25 set. 2023.

WANG, Shuangyin; JIANG, San Ping. Prospects of fuel cell technologies. **National Science Review**, v. 4, n. 2, p. 163-166, 2017.

WEG. **Estação Inversora Solar SW750**. 2023. Disponível em:

https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/M%C3%B3dulos-e-Inversores-Fotovoltaicos/Esta%C3%A7%C3%A3o-Inversora-Solar-EISW750/Esta%C3%A7%C3%A3o-Inversora-Solar-EISW750/p/MKT_WDC_BRAZIL_SOLAR_INVERTER_STATION_EISW750.

Acesso em: 25 set. 2023.

WISER, R.H. BOLLINGER, M. **Wind Technologies Market Report**. 2019. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

WHITE MARTINS. **Hidrogênio**. 2023. Disponível em:

<https://www.whitemartins.com.br/gases/buy-compressed-hydrogen-gas-or-liquid-hydrogen>. Acesso em: 13 set. 2023.