



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

HARIEL ABREU PEREIRA

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA
NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA

FORTALEZA

2022

HARIEL ABREU PEREIRA

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA NO
TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Paulo de
Hollanda Cavalcante.

Coorientador: Prof. Dr. William Magalhães
Barcellos.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

P491p Pereira, Hariel Abreu.
Proposta de aplicação do Hidrogênio Verde via energia eólica no transporte coletivo urbano de Fortaleza / Hariel Abreu Pereira. – 2022.
86 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante.
Coorientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Hidrogênio Verde. 2. Energia eólica. 3. Descarbonização. 4. Transporte público. I. Título.

CDD 621.042

HARIEL ABREU PEREIRA

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA NO
TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Fernanda Leite Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr^a. Francisca Dalila Menezes Vasconcelos
Instituto de Planejamento de Fortaleza (Iplanfor)

Ao meu tio Leonardo Caverna, que apesar da partida, ainda me tem demonstrado, em memória, o significado do amor, da luta, da vida e da saudade... Ainda espero olhar pro lado e te ver depois de escutar "Meu sobrinho torto", que as vezes, por capricho, soava "Meu filho"...

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Michele, por todo amor e dedicação nos últimos 23 anos que me fizeram quem eu sou, sua luta e seu afeto me inspiram e me dão forças para ir mais além diariamente, obrigado;

À minha família: Márcio André, Emanuel, Camila, Sophia, Danilo, Marina, Joacy, Maria, Hercília, Francly, Antônio Maia, Margarida, Adriana, Adriano, Antônio Filho, Taciana, Matheus, Clarice, Luciana, Júlio César, Cauê, Wladimir, Darla, Pedro, Heitor, Samuel, Leonardo, Elaine e Saulo, meus agradecimentos por terem feito parte da minha trajetória;

À minha amiga, Desirée, por todas as experiências que compartilhamos na Universidade, o apoio, a companhia, a amizade, o amor e por dar cores a todos os dias cinzentos que eu teria passado sem você, muito obrigado;

Aos meus amigos: Torugo, Marina, Kamyla, Leandro, Bruna, Victória Eller, Pedro Davi, Jônatas, Vitor, Anderson, Dyego, Mourão, obrigado por todos os momentos;

Ao PET Energias, por ter me dado, durante anos, a honra de servir ao curso de Engenharia de Energias Renováveis, com aulas, eventos, cursos, visitas e outras das mais diversas experiências engrandecedoras e, por vezes, inusitadas junto aos colegas que compartilham o amor pelo PET;

Aos meus professores: Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante, Dr. William Magalhães Barcellos e Dr. Francisco Nivaldo de Aguiar Freire pelas orientações, ensinamentos, oportunidades, sobretudo a de contribuir na trilha acadêmica de mais centenas de outros alunos, que pavimentarão um futuro mais sustentável, meus mais sinceros agradecimentos;

À minha Luninha, por ter feito cada dia mais feliz desde que chegou por aqui, pelos beijo-beijos que acalmam e pelos passeios que alegram, muito obrigado;

A todos que presenciaram minhas aulas, muito obrigado pela confiança, ensinar me fez feliz, e estar com vocês me deu um propósito, a certeza do que eu vou ser quando crescer: professor.

“Enfrentarei tudo com um sorriso no rosto, nunca vou desistir, o *show* tem que continuar.”

(Freddie Mercury).

RESUMO

A utilização de combustíveis fósseis, como principal vetor energético das atividades econômicas desde a Segunda Revolução Industrial, provocou o aumento substancial na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, causando impactos ambientais em diversos locais do planeta. Em vista disso, na tentativa de desacelerar as mudanças climáticas, diversos segmentos da sociedade propõem a transição energética das atividades econômicas para um *modus operandi* mais sustentável. Neste trabalho, propõe-se a aplicação do Hidrogênio Verde sustentado por Energia Eólica para a descarbonização das tecnologias de propulsão do transporte coletivo urbano da cidade de Fortaleza, no Brasil, a partir da substituição dos ônibus tradicionais movidos à diesel por ônibus com células a combustível à hidrogênio, entretanto, a utilização desse gás ainda tem sido incipiente devido à alta demanda energética para efetivar sua produção. Para atender a demanda da proposta de implantação em um município como Fortaleza, é necessário produzir 37.819,32 kg de hidrogênio por dia, que deve passar por diversos processos para ser entregue à nova frota de ônibus a uma pressão de 350 bar, nas estações de reabastecimento. Dessa forma, propõe-se a caracterização de subsistemas de produção, armazenamento, compressão e reabastecimento, por meio do dimensionamento e de análises energética, econômica e de logística, visando evidenciar os benefícios técnico-científicos e socioambientais da implantação da eletromobilidade no transporte coletivo urbano. Os resultados revelaram uma necessidade de geração anual de energia elétrica de 766.93 GWh para suprir o consumo de todos os subsistemas contemplados por esta proposta. Nesse sentido, dimensionou-se um Parque Eólico com capacidade de geração suficiente para suprir a demanda e as suas perdas elétricas e mecânicas, totalizando 840 GWh anuais. Desse total energético, 54,75% deverão ser efetivamente convertidos em hidrogênio, 41,93% deverão representar a totalidade das perdas energéticas nos subsistemas e 3,32% estarão relacionados ao consumo das estações de reabastecimento, dos componentes auxiliares e da compressão. Por fim, a análise econômica da solução proposta indicou uma economia de US\$ 359.541.391,20 no tempo de vida útil da maioria dos equipamentos e um *payback* do investimento inicial em 13 anos.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; energia eólica; descarbonização; e transporte público.

ABSTRACT

The fossil fuels' use, as main energy vector of economic activities since the Second Industrial Revolution, caused a substantial increase in concentration of greenhouse gases in atmosphere, causing environmental impacts in several places on planet. In view of this, in an attempt to slow down climate change, various segments of society propose the energy transition from economic activities to a more sustainable *modus operandi*. In this work, we propose the application of Green Hydrogen sustained by Wind Energy for decarbonization of propulsion technologies in urban public transport in Fortaleza, Brazil, by replacing traditional diesel-powered buses with fuel cells electric buses, however, this gas' use is still incipient due to high energy demand to carry out its production. To meet the demand of the proposed implementation in a municipality like Fortaleza, it is necessary to produce 37,819.32 kg of hydrogen per day, which must go through several processes to be delivered to new fleet at a pressure of 350 bar at refueling stations. Thus, it is proposed the characterization of production, storage, compression and replenishment subsystems, through sizing and energy, economic and logistical analysis, aiming to highlight the technical-scientific and socio-environmental benefits of implementing electromobility in urban public transport. The results revealed a need for annual electricity generation of 766.93 GWh to supply the consumption of all subsystems contemplated by this proposal. In this sense, a wind farm with sufficient generation capacity was designed to supply the demand and its electrical and mechanical losses, totaling 840 GWh per year. Of this total, 54.75% should be effectively delivered in the form of hydrogen, 41.93% should represent the totality of energy losses in the subsystems and 3.32% will be related to the consumption of refueling stations, auxiliary components and compression. Finally, the economic analysis of the proposed solution indicated a US\$ 359,541,391.20 savings in lifetime of most equipment and a payback of the initial investment of 13 years.

Keywords: Green hydrogen; wind energy; decarbonization; and public transport.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Diagrama de uma HAWT | 23 |
| Figura 2 – Componentes da Nacele de uma HAWT | 24 |
| Figura 3 – Aplicações do Hidrogênio Verde | 27 |
| Figura 4 – Classificações do Hidrogênio quanto ao modo de produção | 28 |
| Figura 5 – Diagrama Termodinâmico da Produção do Hidrogênio Verde | 29 |
| Figura 6 – Eletrólise Alcalina | 30 |
| Figura 7 – Eletrolisador AEC | 31 |
| Figura 8 – Diagrama AEC | 31 |
| Figura 9 – Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons | 32 |
| Figura 10 – Eletrolisador PEMEC | 33 |
| Figura 11 – Diagrama PEMEC | 33 |
| Figura 12 – Eletrólise de Óxido Sólido | 35 |
| Figura 13 – Diagrama SOEC | 35 |
| Figura 14 – Aplicações de Armazenamento de Hidrogênio | 36 |
| Figura 15 – Tipos de Armazenamento por Fisissorção e por Quimissorção | 37 |
| Figura 16 – Diagrama Termodinâmico de Conversão do Hidrogênio em Energia Elétrica | 39 |
| Figura 17 – Esquemas e Comparativo entre tipos de Células a Combustível | 41 |
| Figura 18 – Funcionamento e Componentes de uma PEMFC | 43 |
| Figura 19 – Membrana de Eletrólito Polimérico (Náfiön®) | 44 |
| Figura 20 – Esquema de Funcionamento de um FCEB | 45 |
| Figura 21 – Ônibus Brasileiro a Hidrogênio / EMTU | 48 |
| Figura 22 – Ônibus Híbrido Elétrico-Hidrogênio / COPPE | 49 |
| Figura 23 – Sistema Viário Básico de Fortaleza | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 – Diagrama de uma HRS típica | 52 |
| Figura 25 – Modelo de FCEB escolhido | 54 |
| Figura 26 – Volumes de Controle da Análise Energética | 56 |
| Figura 27 – Estação de Eletrólise instalada | 58 |
| Figura 28 – Área escolhida para o Parque Eólico | 61 |
| Figura 29 – Distribuição de Frequência dos Ventos nas áreas | 61 |
| Figura 30 – Rosa dos Ventos nas áreas | 62 |
| Figura 31 – Estimativa de geração anual | 63 |
| Figura 32 – Estação de Eletrólise | 67 |
| Figura 33 – <i>Layout</i> do Parque Eólico | 71 |
| Figura 34 – Diagrama Unifilar simplificado do Parque Eólico | 72 |
| Figura 35 – Diagrama de <i>Sankey</i> | 73 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Quantidade de Emissões de CO2 do setor de Energia em Fortaleza-CE | 17 |
| Gráfico 2 – Custo do kWh médio no Brasil produzido por Energia eólica | 25 |
| Gráfico 3 – Potência Eólica Instalada Acumulada no Brasil | 26 |
| Gráfico 4 – Quantidade de Energia por subsistema | 73 |
| Gráfico 5 – Comparativo entre combustíveis | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Tipos de Célula a Combustível | 40 |
| Tabela 2 – Semirreações de cada Célula a Combustível | 41 |
| Tabela 3 – Potência, Temperatura, Eficiência Típica e Status de cada Célula a Combustível | 42 |
| Tabela 4 – Projetos com FCEBs na Europa | 47 |
| Tabela 5 – Especificações Técnicas do Aerogerador | 63 |
| Tabela 6 – Levantamento de Custos dos Equipamentos | 65 |
| Tabela 7 – Valores e Emissões referentes a cada gás poluente | 65 |
| Tabela 8 – Resultados das Estações de Eletrólise | 68 |
| Tabela 9 – Custo de Investimento em Equipamentos | 74 |
| Tabela 10 – Valores e Emissões anuais em Fortaleza | 75 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 OBJETIVOS | 20 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 3.1 Energia Eólica | 21 |
| <i>3.1.1 Aspectos Técnicos</i> | <i>21</i> |
| <i>3.1.2 Evolução e Perspectivas de Mercado para Energia Eólica</i> | <i>25</i> |
| 3.2 Tecnologia do Hidrogênio | 26 |
| <i>3.2.1 Eletrólise Sustentada por Energia Renovável</i> | <i>29</i> |
| <i>3.2.1.1 Eletrólise Alcalina e Eletrolisadores AEC</i> | <i>30</i> |
| <i>3.2.1.2 Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons e Eletrolisadores PEMEC</i> | <i>32</i> |
| <i>3.2.1.3 Eletrólise de Óxido Sólido e Eletrolisadores SOEC</i> | <i>34</i> |
| 3.2.2 Armazenamento | 35 |
| <i>3.2.2.1 Armazenamento no Estado Gasoso</i> | <i>37</i> |
| 3.2.3 Célula a Combustível | 38 |
| <i>3.2.3.1 Célula a Combustível PEMFC</i> | <i>42</i> |
| 3.3 Ônibus com Células de Combustível à Hidrogênio (FCEBs) | 45 |
| <i>3.3.1 Evolução e Perspectivas de Implementação de FCEBs</i> | <i>46</i> |
| <i>3.3.2 Consumo Médio dos FCEBs</i> | <i>49</i> |
| 3.4 Município de Fortaleza e Logística de Reabastecimento de Hidrogênio | 50 |
| 4 METODOLOGIA | 53 |
| 4.1 Classificação da Pesquisa | 53 |
| 4.2 Caracterização da Proposta | 53 |
| <i>4.2.1 Demanda, Produção e Utilização</i> | <i>54</i> |
| <i>4.2.2 Análise Energética</i> | <i>55</i> |
| <i>4.2.3 Estações de Eletrólise</i> | <i>57</i> |
| <i>4.2.4 Compressores</i> | <i>58</i> |
| <i>4.2.5 Estações de Reabastecimento</i> | <i>58</i> |
| <i>4.2.6 Tanques de Armazenamento</i> | <i>59</i> |
| <i>4.2.7 Parque Eólico</i> | <i>59</i> |
| <i>4.2.7.1 Localidade Escolhida</i> | <i>60</i> |
| <i>4.2.7.2 Aerogerador Escolhido</i> | <i>63</i> |
| <i>4.2.8 Análise Econômica</i> | <i>64</i> |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 66 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1 Estações de Eletrólise | 66 |
| 5.2 Compressores | 68 |
| 5.3 Estações de Reabastecimento | 69 |
| 5.4 Tanques de Armazenamento | 69 |
| 5.5 Parque Eólico | 70 |
| 5.6 Diagrama de Sankey | 72 |
| 5.7 Análise Econômica..... | 74 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 78 |
| REFERÊNCIAS | 81 |

1 INTRODUÇÃO

Desde a Segunda Revolução Industrial, ocorrida na segunda metade do século XIX e marcada, sobretudo, pelas inovações tecnológicas, a exemplo das Máquinas a Vapor e do Motor à Combustão Interna (MCI), tem sido notório o aumento substancial das emissões de carbono e de outros gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera.

Isso levou ao aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), que passou de cerca de 280 partes por milhão (ppm), na era pré-industrial (ARTAXO, 2014), para uma concentração média de 410 ppm segundo o sexto relatório de avaliação do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*), que também relata uma concentração média de outros GEEs como metano (CH₄) de 1866 partes por bilhão (ppb) e dióxido de carbono (N₂O) de 332 ppb, valores que atestam inequivocadamente o impacto das atividades humanas nas condições climáticas do planeta.

Os impactos ambientais provocados pela alta concentração de GEEs na atmosfera, bem como pelos altos níveis de emissão diária, sobretudo nos países desenvolvidos, têm motivado o debate entre cientistas, Organizações Não-Governamentais (ONGs) e a Organização das Nações Unidas (ONU), tendo como enfoque o combate às alterações climáticas causadas pelo Aquecimento Global. Nesse contexto emerge o Acordo de Paris que estabeleceu, em 2015, uma abordagem para ação climática, cujas determinações incluem, no artigo 2º, inciso I:

- a) Deter o aumento da temperatura global média do planeta abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e empenhar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos da mudança climática;
- b) Aumentar a habilidade para adaptação aos impactos adversos das mudanças climáticas, estimular a resiliência climática e o desenvolvimento com baixas emissões de GEEs, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos;
- c) Tornar os fluxos monetários consistentes com um caminho direcionado à redução das emissões de GEEs e ao desenvolvimento resiliente do ponto de vista climático; (Nações Unidas, 2015).

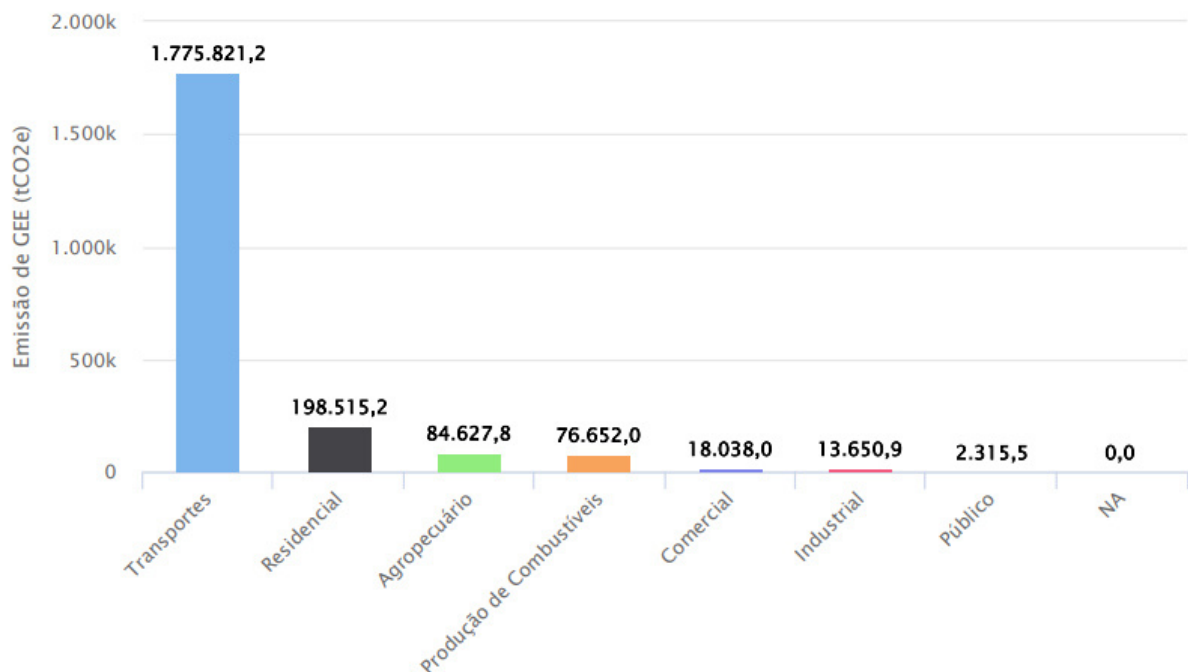
A Decisão da COP-21, adotada em conjunto com o Acordo de Paris, reconhece também o papel dos *non-party stakeholders* para o cumprimento das metas de um instrumento jurídico internacional sobre o clima. O termo *non-party stakeholder* engloba todos os atores que não são as Partes, ou seja, todos os outros atores que não são os países da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, do inglês *United Nation Framework Convention on Climate Change*). Nesse sentido, os *non-party stakeholders* são municípios, estados, regiões, empresas, investidores, organizações da sociedade civil e academia, que, ao pleitear compromissos climáticos voluntários, contribuem para reduzir a lacuna de emissões entre os compromissos formais adotados pelos países e o montante necessário de redução para o cumprimento das metas do Acordo de Paris. (CDP, 2021).

A gestão do ex-prefeito de Fortaleza, Roberto Cláudio, idealizou o Plano Fortaleza 2040 com elaboração coordenada pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (Iplanfor) e com execução técnica da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura da Universidade Federal do Ceará (FCPC/UFC), propondo entre sete eixos estratégicos de desenvolvimento, o Eixo 4, que promove ações para o favorecimento de uma Cidade Ambientalmente Sustentável. Para isso, foram estabelecidas três estratégias claras, destacando a Estratégia 2 – Aproveitar o Potencial Energético da Cidade:

Os potenciais energéticos de Fortaleza, a saber, eficiência no consumo; geração distribuída de energia elétrica e aproveitamento energético de resíduos deverão ser executados de forma integrada, estimulando e fomentando a atração de investimentos públicos e privados, resultando em uma cadeia produtiva sólida, eficiente, confiável e competitiva, e fomentando um ambiente fértil para o desenvolvimento científico e tecnológico de soluções energéticas e o empreendedorismo de negócios inovadores para as vocações energéticas do município. (FORTALEZA, 2016).

Com isso, fica evidente o interesse do Poder Público em esferas executivas internacionais, nacionais e regionais para o desenvolvimento de ações capazes de promover a redução das emissões de GEEs na atmosfera. Portanto, as Energias Renováveis situam-se ainda mais evidenciadas na perspectiva de pavimentação de um futuro sustentável, com papel de protagonista na descarbonização da atmosfera e na desaceleração do Aquecimento Global.

Gráfico 1 - Quantidade de Emissões de CO₂ do setor de Energia em Fortaleza-CE.



Fonte: SEEG, 2018.

Avaliando as emissões de GEEs em Fortaleza, utilizando o gás carbônico (CO₂) como parâmetro, o gráfico 1, elaborado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG), ilustra o perfil de emissões do setor energético, dividido por subsetor, em que é notória a maior participação dos transportes, sendo responsáveis por 81,8% do quantitativo total de emissões em Fortaleza.

Com isso, o transporte coletivo urbano configura-se como um dos principais emissores de GEEs na capital cearense, em virtude da quantidade de veículos, da grande distância percorrida por cada veículo diariamente e do uso do diesel de petróleo como combustível.

Nesse aspecto, segundo dados da Divisão de Planejamento (DIPLA) da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR), a população fortalezense dispõe, atualmente, de um total de 2029 veículos, desses 8 articulados com piso alto e comprimento aproximado de 18 metros com capacidade para transportar até 130 passageiros, 1145 pesados, semipesados e mídi com carroceria de aproximadamente 12 metros de comprimento e capacidade para até 76 passageiros e ainda 876 modelos dos tipos mini e leve com comprimento na faixa de 7 a 9 metros e capacidade de até 50 passageiros.

No entanto, segundo dados da DIPLA, esse contingente encontra-se atualmente em quantidade reduzida, visto que o setor de transporte coletivo foi duramente afetado pelas medidas de restrição de circulação, impostas pelas autoridades na tentativa de conter a propagação do vírus na capital cearense, em virtude da pandemia da Covid-19 iniciada em março de 2020. Isso provocou uma queda de mais de 60% na quantidade de pessoas transportadas por dia, em média, resultando atualmente em cerca de meio milhão de usuários ao dia, valor que já chegou a ultrapassar os 1,3 milhões de passageiros diários em meados de 2019.

Nesse contexto, dentre as diversas alternativas de aproveitamento do potencial energético de Fortaleza, ressalta-se, neste trabalho, a associação entre a energia eólica e a tecnologia do hidrogênio para a estruturação de uma proposta de investimento na modernização dos equipamentos de transporte coletivo urbano, abordando os aspectos logísticos de armazenamento e de distribuição do hidrogênio para os ônibus, com enfoque na substituição do uso do diesel, avaliando ainda os aspectos econômicos no contexto de aumento de eficiência dos equipamentos à hidrogênio disponíveis, de diminuição no preço do kWh gerado por energia eólica e de esgotamento dos combustíveis fósseis.

Por essa razão, no intuito de abordar os assuntos envolvidos na proposta de forma clara e objetiva, este trabalho contém seis capítulos, divididos da seguinte forma:

O capítulo 1 contém a introdução ao tema do trabalho, apresentando de forma direta e concisa a contextualização do problema e a justificativa para execução da proposta apresentada por este estudo.

O capítulo 2 apresenta o objetivo geral deste trabalho e quatro objetivos específicos para efetivação da proposta.

No capítulo 3 é discorrida a fundamentação teórica do estudo, evidenciando a energia eólica, a tecnologia do hidrogênio e os ônibus com células a combustível de hidrogênio como acervo de conteúdos necessários para a compreensão das considerações adotadas neste trabalho.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia, subdividido em metodologia aplicada, que trata da especificação do estudo quanto à natureza da pesquisa, à abordagem do problema, aos objetivos e aos procedimentos técnicos adotados para a elaboração do estudo, e em método proposto, que expõe a forma de aplicação da metodologia no estudo de caso para o cumprimento do objetivo geral.

No capítulo 5 são exibidos os resultados obtidos com a elaboração do estudo, além de discussões acerca da efetividade da proposta.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros de forma a complementar as lacunas no contexto de execução da proposta.

Por fim, são apresentadas todas as referências bibliográficas avaliadas para a composição deste estudo.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral propor a descarbonização do transporte coletivo urbano da cidade de Fortaleza, visando à substituição dos modais coletivos viários com enfoque na modificação do sistema de propulsão convencional por um mais limpo e sustentável baseado em células a combustível, a partir da utilização de Hidrogênio Verde produzido por Energia Eólica.

Concomitantemente, para a efetivação da proposta deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Dimensionar subsistemas de produção, de compressão, de armazenamento e de abastecimento de hidrogênio, determinando os fluxos energéticos envolvidos para a substituição total da frota de ônibus de Fortaleza por Ônibus com células a combustível à Hidrogênio (FCEBs, do inglês *Fuel Cell Electric Buses*);
- b) Dimensionar um Parque Eólico com capacidade de geração de energia suficiente para sustentar o consumo energético de todos os subsistemas dimensionados;
- c) Analisar economicamente a substituição da frota de ônibus atual por FCEBs, avaliando os custos de infraestrutura e de substituição dos veículos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Energia Eólica

A Energia dos ventos é utilizada para a movimentação de equipamentos criados pelos seres humanos desde as primeiras civilizações, sobretudo na navegação e no bombeamento de água em benefício à colheita de grãos. Segundo Cunha (2019), o primeiro registro histórico da utilização de moinhos é da Pérsia, por volta de 200 A.C. “Porém, somente a partir do século XII, esse tipo de energia foi disseminado para a Inglaterra, França e Holanda, e logo depois, espalhado por toda a Europa” (FONTANET, 2012).

No ano de 1888, Charles F. Brunch montou o primeiro aerogerador, que fornecia 12 kW de potência a baterias destinadas ao fornecimento de energia elétrica. No entanto, no contexto da Segunda Revolução Industrial, foi marcante o declínio da Energia Eólica, sobretudo no setor de transportes, sendo substituída por máquinas a vapor, pela eletricidade e por combustíveis fósseis. (FONTANET, 2012).

O século XX foi marcado pela ocorrência de diversos conflitos a nível global, o que impactou, em diversos momentos, no custo do petróleo, principal vetor energético até então. Nesse aspecto, foram incentivados desenvolvimentos científicos em Energia Eólica e em outras fontes alternativas com o intuito de reduzir os custos e torná-las economicamente competitivas. Com o aumento da demanda por energia elétrica após a virada do século, a produção de novos aerogeradores foi impulsionada, reduzindo gradualmente os custos de produção de energia elétrica a partir dos ventos.

3.1.1 Aspectos Técnicos

Vento é o movimento de uma massa de ar, proveniente de áreas de alta pressão para baixa pressão, sobre a superfície da Terra. Essas variações da pressurização das massas de ar ocorrem em virtude do aquecimento irregular do planeta, ou seja, os ventos são advindos da radiação solar. Quando essa radiação atinge o solo e as outras superfícies, ocorre a absorção dessa energia e o consequente aquecimento das massas de ar próximas. Essas diferenças de temperatura, aliadas à rotação do planeta criam os ventos. Cerca de 1 a 2 por cento da energia que vem do sol é convertida em Energia Eólica. (RENEWABLE UK, 2011).

No aspecto do aproveitamento do recurso eólico para a geração de energia elétrica, a potência disponível está relacionada com a velocidade e com um fluxo de massa de vento sobre uma determinada área, conforme a equação 1. (HODGE, 2011).

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

Substituindo $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V$, em que ρ é a massa específica do fluido, no caso, do ar atmosférico em determinada região, a depender de fatores como temperatura e pressão locais, obtém-se a equação 2.

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

Inferindo então, que a potência disponível pelo vento é diretamente proporcional à área varrida pelas turbinas eólicas e ao cubo da velocidade do vento, justificando matematicamente, o posicionamento de aerogeradores em locais com ventos de alta velocidade, porém, com uma variação reduzida ao longo dos ciclos temporais.

No entanto, a potência disponibilizada pelo vento não pode ser completamente extraída devido aos fatores construtivos que caracterizam uma turbina de vento. O coeficiente de potência (C_p) define essa possível extração, isto é, trata-se da razão entre potência extraída e disponível, tendo seu valor máximo fixado no Limite de Betz, elaborado a partir de uma análise de disco atuador envolvendo distribuições de pressão, de velocidade e de área de fluxo transversal, resultando na equação 3. (HODGE, 2011).

$$C_{p_{m\acute{a}x}} = \frac{\frac{8}{27} \rho \cdot A \cdot V^3}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3} = 0,5926 \quad (3)$$

O coeficiente de potência então, representa uma das variáveis mais importantes na caracterização de uma turbina de vento, visto que define a potência extraída. Entretanto, o C_p máximo não é possível devido à segurança estrutural, visto que a velocidade do vento varia, com os máximos valores representados por baixas frequências em um histograma de velocidade. Nesse aspecto, há a necessidade de modelar a distribuição de probabilidade de vento, por meio da Distribuição de Weibull, que apresenta maior aderência com o comportamento do vento, dada pela equação 4. (HODGE, 2011).

$$h(V, k, c) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

“Quanto maior o parâmetro de forma (k), mais a distribuição se aproxima de ser gaussiana. Quanto maior o parâmetro de escala(c), mais alto o modo e menor a probabilidade de uma velocidade menor do que o modo.” (HODGE, 2011).

A Distribuição de Weibull determina curvas em histogramas de frequência, tendo sua velocidade média dada então, pela equação 5. (HODGE, 2011).

$$V_{m\acute{e}dia} = \int_0^{\infty} h(V, k, c) \cdot V \cdot dV \quad (5)$$

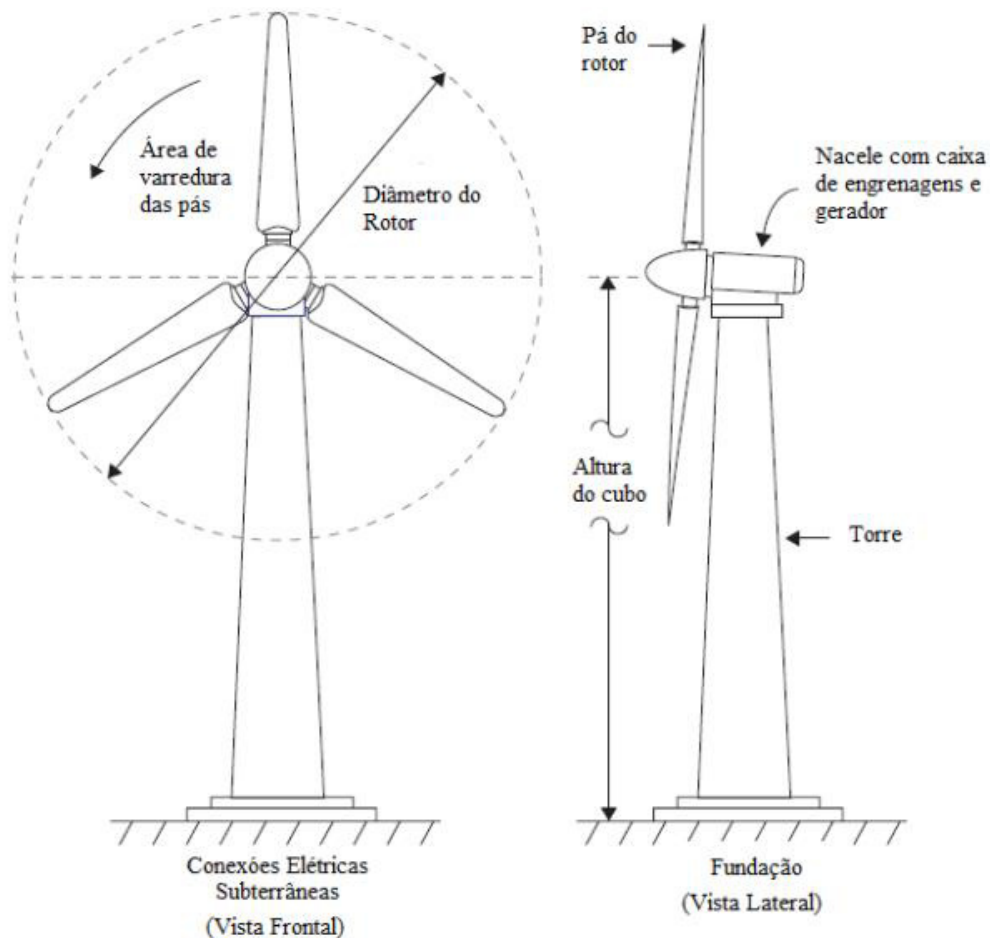
Segundo Hodge (2011), a aplicação de diversos artifícios matemáticos nas equações acima resulta em uma expressão, representada pela equação 6, que sintetiza os aspectos relevantes para a extração de energia eólica em determinada região durante um ano.

$$Energia = \frac{C_p \cdot \rho}{2} \cdot \int_0^{\infty} h(V, k, c) \cdot 8760 \cdot V^3 \cdot dV \quad (6)$$

Assim, podemos notar a importância, dos aspectos construtivos da turbina, representados pelo coeficiente de potência, da frequência e da velocidade dos ventos representadas pela Distribuição de Weibull, para a geração de energia eólica.

Quanto aos aspectos construtivos, existem, essencialmente, dois tipos de turbinas eólicas: As de eixo horizontal (HAWT, do inglês *Horizontal Axis Wind Turbine*) e as de eixo vertical (VAWT, do inglês *Vertical Axis Wind Turbine*). As HAWTs são amplamente utilizadas nas instalações de parques eólicos. (HODGE, 2011).

Figura 1 – Diagrama de uma HAWT.



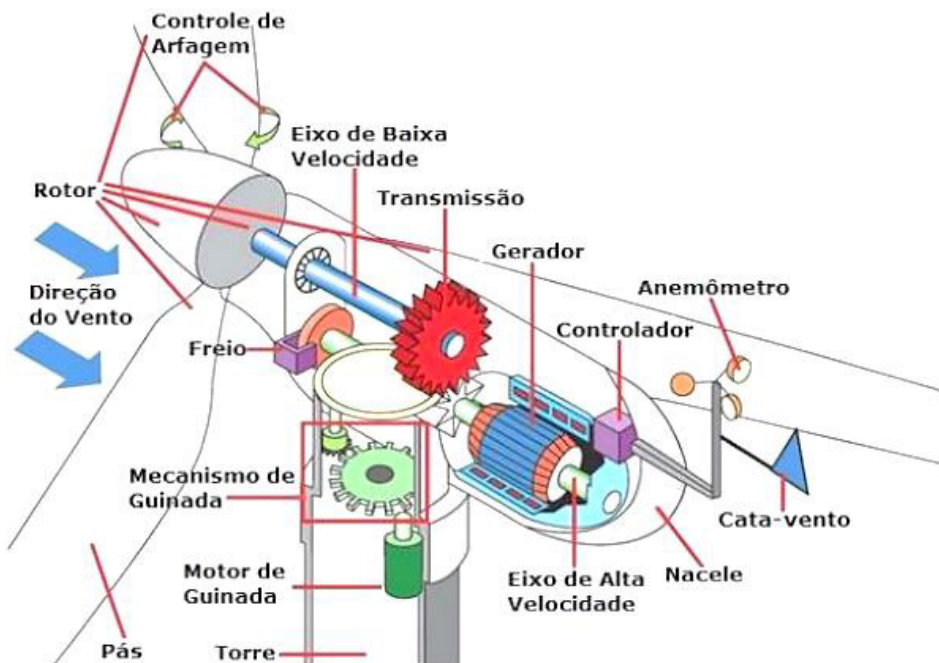
Fonte: Hodge, 2011.

A figura 1 ilustra um diagrama de uma turbina eólica de eixo horizontal, enaltecendo suas principais partes, a saber:

- a) pás eólicas, responsáveis pela captação da energia mecânica dos ventos por meio do perfil aerodinâmico, convertendo sua potência ao rotor, são construídas em um processo praticamente artesanal de material compósito de poliéster e resina epóxi;
- b) rotor, elemento de fixação das pás e de transmissão do movimento aos eixos internos da nacelle;
- c) nacelle, responsável pela transformação da rotação em energia elétrica;
- d) torre e fundação, responsáveis pela elevação da altitude dos demais componentes, bem como pela sua sustentação. (NEOENERGIA, 2021).

A figura 2 ilustra a composição geral da nacelle de um aerogerador, observa-se a caixa de engrenagens, o gerador elétrico e os demais componentes de produção de energia. Além disso, o motor de guinada e seus mecanismos têm o objetivo de manter a área de varredura das pás na direção do vento e de ajustar a inclinação das pás para controlar a potência extraída do vento. Ademais, os mecanismos de frenagem podem ser utilizados para diminuir a velocidade ou parar completamente o movimento da turbina. (HODGE, 2011).

Figura 2 – Componentes da Nacelle de uma HAWT.



Fonte: Hodge, 2011.

Para a efetivação da geração elétrica de um aerogerador, ou conjunto de aerogeradores, são necessárias diversas conexões elétricas entre os aerogeradores e a rede de energia elétrica da região de instalação do parque, em colaboração aos Sistemas Interligados.

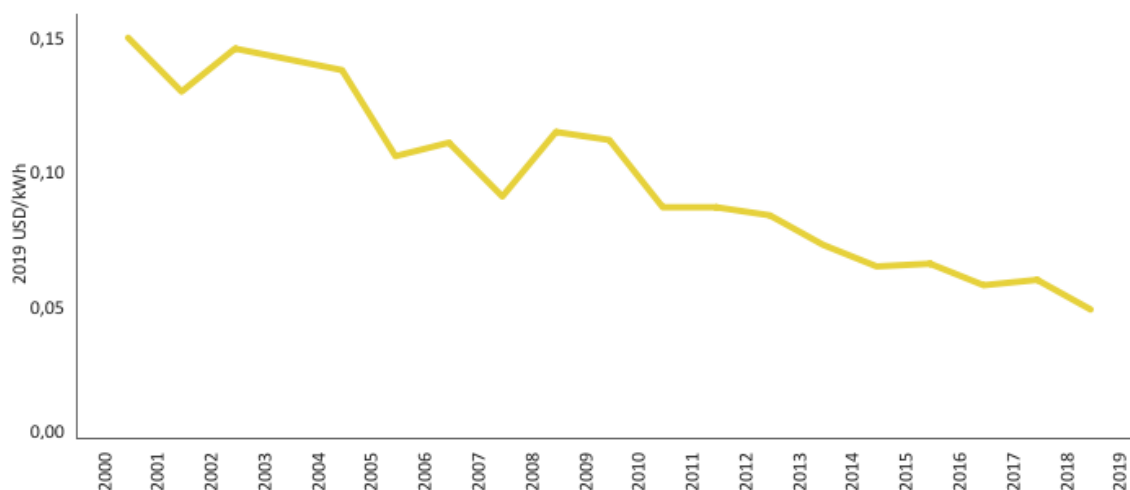
“Os aerogeradores possuem potência nominal normalmente entre 1 e 3 MVA e tensão nominal em torno de 600 V, embora já existam equipamentos operando em média tensão e com potência bastante superior” (SENGER; FILHO, 2020).

Para cada aerogerador, há um transformador que eleva a tensão para 13,8 ou 34,5 kV com conexão típica dos enrolamentos em estrela aterrada no lado de baixa tensão, e em delta no lado de média tensão ($Y\Delta$). A energia é então transmitida por condutores dimensionados segundo a NBR 5410, para uma subestação elevadora, conectada em delta no lado de média tensão, e em estrela aterrada no lado de alta tensão (ΔY), cujas Linhas de Transmissão integram o Sistema Interligado Nacional (SIN). (SENGER; FILHO, 2020).

3.1.2 Evolução e Perspectivas de Mercado para Energia Eólica

Segundo o Levantamento de Custos de Geração de Energias Renováveis, feito em 2019, pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), o Custo Nivelado de Energia (LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*) médio ponderado global de projetos eólicos *onshore* caíram para US\$ 0,053 por kWh, valor 9% menor do que em 2018 e 39% menor do que em 2010, quando era de US\$ 0,086 por kWh. No Brasil, essa perspectiva se mantém e já conta com duas décadas de redução consistente no valor do kWh, como ilustra o gráfico 2.

Gráfico 2: Custo do kWh médio no Brasil produzido por Energia eólica.



Fonte: IRENA, 2020.

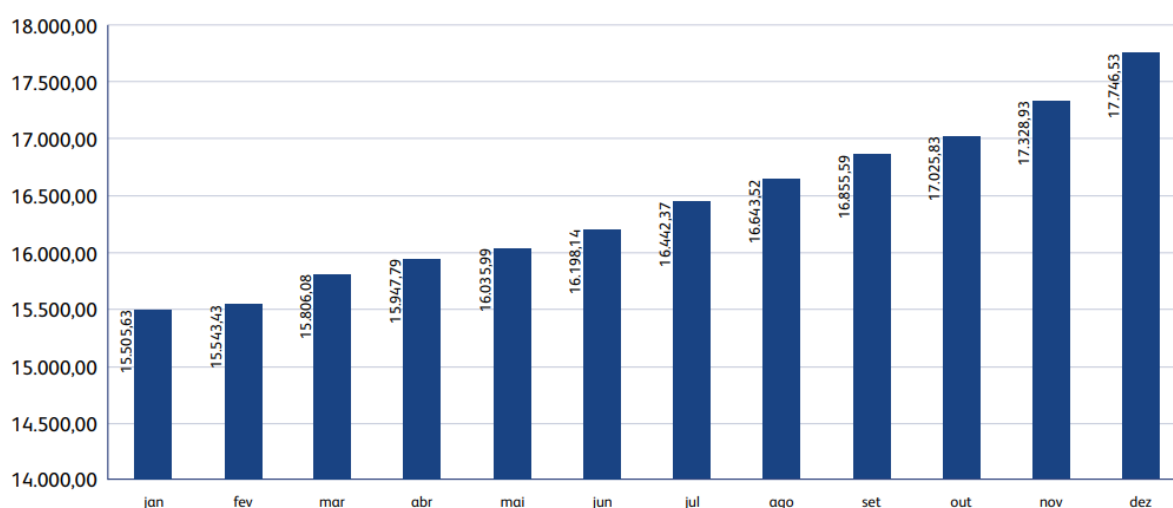
Além disso, de acordo com o mesmo levantamento, o aumento de potência das turbinas e do número de instalações, bem como a redução dos custos de operação, manutenção e equipamentos proporciona um decréscimo no custo geral de instalação de parques eólicos caindo de US\$ 1.549 por kW em 2018 a US\$ 1.473 por kW em 2019.

Esse contexto consolida a opção por geração eólica como vantajosa para os investidores e, em adição aos custos menores, há fatores como a geração de empregos, o desenvolvimento socioeconômico de regiões propícias para a instalação de parques eólicos e o fato de a geração de eletricidade por meio dos ventos, segundo (FERREIRA DA SILVA *et al.*, 2020):

Servir como fonte de complementação à modalidade hidrelétrica nas regiões atingidas pelas secas. Exemplo dessa situação é a Região Nordeste no Brasil que, em períodos de seca, os ventos são mais favoráveis, especificamente durante o período do segundo semestre de cada ano.

Tais fatos justificam o crescimento da Energia Eólica na matriz elétrica brasileira, terminando o ano de 2020 com 686 usinas e 17,75 GW de potência eólica, o que representou um aumento de 14,89% em relação a 2019. (ABEEólica, 2020). O gráfico 3 mostra a evolução da potência instalada no Brasil.

Gráfico 3 – Potência Eólica Instalada Acumulada no Brasil.



Fonte: ABEEólica, 2020.

3.2 Tecnologia do Hidrogênio

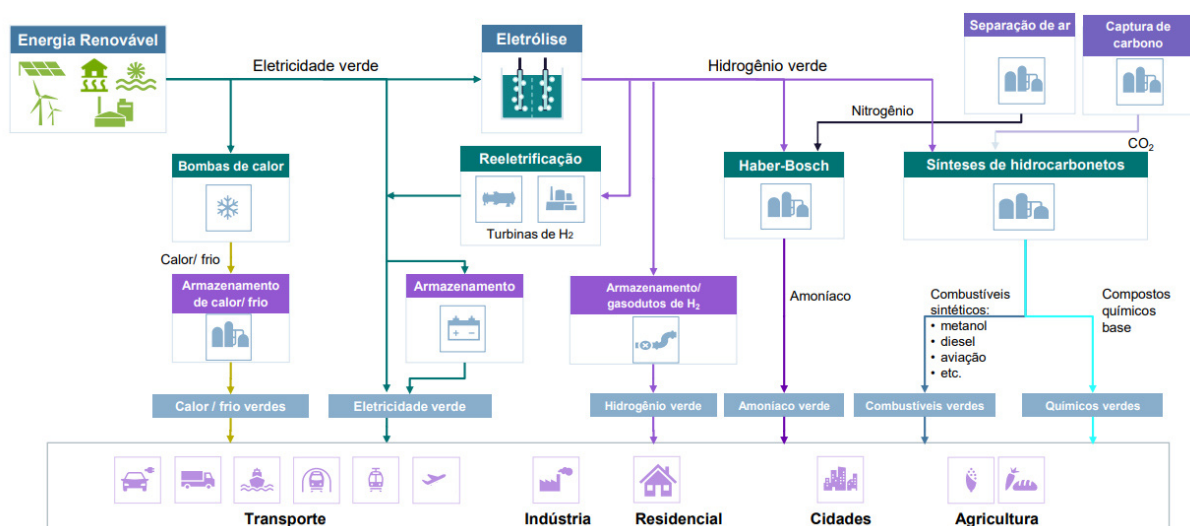
O hidrogênio (H₂) é um gás incolor e inodoro. Sua densidade a 0 °C e 1 bar é 0,08987 kg.m⁻³, com poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) respectivamente de 141.880 kJ.kg⁻¹ e 119.960 kJ.kg⁻¹. (SILVA, 1991 *apud* SOUZA, 2020).

Em vista da sua baixa densidade e alto teor energético, o hidrogênio possui um leque imenso e ainda subutilizado de aplicações energéticas na economia global, tais como: Indústria Petroquímica, na síntese de metanol verde e aplicação em combustíveis, Aquecimento e Resfriamento industrial e residencial quando adicionado ao gás natural, Mobilidade Urbana com alimentação de veículos com células à combustível, Reeletrificação com turbinas a gás e

com células a combustível e Síntese de componentes químicos verdes como a amônia verde e suas aplicações como fertilizante na agricultura. (SIEMENS, 2021).

A figura 3 sintetiza, de forma gráfica, as aplicações do Hidrogênio Verde no contexto de uma economia descarbonizada.

Figura 3 – Aplicações do Hidrogênio Verde.



Fonte: Siemens, 2021.

“A tecnologia do hidrogênio refere-se ao conjunto de dispositivos e conhecimentos que possibilitam o aproveitamento do hidrogênio como vetor energético, compreendendo toda a cadeia de utilização: produção, armazenamento, transporte, distribuição e uso final.” (GODOY, 2013).

“Apesar de muito abundante, o hidrogênio, diferente dos combustíveis fósseis, não é considerado uma fonte energética, devido a sua maior parte existente estar justamente ligada a outros compostos” (ROSA, 2015 *apud* SOUZA, 2020).

Conseqüentemente, no intuito de extraí-lo desses compostos, consome-se algum tipo de energia primária, o que classifica a cadeia produtiva do hidrogênio e denomina o espectro de cores relacionadas à energia utilizada nesse processo.

O hidrogênio recebe a denominação de *cinza* quando é produzido a partir da reforma de gás natural, de hidrogênio *azul* quando é obtido a partir da reforma de gás natural com posterior captura e reaproveitamento de CO₂, de hidrogênio *marrom* quando produzido por meio da eletrólise da água com energias não renováveis e, por fim, de hidrogênio *verde* quando a eletrólise da água é combinada a energias renováveis. (FAERMAN e FREIRE, 2020).

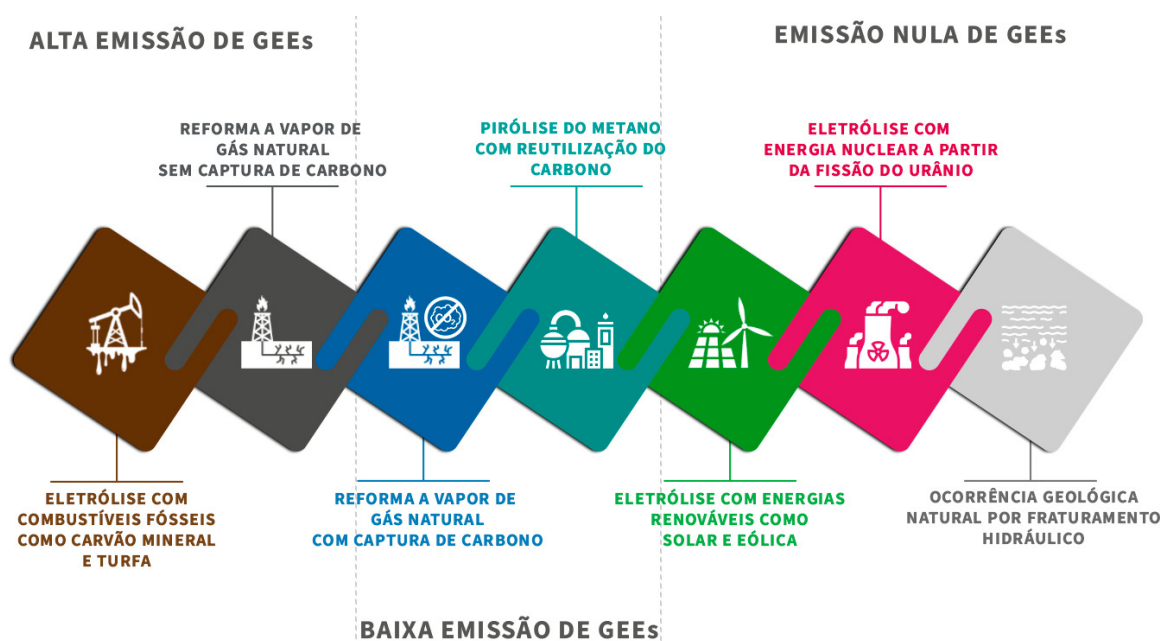
Há ainda a produção de hidrogênio por pirólise, que envolve a decomposição térmica, decomposição catalítica ou decomposição de plasma do metano, cada abordagem está atualmente em fase de P&D. A pirólise evita a necessidade de sequestrar CO₂ para produzir

hidrogênio com baixa emissão de GEEs, desde que o subproduto seja utilizado, por exemplo, para composição de materiais da construção civil. A produção de hidrogênio por meio da pirólise de um combustível fóssil foi descrita como hidrogênio *turquesa* (NEWBOROUGH e COOLEY, 2020).

Além disso, há outros tipos menos usuais de hidrogênio, como o hidrogênio *rosa*, produzido a partir de eletrólise utilizando energia nuclear e o hidrogênio *branco*, de ocorrência geológica natural em depósitos subterrâneos e originados por fraturamento hidráulico com raríssimas ocorrências, uma delas é no Brasil, mais especificamente na bacia do Rio São Francisco. (GOTHE, 2021).

Na figura 4 pode-se observar as classificações do hidrogênio quanto à fonte energética utilizada para a produção, formando um “arco-íris” de amplas possibilidades, corroborando à versatilidade da aplicação como vetor energético.

Figura 4 – Classificações do Hidrogênio quanto ao modo de produção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

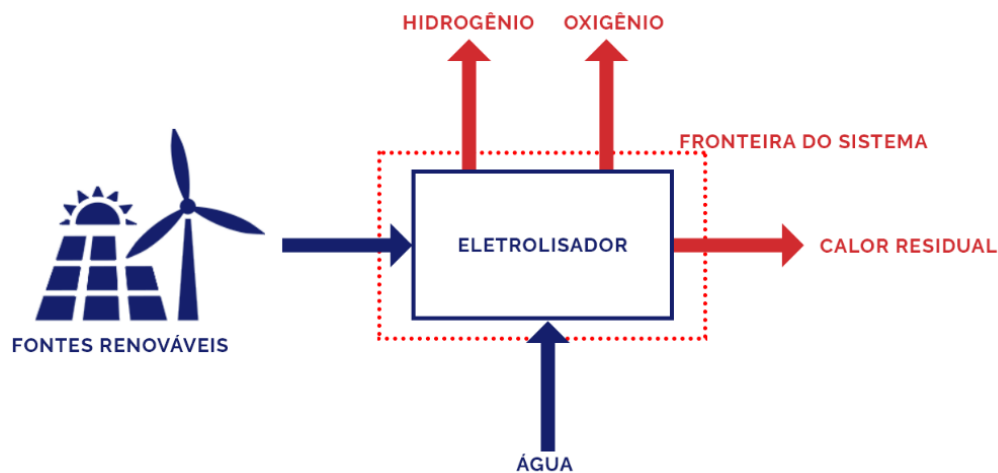
Entre esses, o hidrogênio verde vem ganhando bastante visibilidade na mídia cearense em virtude de grandes investimentos nacionais e estrangeiros em diversas instalações de produção de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), localizado na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a ser alimentada por energia eólica e solar fotovoltaica, livre de emissões e, com isso, opção ideal para a descarbonização da economia proposta pelo Acordo de Paris. Este “hub” promove o maior interesse em pesquisas nas possibilidades de destinação e também a perspectiva da criação de marcos regulatórios de produção, transporte, armazenamento, distribuição e comercialização desse composto.

3.2.1 Eletrólise Sustentada por Energia Renovável

Para a produção de Hidrogênio Verde, portanto, é necessário que haja a eletrólise da água a partir da energia elétrica proveniente de fontes renováveis por meio da utilização de equipamentos denominados eletrolisadores. Após a eletrólise, os compressores e tanques de armazenamento e de transporte também são fundamentais para a operacionalização da cadeia produtiva.

Na figura 5 pode-se observar o diagrama termodinâmico do processo de eletrólise da água com fontes renováveis e verifica-se, portanto, a partir da análise do diagrama, o papel central desempenhado pelo Eletrolisador na produção de Hidrogênio Verde.

Figura 5 – Diagrama Termodinâmico da Produção de Hidrogênio Verde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A eletrólise (do grego: *elektron*, “eletricidade”; e *lysis*, “quebra”) é a reação química de oxirredução promovida pela passagem de uma corrente elétrica, que consiste em um fenômeno físico-químico não espontâneo, dada a necessidade do fornecimento de energia ao sistema. (FELTRE, 2004). A eletrólise da água ocorre em solução, iniciando pela ionização dos eletrólitos e, com a passagem da corrente elétrica, obtêm-se os compostos moleculares gasosos Hidrogênio e Oxigênio nos eletrodos, compostos sobretudo por materiais inertes, chamados de cátodo, polo negativo, e ânodo, polo positivo.

“Quando se aplica a força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo há passagem de corrente para os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas para evolução de hidrogênio no cátodo (redução) e oxigênio no ânodo (oxidação).” (FURLAN, 2012). Sendo assim, a reação global do processo de eletrólise aquosa da água pode ser descrita como:



As semirreações de redução e de oxidação que ocorrem no cátodo e no ânodo, respectivamente, dependem dos eletrólitos presentes na solução aquosa, que dividem a eletrólise da água em: Alcalina; de Membrana de Troca de Prótons e de Óxido Sólido. (SOUZA, 2020).

3.2.1.1 Eletrólise Alcalina e Eletrolisadores AEC

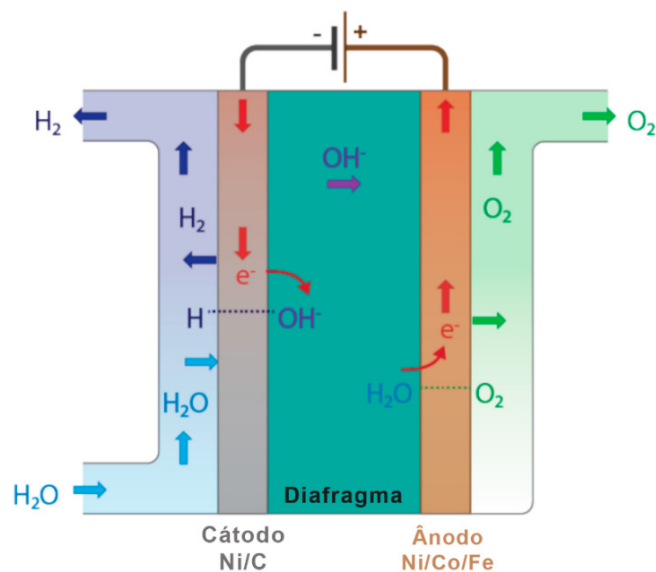
Uma vez que o fenômeno da eletrólise foi descoberto por Troostwijk e Diemann em 1789, a eletrólise alcalina tornou-se uma tecnologia bem amadurecida para a produção de hidrogênio até a faixa de *megawatts*, e constitui a mais extensa tecnologia eletrolítica a nível comercial em todo o mundo. A Eletrólise Alcalina caracteriza-se por ter dois eletrodos imersos em um líquido eletrólito alcalino consistindo de uma solução básica hidróxido de potássio em um nível entre 20 e 30%. Os dois eletrodos são separados por um diafragma, que tem a função de manter os gases dos produtos separados por uma questão de eficiência e segurança. (CARMO, 2013).

As semirreações anódicas e catódicas estão demonstradas nas equações 8 e 9, respectivamente.



A figura 6 ilustra o processo, que ocorre na faixa entre 40 e 60 °C além dos elementos químicos que compõem os eletrodos.

Figura 6 – Eletrólise Alcalina.

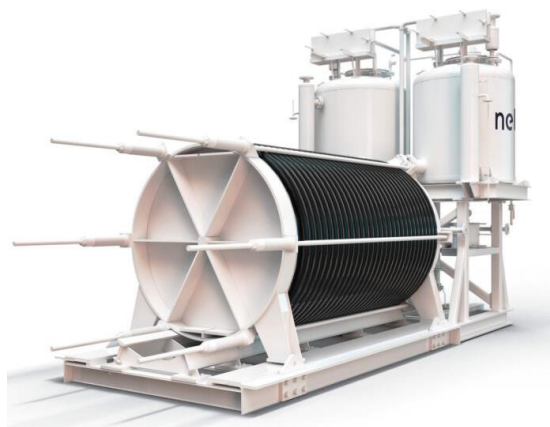


Fonte: Adaptado de Gallandat *et al.*, 2017.

Apesar do grau de evolução e de aplicabilidade da tecnologia de eletrólise alcalina, alguns problemas inviabilizam a aplicação desses eletrolisadores em larga escala no mercado, são eles: Faixa de carga parcial baixa, que ocorre devido ao diafragma não impedir completamente a difusão cruzada dos gases dos produtos, causando a difusão de oxigênio no cátodo e hidrogênio no ânodo, reduzindo a eficiência do eletrolisador; Densidade de corrente limitada, por causa das altas perdas ôhmicas através do eletrólito líquido e do diafragma; Baixa pressão de operação, que se deve à incapacidade de operar em altas pressões com o eletrólito líquido. (CARMO, 2013).

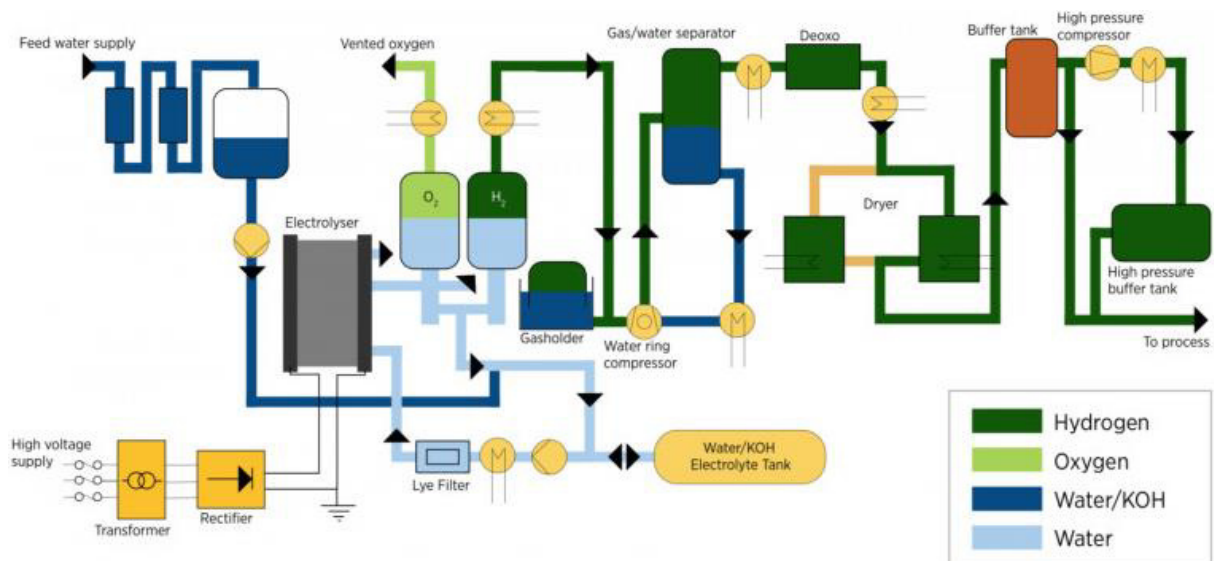
A Figura 7 ilustra, de forma tridimensional, um eletrolisador AEC e a figura 8 demonstra o diagrama do processo que ocorre em seu interior, ressaltando os fluxos percorridos pelos componentes químicos e os principais mecanismos envolvidos.

Figura 7 – Eletrolisador AEC.



Fonte: Nel Hydrogen, 2021.

Figura 8 – Diagrama AEC.



Fonte: IRENA, 2018.

Os eletrolisadores que funcionam baseados na eletrólise alcalina da água possuem sigla AEC (do inglês *Alkaline Electrolysis Cell*) e no mercado, estão disponíveis e representados por diversas empresas, que oferecem soluções de baixo consumo energético, equivalente a 3,8 kWh/Nm³ em conceitos modulares de produção de até 3880 Nm³/h de hidrogênio com potência de 2,2MW por módulo. (NEL HYDROGEN, 2021).

3.2.1.2 Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons e Eletrolisadores PEMEC

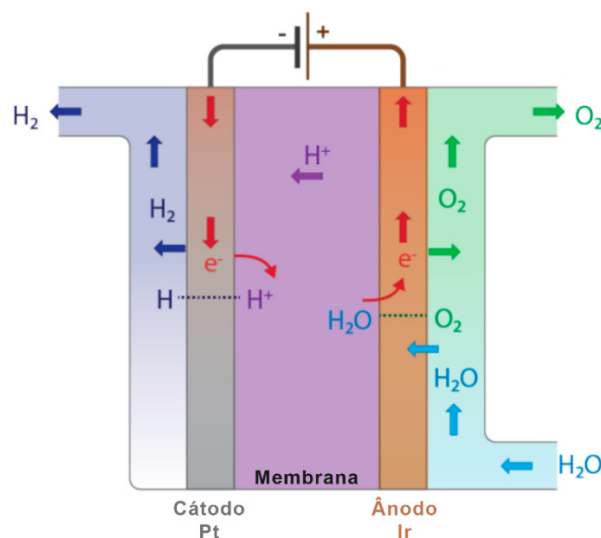
O cenário de superação das desvantagens dos eletrolisadores alcalinos mudou quando a General Electric, na década de 1960, desenvolveu o primeiro eletrolisador de água baseado em um conceito de eletrólito de polímero sólido, em que uma membrana sólida de poliestireno sulfonado foi usada como eletrólito. Este conceito ficou conhecido como membrana de troca de prótons ou membrana de eletrólito de polímero (ambas com a sigla PEM). Essa membrana é responsável por fornecer alta condutividade de prótons, pequena difusão cruzada de gás, design de sistema compacto e operação de alta pressão. (CARMO, 2013).

A eletrólise PEM é caracterizada pela separação dos eletrodos com uma membrana de um polímero sólido com função de carregar os prótons do ânodo ao cátodo, garantido assim a produção do gás hidrogênio na semirreação de redução catódica.

As semirreações anódicas e catódicas estão demonstradas nas equações 9 e 10, respectivamente.



Figura 9 – Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons.



Fonte: Adaptado de Gallandat *et al.*, 2017.

A figura 9 ilustra o processo, que ocorre na faixa entre 20 e 100 °C, e os elementos químicos que compõem os eletrodos.

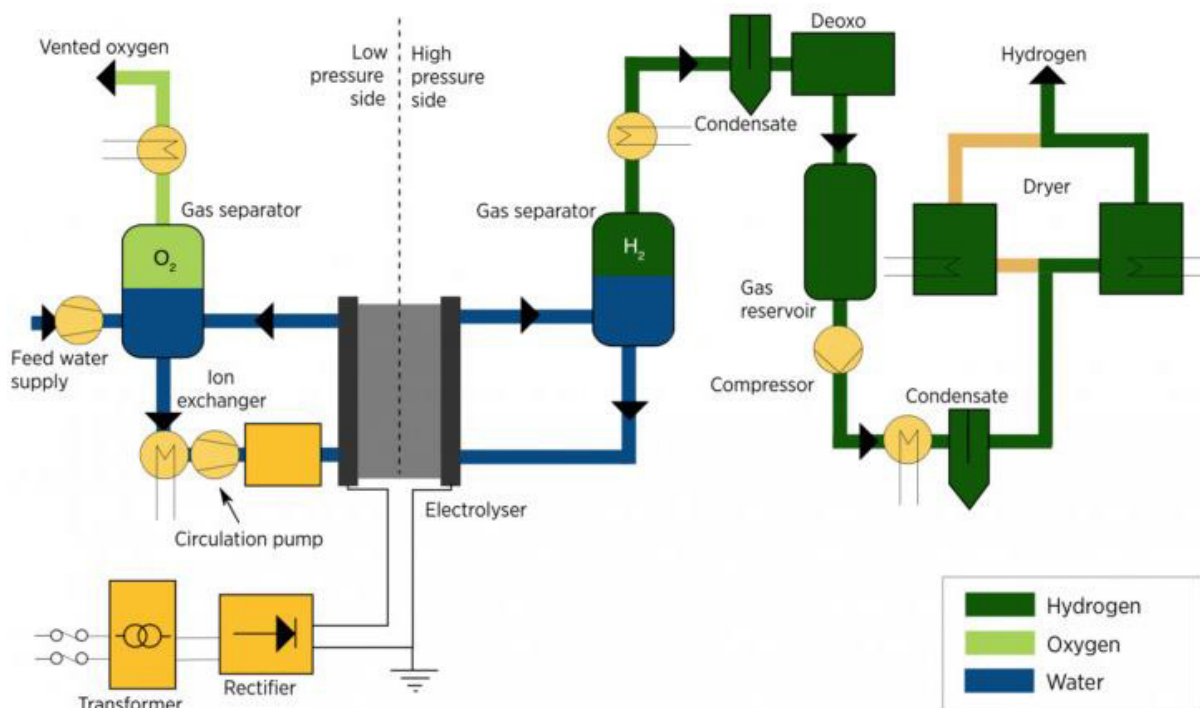
A figura 10 ilustra, de forma tridimensional, uma composição de módulos de eletrolisadores PEMEC e a figura 11 demonstra o diagrama do processo que ocorre em seu interior, ressaltando os fluxos percorridos pelos componentes químicos e os principais mecanismos envolvidos.

Figura 10 – Eletrolisador PEMEC.



Fonte: Siemens, 2021.

Figura 11 – Diagrama PEMEC.



Fonte: IRENA, 2018.

O contexto mercadológico dos eletrolisadores PEMEC (do inglês *Proton-Exchange Membrane Electrolysis Cell*) vem ganhando bastante notoriedade nos fóruns internacionais de desenvolvimento científico, com grande aporte financeiro, essa tecnologia deverá predominar no mercado de eletrolisadores nos próximos anos, algumas empresas já expõem planos de lançar soluções comerciais na faixa dos 100MW para a produção de hidrogênio no ano de 2023. (SIEMENS, 2021).

3.2.1.3 Eletrólise de Óxido Sólido e Eletrolisadores SOEC

A eletrólise de óxido sólido é a tecnologia de produção de hidrogênio que apresenta maior eficiência energética entre as apresentadas neste trabalho, com valores entre 70 e 85%, além de altas temperaturas de operação.

No entanto, a tecnologia está em desenvolvimento experimental, enfrentando desafios como: corrosão, selagem, ciclo térmico e migração de cromo, demandando a utilização de materiais de maior custo, impossibilitando, por enquanto, a utilização comercial de eletrolisadores baseados nessa tecnologia. (BRAGA, 2015).

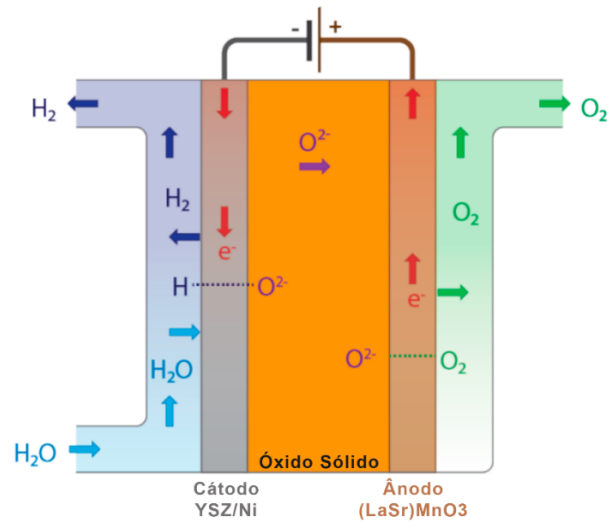
O processo químico acontece com vapor de água a altas temperaturas, entre 500°C e 800°C, diferente dos outros tipos de eletrólise já abordados. O eletrólito utilizado trata-se da Zircônia estabilizada por Óxido de Trítio (YSZ), que apresenta alta condutividade iônica e estabilidade termoquímica nas temperaturas de operação. Os eletrodos são cerâmicas porosas compostas de YSZ e Níquel Metálico no cátodo e Manganita de Lantânio dopada com Estrôncio no ânodo. (LAGUNA-BERCERO, 2012 *apud* BRAGA, 2015).

As semirreações anódica e catódica estão representadas nas equações 11 e 12, respectivamente.



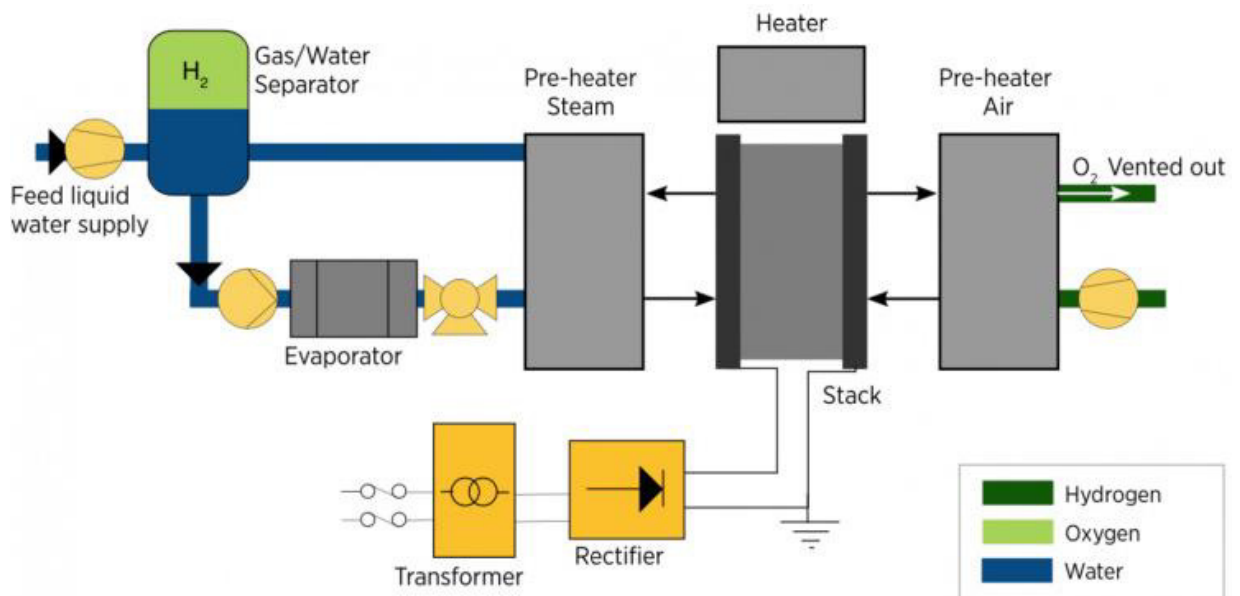
A figura 12 representa o processo de eletrólise de óxido sólido e a figura 13 ilustra o diagrama do funcionamento de um eletrolisador SOEC (do inglês *Solid Oxide Electrolysis Cell*), ressaltando os fluxos percorridos pelos componentes químicos e os principais mecanismos envolvidos.

Figura 12 – Eletrólise de Óxido Sólido.



Fonte: Adaptado de Gallandat *et al.*, 2017.

Figura 13 – Diagrama SOEC.



Fonte: IRENA, 2018.

3.2.2 Armazenamento

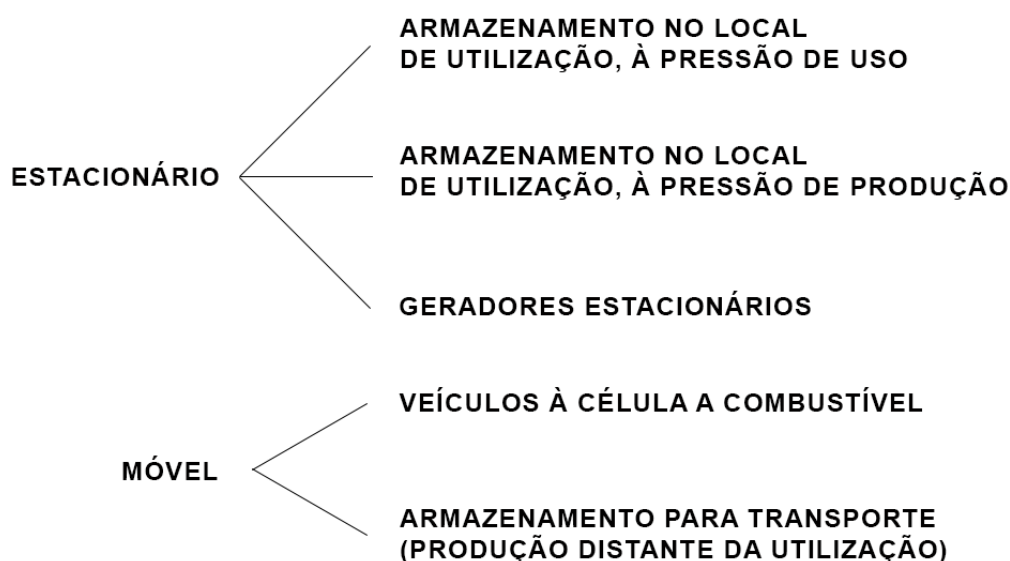
Após a produção do hidrogênio nos eletrolisadores, o gás deve ser comprimido, armazenado e distribuído para os locais de utilização. Nesse contexto, compressores de alta pressão, tecnologias de armazenamento e soluções para o transporte e para a distribuição do hidrogênio são métodos fundamentalmente relevantes no contexto da evolução e da consolidação de uma economia descarbonizada.

No intuito de atender às demandas do mercado de energia de hidrogênio é necessária a disponibilidade de soluções de armazenamento robustos e viáveis para cada forma de interface entre sistemas de produção e de utilização do gás.

Dessa forma, as tecnologias de armazenamento estão dispostas conforme a integração do sistema energético à hidrogênio, assumindo o caráter de maior ou de menor indicação em cada caso. (MORADI; GROTH; 2019).

A figura 14 ilustra as possíveis aplicações de armazenamento de hidrogênio relacionadas à integração do sistema.

Figura 14 – Aplicações de Armazenamento de Hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Moradi; Groth, 2019.

Para uso comercial do hidrogênio, as formas de armazenamento baseadas em transformações físicas, como compressão e liquefação, ganham destaque devido à confiabilidade e ao potencial para escala industrial dos processos, além da maturidade das tecnologias.

Estes métodos estão classificados em armazenamento no estado líquido (criogênico), armazenamento no estado gasoso e armazenamento criocomprimido de hidrogênio.

Há ainda métodos menos usuais de armazenamento que apresentam grande potencial para desenvolvimento científico e para aplicações em diversas finalidades não comerciais. Estes métodos baseiam-se na formação de componentes físicos ou químicos capazes de absorver ou adsorver o hidrogênio para uso posterior, e estão especificados na figura 15.

Figura 15 – Tipos de Armazenamento por Fisissorção e por Quimissorção.

| | | | |
|--------------|---|-------------|---|
| QUIMISSORÇÃO | AMÔNIA | FISISSORÇÃO | MATERIAIS DE CARBONO |
| | HIDRETO METÁLICO | | ZEÓLITAS |
| | ÁCIDO FÓRMICO | | ESTRUTURA ORGÂNICA DE METAL |
| | HIDRATO DE CARBONO | | ARRANJOS CAPILARES DE VIDRO |
| | TRANSPORTADORES DE HIDROGÊNIO ORGÂNICO LÍQUIDO | | MICROSFERAS DE VIDRO |
| | | | COMPLEXOS METÁLICOS DE ORGANOTRANSIÇÃO |

Fonte: Traduzido de Moradi; Groth, 2019.

O armazenamento de hidrogênio no estado líquido ocorre a temperaturas muito baixas, cerca de $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que representa um grande desafio para esta tecnologia, visto que, manter uma temperatura tão baixa pode representar um gasto equivalente a 40% do conteúdo energético do hidrogênio, sendo eficiente somente para armazenamento de média a larga escala, ideal para exportação em navios com carga de 5000 kg de gás, podendo ter capacidade até cinco vezes maior que tanques de hidrogênio gasoso comprimido. (MORADI; GROTH, 2019).

Já o armazenamento de hidrogênio criocomprimido trata-se de um gás criogênico super crítico, comprimido a $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$, oferecendo alta densidade de armazenamento, reabastecimento rápido e eficiente, além de altos níveis de segurança devido à existência de um invólucro a vácuo, no entanto, esta tecnologia apresenta dificuldades quanto à disponibilidade e ao alto custo da infraestrutura relacionada. (STOLTEN *et al.*, 2016).

3.1.2.1 Armazenamento no Estado Gasoso

Para aplicações veiculares, a única forma homologada de armazenamento de hidrogênio é por meio da sua compressão e armazenamento em tanques de alta pressão.

Esses tanques devem conferir não apenas os requisitos mecânicos de vasos de pressão, como também resistência à degradação acarretada pela utilização desse gás, denominada “fragilização pelo hidrogênio”, que ocorre devido ao tamanho diminuto da molécula de hidrogênio e à sua capacidade de permeação na estrutura cristalina dos materiais das ligas utilizadas na composição dos vasos de pressão, provocando o vazamento do hidrogênio e, conseqüentemente, a formação de misturas gasosas potencialmente explosivas. (FERREIRA, 2007).

Nesse aspecto, há quatro tipos de vasos de pressão que podem ser usados para armazenamento de hidrogênio, a saber (MORADI; GROTH, 2019):

- a) Compostos de alumínio ou de aço, designados para pressões de até 50 MPa.

- b) Aço com envolvimento parcial, em seção cilíndrica, por anéis de fibra de vidro ou de carbono bobinado, designados para pressões entre 45 e 80 MPa.
- c) Fibra de Carbono bobinada revestida totalmente por alumínio, designado para pressões de até 45 MPa.
- d) Material totalmente compósito de fibra de carbono ou de vidro-carbono com revestimento de material polimérico, como polietileno de alta densidade, designado para suportar pressões de até 100 MPa.

Ressalta-se que os tipos de armazenamento (c) e (d) são indicados para aplicações móveis, como em veículos ou no transporte do gás por rodovias para utilização em locais distantes da produção, devido ao menor peso e resistência a pressões mais elevadas, sendo menos suscetíveis aos processos de fragilização pelo hidrogênio.

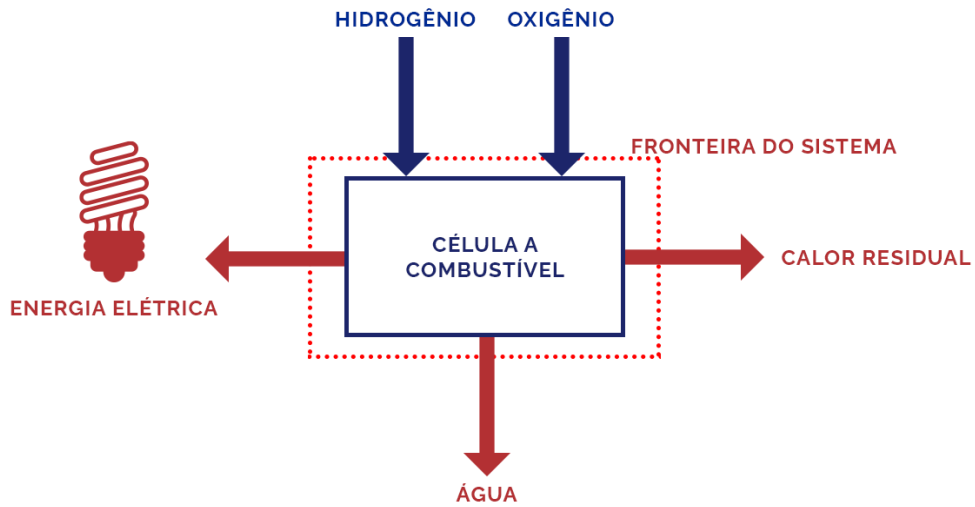
Tal variedade de métodos evidencia o amplo arcabouço tecnológico que suporta a cadeia de valor do hidrogênio conforme suas aplicações nos mais diversos setores da produção industrial contemporânea, ademais, as metodologias de produção e de armazenamento de hidrogênio, focadas sobretudo para o uso comercial no setor de transportes demanda o ideal emprego de tecnologias para o aproveitamento energético desse gás em prol da sociedade, com isso, as Células a Combustível integram o papel chave para as transformações energéticas necessárias para a conversão do hidrogênio em trabalho útil.

3.2.3 Célula a Combustível

As células a combustível são dispositivos responsáveis por converter, de forma eficiente, a energia química presente em diversos combustíveis, sobretudo o hidrogênio, em energia elétrica, por reações de oxirredução, sem que ocorra a combustão do gás, oferecendo uma ampla gama de benefícios, como: Redução nas emissões de GEEs; Ampliação do uso de Energias Renováveis por meio do Hidrogênio Verde; Conversão de energia altamente eficiente; Flexibilidade de combustível; Redução da poluição do ar; Suporte de rede altamente confiável; Operação silenciosa; Baixa necessidade de manutenção e Alta confiabilidade. (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Na figura 16 é ilustrado o diagrama termodinâmico do processo de conversão da energia potencial armazenada nas ligações químicas de diversos combustíveis, sobretudo o gás hidrogênio, para a produção de energia elétrica. Observa-se, portanto, a função principal desempenhada pela célula a combustível no processo de utilização do hidrogênio.

Figura 16 – Diagrama Termodinâmico de Conversão do Hidrogênio em Energia Elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse processo é caracterizado por uma série de reações químicas de oxirredução que objetivam a passagem de elétrons através de um fio condutor, isto é, a geração de eletricidade em corrente contínua (CC), promovendo assim, o aproveitamento da energia contida nas ligações químicas de alta densidade do hidrogênio. Logo, uma vez que as células a combustível produzem eletricidade por reações de oxirredução, em vez de reações de combustão como nos convencionais MCIs, não estão sujeitas ao Limite de Carnot. Dessa maneira, podem extrair energia de um combustível com maior eficiência, podendo ainda contar com a reutilização do calor residual. (SMITHSONIAN INSTITUTION, 2017).

“A estrutura básica de todas as células a combustível é muito parecida, consistindo em dois eletrodos porosos, separados por um eletrólito, e conectados por um circuito externo, pelo qual será recolhida a densidade de corrente.” (ROBALINHO; SANTOS, 2021).

A reação global desse processo, representada pela equação 13, “é a da formação da água a partir de hidrogênio e oxigênio, com liberação de calor. A necessidade de empilhamento em série de várias unidades de células, torna-se óbvia, pois se precisa obter diferença de potenciais práticos, da ordem de 150 a 200 V.” (ROBALINHO; SANTOS, 2021).



As semirreações de oxidação, que ocorre no ânodo, polo positivo da célula, e de redução, que ocorre no cátodo, polo negativo da célula, dependem dos eletrólitos, dos eletrodos e conseqüentemente, do tipo de tecnologia de célula a combustível responsável pelo processo.

As tecnologias de células a combustível em fase comercial e de desenvolvimento são bastante diversificadas, caracterizadas pela faixa de temperatura de operação, pelo combustível utilizado, pelo tipo de catalisador e pela relação de eficiência do combustível com a conversão energética. Na tabela 1 estão apresentados os tipos de célula a combustível e o eletrólito, além de um balanço dispendo de vantagens, desvantagens e principais aplicações.

Tabela 1 – Tipos de Célula a Combustível.

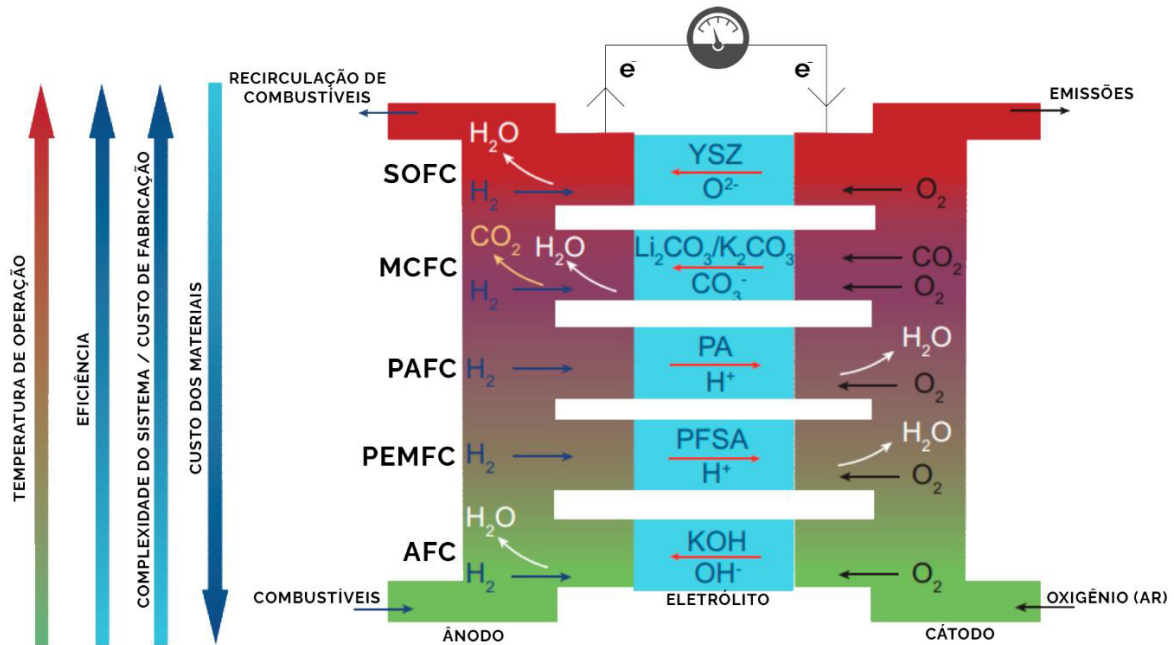
| Tipo | Eletrólito | Prós | Contras | Aplicações |
|----------------------------------|--|---|--|---|
| Alcalina (AFC) | KOH (OH ⁻) | Alta eficiência (83% teórica); | Sensível a CO ₂ ; Gases ultra puros, sem reforma do combustível; | Espaçonaves; Aplicações militares; |
| Membrana Protônica (PEMFC) | Polímero Náfion® (H ₃ O ⁺) | Operação Flexível; Altas densidades de potência e eficiência; | Contaminação do catalisador com CO; Custo da membrana; | Veículos Automotores; Mobilidade; |
| Metanol Direto (DMFC) | Polímero Náfion® (H ₃ O ⁺) | Reforma do combustível na célula; | Contaminação do catalisador com CO; Alta permeabilidade da membrana (curto- circuito); | Veículos automotores; |
| Ácido Fosfórico (PAFC) | H ₃ PO ₃ (H ₃ O ⁺) | Maior desenvolvimento tecnológico; | Sensível a CO, Corrosão; Controle da porosidade do eletrodo; | Unidades Estacionárias de 100 kW a MW; Cogeração Eletricidade/Calor; |
| Carbonato Fundido (MCFC) | Carbonatos Fundidos (CO ₃ ²⁻) | Tolerância a CO/CO ₂ ; Eletrodos a base de Níquel; | Problemas de materiais; Interface trifásica de difícil controle; | Unidades Estacionárias de centenas de kW; Cogeração Eletricidade/Calor; |
| Óxido Sólido (SOFC) | ZrO ₂ (O ²⁻) | Alta eficiência (cinética favorável); Reforma do combustível na célula; | Problemas de Materiais; Expansão Térmica; Necessidade de pré- reforma dos gases; | Unidades Estacionárias de 10kW a centenas de kW; Cogeração Eletricidade/Calor; |

Fonte: Adaptado de Linardi, 2010.

A figura 17 demonstra esquemas associados dos diferentes tipos de célula a combustível apresentados e um comparativo a nível de temperatura de operação, eficiência

teórica, custo dos materiais e complexidade do sistema aliado ao custo de fabricação, com exceção da célula de Metanol Direto, que trata-se ainda de uma tecnologia experimental, compartilhando muitas características com as células de Membrana Protônica com alimentação de combustível de metanol, facilitando a aplicação em veículos, no entanto, possui operação restrita a alguns minutos, devido a rápida contaminação por monóxido de carbono no catalisador.

Figura 17 – Esquemas e Comparativo entre tipos de Célula a Combustível.



Fonte: Adaptado de Wang; Jiang, 2017.

Destaca-se também que cada tipo de célula a combustível possui semirreações anódicas e catódicas próprias, apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Semirreações de cada Célula a Combustível.

| Tipo | Semirreação Anódica (-) | Semirreação Catódica (+) |
|-------|---|--|
| AFC | $H_{2(g)} + 2OH_{(aq)}^- \rightarrow 2H_2O_{(l)} + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow 2OH_{(aq)}^-$ |
| PEMFC | $H_{2(g)} \rightarrow 2H_{(aq)}^+ + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_{2(g)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_{(l)}$ |
| DMFC | $CH_3OH_{(aq)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CO_{2(g)} + 6H_{(aq)}^+ + 6e^-$ | $\frac{3}{2}O_{2(g)} + 6H_{(aq)}^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O_{(l)}$ |
| PAFC | $H_{2(g)} \rightarrow 2H_{(aq)}^+ + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_{2(g)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_{(l)}$ |
| MCFC | $H_{2(g)} + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O_{(g)} + CO_{2(g)} + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_{2(g)} + CO_{2(g)} + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ |
| SOFC | $H_{2(g)} + O^{2-} \rightarrow H_2O_{(l)} + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_{2(g)} + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ |

Fonte: Adaptado de Reis, 2019.

As diferentes semirreações anódica e catódica diferenciam substancialmente a operação de cada um dos tipos de célula, ocasionando eficiências energéticas e faixa de potência e de temperatura de operação características.

A tabela 3 apresenta os dados de eficiência energética, potência, temperatura e status de desenvolvimento para cada tipo de célula a combustível apresentada.

Tabela 3 – Potência, Temperatura, Eficiência Típica e Status de cada Célula a Combustível.

| Tipo | Potência Operacional | Temperatura (°C) | Eficiência (%) | Desenvolvimento |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| AFC | 10 kW a 100 kW | 60 – 120 | 35 – 55 | Comercial / Pesquisa |
| PEMFC | 100 W a 500 kW | 50 – 100 | 35 – 45 | Comercial / Pesquisa |
| DMFC | 100 kW a 1 MW | 60 – 200 | 20 – 30 | Pesquisa |
| PAFC | Até 10 MW | 150 – 220 | 40 | Comercial / Pesquisa |
| MCFC | Até 100 MW | 600 – 650 | >50 | Comercial / Pesquisa |
| SOFC | Até 100 MW | 700 – 1000 | >50 | Comercial / Pesquisa |

Fonte: Adaptado de Syhuan's, 2016.

3.2.3.1 Célula a Combustível PEMFC

Células a combustível de membrana de troca protônica ou membrana de eletrólito polimérico, ambas com a sigla em inglês PEM (do inglês, *Proton-Exchange Membrane* ou *Polymer Electrolyte Membrane*), assumem função de grande relevância na cadeia de valor do Hidrogênio Verde.

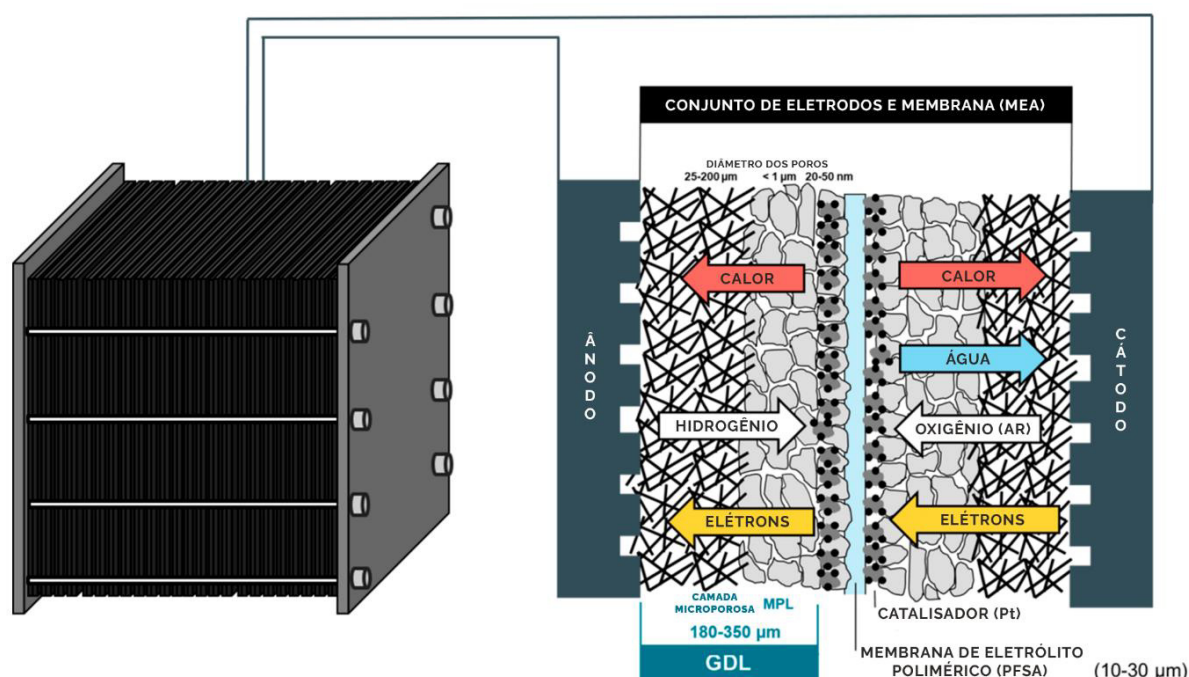
Esse destaque ocorre devido, especialmente, à baixa temperatura de operação aliada à alta densidade de potência proporcionada pela sua utilização, isto é, no contexto da mobilidade, não há a necessidade de um grande intervalo de tempo para aquecer a célula, atingindo seu ponto ideal de operação. Promovendo assim, a gradual substituição de MCIs à Ciclo Otto, com enfoque na adequação do setor de transportes de pessoas e de cargas ao processo de descarbonização da economia.

O funcionamento das células PEM se dá pela injeção de gás hidrogênio no ânodo e de gás oxigênio, proveniente do ar atmosférico, no cátodo. Os prótons gerados na semirreação de oxidação anódica (Tabela 2) são conduzidos por meio do eletrólito polimérico até o cátodo, onde ocorre a semirreação de redução catódica do oxigênio (Tabela 2) produzindo água. Simultaneamente, os elétrons provenientes do ânodo são direcionados ao cátodo percorrendo um circuito elétrico externo, produzindo então, energia na forma de calor e de eletricidade. (ANDREA, 2017).

As semirreações em questão ocorrem de maneira espontânea, no entanto, de forma muito lenta. Nesse contexto, é necessária a utilização de catalisadores de Platina (Pt) para acelerá-las, e, por tratar-se de um material escasso e de alto valor agregado, a Platina é aplicada na forma de nanopartículas ancoradas a micropartículas de carbono, com o objetivo de maximizar a relação massa/superfície ativa e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de platina utilizada. (ANDREA, 2017).

A figura 18 ilustra o funcionamento básico de uma célula desse tipo, facilitando a visualização de cada um dos seus componentes e destacando o conjunto de eletrodos e membrana (MEA, do inglês *Membrane Electrode Assembly*).

Figura 18 – Funcionamento e Componentes de uma PEMFC.



Fonte: Adaptado de SGL Carbon, 2021.

“As células a combustível do tipo PEM são compostas por dois eletrodos de difusão gasosa (condutores eletrônicos) que são separados por um eletrólito sólido (membrana condutora de prótons), placas de grafite e juntas de vedação.” (ANDREA, 2017).

As PEMFC são compostas, em sua estrutura, por um empilhamento de MEAs, com o objetivo de alcançar diferenças de potencial (ddp) elétrico da ordem das centenas de volts, de forma semelhante ao que ocorre nas pilhas comuns, e conectadas a um circuito externo de aproveitamento energético. Os principais componentes do MEA e suas funções são:

- a) Eletrodos de Difusão Gasosa (EDGs): São essencialmente, o ânodo e o cátodo do MEA, são estruturas porosas e compostas de materiais de excelente condutividade elétrica e subdivididos em duas camadas:

é, a molécula possui uma região hidrofóbica e outra hidrofílica, que é responsável pelo transporte de prótons.

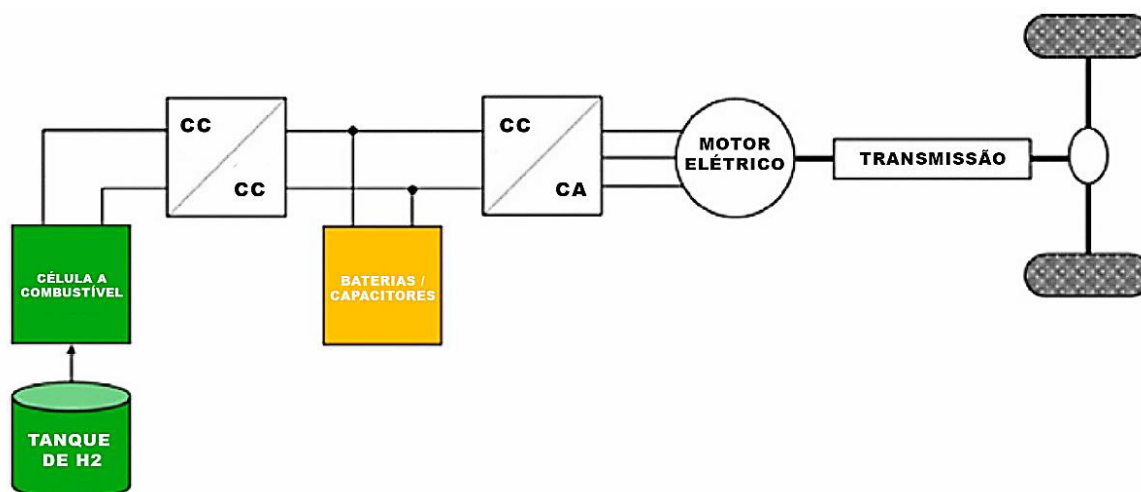
3.3 Ônibus com Células de Combustível à Hidrogênio (FCEBs)

Um dos destaques da cadeia de valor do Hidrogênio Verde é a aplicação desse combustível em transportes de pessoas e de cargas, visto que esse setor é diretamente responsável, em escala global, por 24% das emissões de CO₂. Nesse contexto, os veículos com células a combustível (FCEVs, do inglês *Fuel Cell Electric Vehicles*) são alternativas viáveis para a descarbonização do setor de transportes. (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

Os FCEBs apresentam carga reduzida, maior vida útil, maior autonomia e abastecimento em tempos menores quando comparados aos ônibus elétricos com baterias (BEBs, do inglês *Batteries Electric Buses*), assumindo, portanto, melhores possibilidades de implantação no aspecto loco regional para descarbonização, em virtude da consolidação de diversos empreendimentos para produção de Hidrogênio Verde no Estado do Ceará.

À primeira vista, a utilização do hidrogênio em transportes aparenta um alto grau de complexidade e de sofisticação, no entanto, esse tipo de aplicação é particularmente simples, oferecendo diversas facilidades mecânicas que vão além das reduções de emissão de GEEs. (DELOITTE CHINA, 2020). A figura 20 ilustra o esquema básico de funcionamento de um FCEB, com tecnologia atual de acionamento híbrido.

Figura 20 – Esquema de Funcionamento de um FCEB.



Fonte: Adaptado de Ajanovic *et al.*, 2021.

Quanto as funções de cada um dos componentes destacados:

- a) Reservatório de H₂ comprimido: Recebe o gás hidrogênio pressurizado, tipicamente a 350 bar, armazena e fornece à Célula a Combustível;

- b) Célula a Combustível: MEAs empilhados que utilizam o hidrogênio do tanque e oxigênio do ar atmosférico para a produção de energia elétrica em corrente contínua;
- c) Baterias/Capacitores: Armazenam o excedente energético produzido pela Célula a Combustível e pela frenagem regenerativa, além de fornecer energia de pico ao Motor Elétrico para atender a aceleração e a gradientes rápidos de consumo;
- d) Conversores de Corrente: Converte a energia elétrica CC fornecida pelas baterias e pela Célula a Combustível, de alta voltagem, para CC de baixa voltagem, utilizada nos acessórios e CA, utilizada no Motor Elétrico;
- e) Motor Elétrico: Aciona as rodas do veículo a partir da energia fornecida pela Célula a Combustível e pelas Baterias ou Capacitores;
- f) Transmissão: Embarcado de eletrônica de potência, gerencia o fluxo de energia elétrica fornecida ao motor, controlando a velocidade e o torque produzidos.

Além disso, há sistemas auxiliares de arrefecimento, de suprimento de oxigênio e de gerenciamento de água e de calor. Os sistemas de potência de acionamento híbrido, composto por células a combustível e baterias ou super capacitores, utilizados nas tecnologias atuais de FCEBs, alcançaram grandes desenvolvimentos tecnológicos em aumento de eficiência, autonomia e redução no tempo de abastecimento. (FUEL CELL BUSES, 2020).

Nesta configuração, o sistema de célula a combustível é considerado um “extensor de alcance”, que recarrega a bateria durante o ciclo de acionamento, além disso há mecanismos de recuperação de energia cinética dispersada durante as frenagens e de energia térmica proveniente do calor residual do processo termodinâmico das células a combustível. (AJANOVIC *et al.*, 2021).

Em síntese, os FCEBs possuem os componentes básicos mostrados na figura 20, mas podem variar bastante em características construtivas e técnicas conforme às especificidades de fabricantes e de local de operação.

3.3.1 Evolução e Perspectivas de Implementação de FCEBs

Desde 1993, quando Ballard desenvolveu o primeiro ônibus com célula a combustível a hidrogênio do tipo PEM, diversos testes de implantação desse tipo de tecnologia ocorrem com sucesso em diversas cidades, sobretudo na Europa e na China. (DELOITTE CHINA, 2020).

A tabela 4 apresenta uma síntese dos projetos de FCEBs implementados em cidades europeias no século XXI, especificando o número de veículos e o objetivo do projeto.

Tabela 4 – Projetos com FCEBs na Europa.

| Nome | Período | FCEBs | Localização | Objetivos |
|-------------------|-------------|-------|--|--|
| CUTE | 2001 – 2005 | 27 | Amsterdã, Barcelona, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Porto, Estocolmo e Estugarda | Demonstrar a infraestrutura e confiabilidade dos FCEBs |
| HyFLEET: CUTE | 2006 – 2009 | 33 | Amsterdã, Barcelona, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid e Reiquiavique | Garantir a continuidade de operação da frota do CUTE |
| CHIC | 2010 – 2016 | 54 | Berlim, Cologna, Hamburgo, Argóvia, Bolzano, Londres, Milão e Oslo | Demonstrar os FCEBs como prontos para comercialização |
| HIGH V.LO-CITY | 2012 – 2019 | 14 | Aberdeen, Antuérpia, Groninga, e Sanremo | Integrar os FCEBs nas rotas de transporte público |
| HyTransit | 2013 – 2019 | 6 | Aberdeen | Operar com FCEBs em longas rotas diárias |
| 3EMOTION | 2015 – 2022 | 29 | Aalborg, Londres, Pau, Roterdã e Versalhes | Preencher vão entre testes e implantação em larga escala |
| JIVE | 2017 – 2022 | 139 | Aberdeen, Birmingham, Bolzano, Cologna, Herning, Reno-Meno e Wuppertal | Acelerar a comercialização e a redução de custos |
| JIVE2 | 2018 – 2023 | 152 | Akershus, Auxerre, Cologna, Dundee, Gavleborg, Groninga, Pau, Reiquiavique, Holanda do Sul, Tolosa e Wuppertal | Reduzir o custo dos FCEBs para menos de 625 mil euros |
| H2BUS EUROPE | 2019 – 2023 | >600 | Dinamarca, Letônia, Reino Unido, Noruega, Suécia e Alemanha | Realizar grande implantação com custos competitivos |

Fonte: Adaptado de Ajanovic *et al.*, 2021

Com a análise da tabela 4, observa-se o grau de maturidade da tecnologia de FCEBs, que alcançou, nas duas primeiras décadas do século XXI, resultados promissores em grandes centros urbanos, provando ser confiável e configurando-se como uma alternativa de investimento, que inclusive já compete em termos de custo com a infraestrutura tradicional a diesel, abrindo o caminho para a descarbonização do transporte coletivo urbano.

No entanto, no Brasil, os preparativos para a substituição dos ônibus movidos à diesel por veículos elétricos a hidrogênio não foram executados de maneira tão efetiva, em virtude da ausência de políticas públicas voltadas para o investimento em pesquisa e para o

desenvolvimento de protótipos adaptados à realidade brasileira. Apesar disso, há duas iniciativas nacionais para projetos de FCEBs desenvolvidas pela Empresa Metropolitana de Transporte Urbano de São Paulo (EMTU) e pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

No âmbito da EMTU, o Projeto “Ônibus Brasileiro a Hidrogênio”, lançado em 2006, deu-se a partir de um complexo arranjo institucional, coordenado pela EMTU e pelo Ministério de Minas e Energia (MME), financiado com recursos do *Global Environment Facility* (GEF) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) cabendo a administração desses recursos ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). (EMTU, 2009). A figura 21 retrata o Ônibus Brasileiro a Hidrogênio em fase de testes, iniciada em 2009, aberta ao público em 2010.

Figura 21 – Ônibus Brasileiro a Hidrogênio / EMTU.



Fonte: EMTU, 2009.

Contando com ampla participação de instituições, o projeto da EMTU se beneficiou da transferência de tecnologias e de experiências adquiridas nos testes realizados na Europa, sobretudo o projeto CUTE (Tabela 4). A infraestrutura e os equipamentos utilizados no desenvolvimento do FCEB brasileiro e da sua estação de reabastecimento, localizada na garagem da Metra (empresa concessionária do Corredor Metropolitano ABD e conveniada para circular o FCEB), são das empresas: *Ballard Power Systems*, *Marcopolo*, *Nucellsys*, *Tuttotrasporti*, *AES Eletropaulo*, *Hydrogenics*, *Petrobras Distribuidora* e *EPRI International*. (EMTU, 2009).

O veículo desenvolvido e testado pelo Laboratório de Hidrogênio (LabH2) do COPPE teve a parceria e a participação das empresas *Tracel* e *Furnas*. Ao total, foram

desenvolvidos 3 protótipos a partir de 2010, sendo o último, em estado pré-comercial, testado com sucesso em 2016 durante a realização dos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro. (MIRANDA *et al.*, 2017).

Esse projeto trata-se, no entanto, de um ônibus urbano híbrido elétrico-hidrogênio com célula de combustível, isto é, necessita de carga elétrica e de hidrogênio, enfatizando a regeneração da energia cinética em elétrica energia e à diminuição do consumo de hidrogênio. (MIRANDA *et al.*, 2017). A figura 22 retrata o FCEB desenvolvido pelo COPPE.

Figura 22 – Ônibus Híbrido Elétrico-Hidrogênio / COPPE.



Fonte: COPPE, 2017.

Dessa maneira, a iniciativa brasileira para o desenvolvimento de projetos de FCEBs classifica-se ainda como embrionária e esbarra em fatores como o alto custo da infraestrutura para a produção e para a distribuição de hidrogênio, o alto custo dos veículos com células a combustível em comparação com os veículos a diesel, já que não são incluídos os custos secundários relativos a emissões, saúde e degradação ambiental e urbana.

No entanto, com o fortalecimento de uma cadeia de valor a nível estadual de produção, de utilização e de exportação de Hidrogênio Verde, os compromissos ambientais estabelecidos desde a COP-21 e a evolução tecnológica dos equipamentos objetivando a redução dos custos, os FCEBs podem tornar-se viáveis para operação na capital cearense.

3.3.2 Consumo Médio dos FCEBs

Os FCEBs são classificados, em termos de comprimento da carroceria, em dois tipos: Padrão, com valores entre 12 e 13 metros de comprimento e Articulados, com comprimento aproximado de 18m. Isso determina também o número de passageiros e a capacidade do sistema de potência utilizado para alimentação dos ônibus.

A classificação quanto ao comprimento da carroceria é particularmente relevante no aspecto do consumo médio dos FCEBs, uma vez que a demanda por hidrogênio difere significativamente em razão desse fator. Os valores médios aferidos no projeto *NewBusFuel* para um FCEB padrão foi na faixa entre 9 e 10 kg de Hidrogênio para cada 100 km rodados, já em relação a um FCEB articulado, a média ficou entre 12 e 15 kg para cada 100 km percorridos. (FCH JU, 2017).

Vale ressaltar, entretanto, que esses valores de consumo médio podem oscilar bastante em razão das circunstâncias de aplicação dos FCEBs, a exemplo da velocidade e da ocupação médias. Além disso, as condições climáticas também podem ter um impacto considerável na demanda de combustível dos ônibus, visto que o conteúdo energético necessário para a climatização dos veículos é bastante relevante. Para FCEBs padrão, o consumo adicional está na faixa de 1 a 2 kg para cada 100 km em condições frias, em condições quentes, a adição deve ser ainda maior. (FCH JU, 2017).

Em contrapartida, o consumo médio reflete, sobretudo, o grau de evolução da tecnologia utilizada, que tende a melhorar com o desenvolvimento científico e com a aplicação gradativamente maior, identificando os problemas e as soluções para a maximização da eficiência energética dos FCEBs e conseqüentemente, a redução da demanda por combustível.

O Empreendimento Conjunto de Células a Combustível e Hidrogênio da União Europeia (FCH JU, do inglês *Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking*) estabelece metas claras de avanço nas aplicações do hidrogênio visando à descarbonização de diversos setores da economia em planos plurianuais.

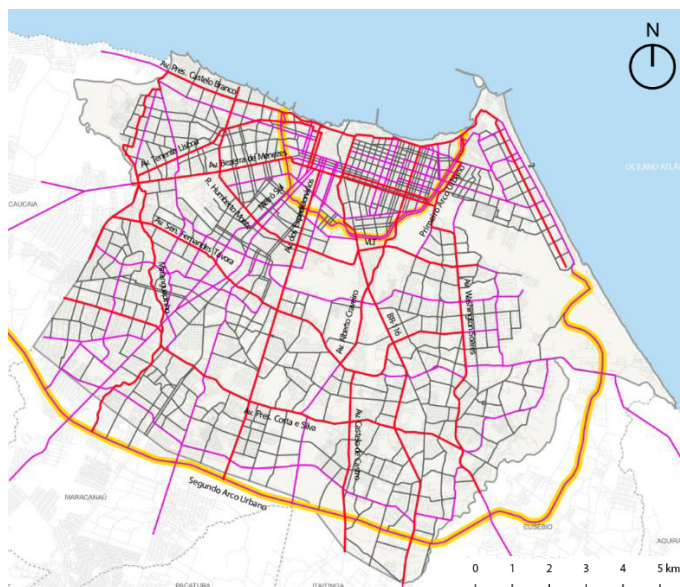
Nesse sentido, entre as metas estabelecidas por esta organização no setor de transportes, há o objetivo de redução de demanda por combustível para atingir o consumo médio de um FCEB padrão, em 2020, de 8 kg para cada 100 km e, em 2023, de 7,6 kg para cada 100 km acompanhado de redução nos custos, aumento de vida útil, de disponibilidade e de unidades em operação na União Europeia.

3.4 Município de Fortaleza e Logística de Reabastecimento de Hidrogênio

O município de Fortaleza, instalado em 13 de abril de 1726, por Resolução Régia de 9 de março de 1725, possui uma população estimada de 2,7 milhões de habitantes distribuídos em uma área de 314,93 km², ocupando a posição de quinta cidade mais populosa do Brasil. (IBGE, 2021).

A figura 23 demonstra o sistema viário básico de Fortaleza, destacando em vermelho Via Estrutural Principal (VEP), em roxo Via Estrutural Secundária (VES) e em amarelo os Arcos Urbanos, além das vias complementares que compõem o restante do sistema.

Figura 23 – Sistema Viário Básico de Fortaleza.



Fonte: Fortaleza, 2016.

Para proporcionar um sistema de transporte coletivo urbano efetivo à sua população, a Prefeitura de Fortaleza elaborou diversas ações voltadas para o setor de mobilidade urbana, contidos no Plano Fortaleza 2040, almejando inclusive o aproveitamento energético com a instalação de painéis fotovoltaicos em futuras edificações com disponibilidade de tetos, totalizando uma área líquida de 3300 hectares, localizadas nos corredores de transporte público (FORTALEZA, 2016).

No entanto, apesar da tendência de descarbonização do setor de transportes e do *hub* de hidrogênio verde do Estado do Ceará, não há a descrição no plano Fortaleza 2040 da utilização de FCEBs na frota de transporte coletivo municipal, ou mesmo de BEBs.

Em vista disso, pretende-se avaliar os aspectos logísticos, sobretudo na quantidade, das Estações de Reabastecimento de Hidrogênio (HRS, do inglês *Hydrogen Refueling Station*) da frota proposta, utilizando veículos com células a combustível a hidrogênio, com o objetivo de suprir toda a demanda da frota de forma confiável e segura.

O padrão SAE (*Society of Automotive Engineers*) J2601 regula o processo geral de reabastecimento e fornece os requisitos de desempenho para HRSs em determinadas condições de operação, com o intuito de garantir um reabastecimento confiável e seguro aos consumidores. (CAPONI *et al.*, 2021).

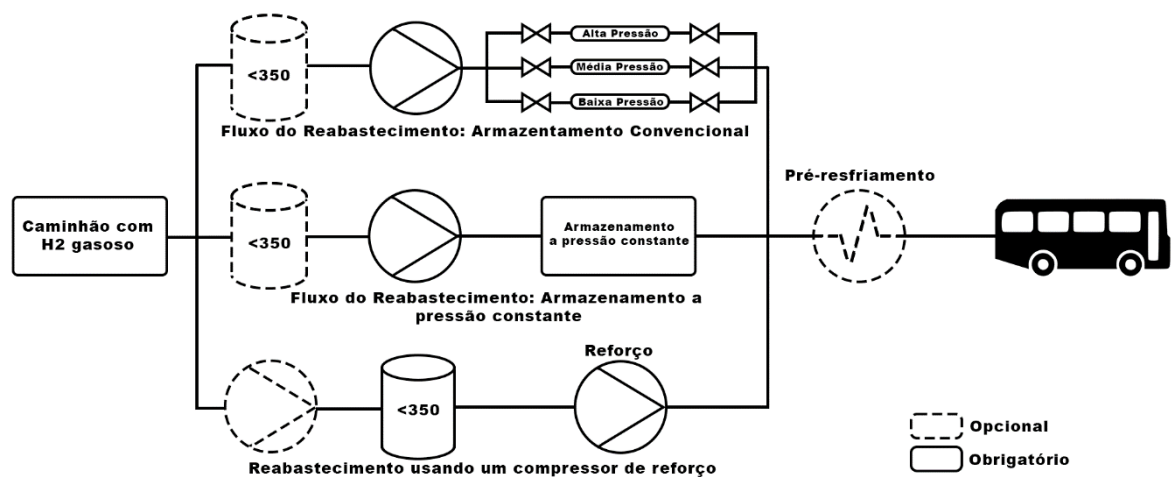
Uma HRS apresenta infraestrutura bastante similar aos postos de gasolina, diesel e gás natural, no entanto, a diferença substancial, para o consumidor, é o medidor de vazão da bomba, que afere o valor em kg para o faturamento.

No intuito de idealizar HRS voltadas para ônibus, vale ressaltar que o tanque de combustível de um FCEB tem capacidade normalmente entre 30 e 100 kg, e o protocolo SAE J2601-2, voltado para veículos pesados, estabelece três taxas de abastecimento, são eles: Lento (1,8 kg/min); Normal (3,6 kg/min); Rápido (7,2 kg/min), com isso, é possível abastecer completamente um FCEB em um tempo próximo de 5 minutos. (FCH JU, 2017).

Os FCEBs têm capacidade para transportar grandes volumes de combustível, com isso, a pressão globalmente adotada para o abastecimento e para o armazenamento de hidrogênio nesse tipo de veículo é de 350 bar, em contraste com a pressão de 700 bar, utilizado em tanques de carros ou veículos leves. Esse nível de pressão proporciona o uso de especificações mais baixas, tanto para os componentes dos ônibus, quanto para a infraestrutura da HRS, diminuindo o custo e aumentando a confiabilidade na tecnologia. Além disso, requer significativamente menos energia quando comparado a 700 bar, visto que não é exigido o pré-resfriamento do hidrogênio a 350 bar. (FCH JU, 2017).

A figura 24 ilustra um diagrama com os componentes necessários para a composição de uma HRS, em três cenários distintos.

Figura 24 – Diagrama de uma HRS típica.



Fonte: Adaptado de FCH JU, 2017.

4 METODOLOGIA

No primeiro tema abordado neste tópico, a metodologia da pesquisa será classificada quanto à natureza, à abordagem, aos objetivos e aos procedimentos. Já o segundo tema será destinado à caracterização da proposta para atingir os objetivos deste trabalho.

4.1 Classificação da Pesquisa

A natureza desta pesquisa é caracterizada como aplicada, visto que trata da aplicação de conhecimentos científicos, no caso, a conjuntura entre Energias Renováveis, Tecnologias do Hidrogênio e FCEBs, para a solução de problemas individuais ou coletivos, no qual se destaca a descarbonização e a modernização do transporte público da cidade de Fortaleza, parte fundamental para o processo de transição energética na capital cearense. (ASSIS, 2009).

A abordagem do problema é classificada como qualitativa, tendo em vista a utilização do ambiente natural como fonte para a coleta de dados e o pesquisador como instrumento-chave, além da não utilização de métodos e de técnicas estatísticas. (SILVA; MENEZES, 2001).

Quanto aos objetivos, essa pesquisa é classificada como exploratória, uma vez que visa a proporcionar maior familiaridade com o problema para construir hipóteses, envolvendo o levantamento bibliográfico e a análise de exemplos para o estímulo da compreensão. (SILVA; MENEZES, 2001).

Por fim, do ponto de vista dos procedimentos técnicos utilizados para a realização deste trabalho, destaca-se, sobretudo, a Pesquisa Bibliográfica e Estudo de Caso, em virtude da elaboração a partir de livros, artigos de periódicos e de material disponibilizado na *internet*, além da identificação de problemas e proposição de melhorias com a aplicação do estudo. (SILVA; MENEZES, 2001).

4.2 Caracterização da Proposta

O ponto de partida para o dimensionamento da proposta, especificada no objetivo geral deste trabalho, consiste no cálculo da demanda de hidrogênio por parte da frota de ônibus substituída. Nesse aspecto, a demanda é obtida a partir do tamanho da frota, em número de veículos, da rodagem média diária, assumida como uniforme para fins de simplificação, e do consumo médio por quilômetro, tendo em vista a seleção de um modelo de FCEB de carroceria tipo padrão.

Em posse da demanda e do *datasheet* de um eletrolisador comercialmente disponível e com vazão compatível com a demanda, calcula-se a taxa de produção de hidrogênio em Estações de Eletrólise, bem como o tempo de operação diário e a potência nominal de entrada, considerando também todas as perdas e consumo de energia nas cargas auxiliares.

A partir do hidrogênio produzido nas Estações de Eletrólise, calcula-se o consumo e as perdas no processo de compressão e destina-se às Estações de Reabastecimento, que, por sua vez, serão dimensionadas em quantidade e em ritmo de abastecimento.

Ademais, o conteúdo energético total necessário, levando em conta o consumo de todos os equipamentos e processos envolvidos, além das perdas, calcula-se a potência do Parque Eólico, dimensionado para suprir a demanda energética de toda a solução.

Além disso, o custo associado aos equipamentos será fundamental para a composição do comparativo financeiro entre a solução proposta e o modelo atual baseado em veículos à diesel.

Por fim, também serão calculadas as reduções de custos associados às emissões de GEEs na atmosfera, referentes sobretudo aos problemas ambientais e de saúde que ocorrem em decorrência desse impacto.

4.2.1 Demanda, Produção e Utilização

A frota de ônibus que atualmente circula na cidade de Fortaleza, segundo o Mapa de Operacionalização de Linha (MOL) da DIPLA/ETUFOR, é composta por 2029 veículos, com 1680 em plena atividade, com uma distância média diária percorrida de 204,65 km.

Figura 25 – Modelo de FCEB escolhido.



Fonte: Solaris, 2021.

Assume-se neste trabalho, a substituição total da frota de ônibus atual, movida à diesel, por FCEBs do modelo Urbino 12 Hydrogen, da fabricante Solaris, representados na figura 25.

Esse veículo comporta até 82 passageiros, com motor elétrico de acionamento integrado próximo às rodas de potência máxima do motor de tração de 250 kW, alimentado por uma Célula a Combustível, tipo PEMEC, e um conjunto de baterias de íons de lítio, ambos com 70 kW, e com um tanque de armazenamento de hidrogênio que totaliza 37,5 kg à pressão de 350 bar, proporcionando uma autonomia de até 340 km sem necessidade de reabastecimento de hidrogênio. (SOLARIS, 2021).

A demanda D_{H_2} , em kg/dia, é dada pela equação 14, em que N_v é o número de veículos que compõem a frota ativa, C_m é o consumo médio típico de um FCEB carroceria tipo padrão, considerando um gasto de 2kg de Hidrogênio a mais para cada 100km rodados em virtude da climatização necessária na cidade de Fortaleza, isto é, 0,11 kg/km e D_d é a distância média percorrida por dia por veículo.

$$D_{H_2} = (N_v \cdot C_m \cdot D_d) \quad (14)$$

Portanto, há uma demanda equivalente a 37.819,32 kg/dia de hidrogênio, o que pressupõe uma necessidade de produção de hidrogênio a uma vazão de 1575,8 kg/h, considerando um ritmo de operação diária de 24h nas Estações de Eletrólise.

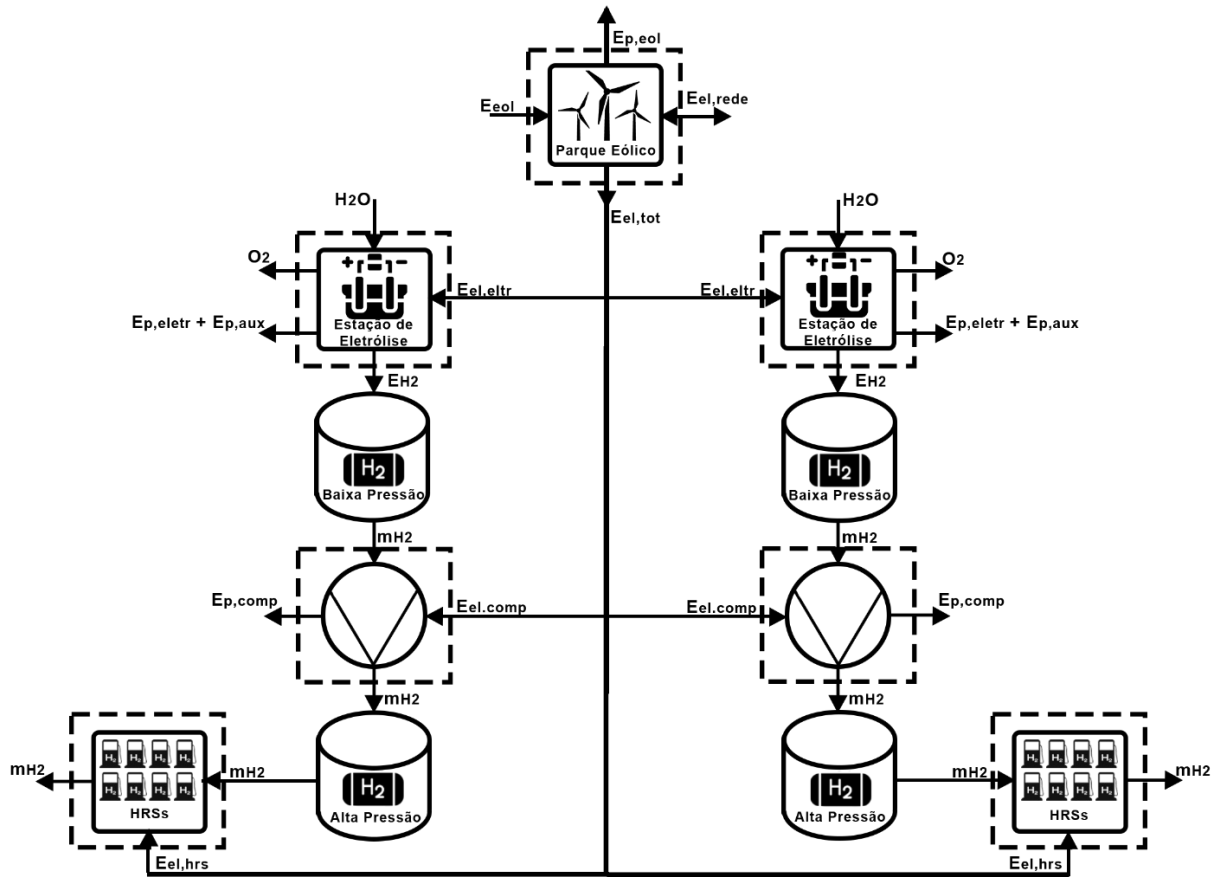
4.2.2 Análise Energética

A Análise Energética objetiva o balanço das energias de entrada e de saída em cada um dos volumes de controle considerados, bem como as perdas energéticas associadas.

Trata-se, portanto, da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica nos volumes de controle expostos na figura 26, a saber:

- a) Parque Eólico, operando com compensação de excedentes de geração;
- b) Estação de Eletrólise, duas unidades de 52,5MW de potência de eletrolisadores, além dos seus componentes auxiliares;
- c) Processo de Compressão, composto por compressores multistágios e resfriadores intermediários;
- d) Estação de Reabastecimento, 16 unidades distribuídas na cidade de Fortaleza para atender a frota de ônibus à plena operação.

Figura 26 – Volumes de Controle da Análise Energética.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em vista disso, a energia elétrica total, $E_{el,tot}$, envolvida no processo de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio é fornecida ao sistema da figura 26, em corrente alternada, por meio de um barramento principal com balanço energético demonstrado pela equação 15.

$$E_{el,tot} = 2(E_{el,eletr} + E_{el,comp} + E_{el,hrs}) \quad (15)$$

Em que $E_{el,eletr}$ é a energia consumida por uma Estação de Eletrólise, $E_{el,comp}$ é a energia consumida na compressão do hidrogênio proveniente dessa instalação e $E_{el,hrs}$ é a energia consumida num conjunto de 8 Estações de Reabastecimento, configurando então, a modularidade da solução proposta, com dois ramos equivalentes de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio.

Ressalta-se que, para este estudo, a energia relacionada ao transporte do hidrogênio dos pontos de produção aos pontos de distribuição, bem como as trocas energéticas nos pontos de armazenamento não serão consideradas. Ademais, uma parcela do conteúdo energético em cada um dos volumes de controle é perdida ou dissipada em virtude da ineficiência ou das irreversibilidades dos processos relacionados, conforme à Segunda Lei da Termodinâmica. Na

figura 26, os fluxos energéticos indicados como E_p representam essa quantidade perdida nas transformações analisadas.

4.2.3 Estações de Eletrólise

Eletrolisador é o componente fundamental da produção de hidrogênio por eletrólise da água, compreendendo, além da pilha eletrolítica, os sistemas de controle e de medição, de bombeamento, de purificação de hidrogênio, de conversão de corrente e demais sistemas auxiliares, que consomem uma quantidade de energia representada na figura 26 por $E_{el,aux}$. (KOTOWICZ *et al.*, 2017).

Nesse aspecto, o balanço energético no eletrolisador é dado pela equação 16.

$$E_{el,eletr} = E_{H_2} + E_{p,eletr} \quad (16)$$

De acordo com Kotowicz *et al.* (2017), $E_{el,aux}$ equivale a 10% da energia de entrada nos eletrolisadores comerciais de larga escala. Já E_{H_2} trata-se da energia entregue na forma de gás hidrogênio, logo, pode ser representada pela equação 17.

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot t_{op} \cdot PCI_{H_2} \quad (17)$$

Em que \dot{m}_{H_2} é a vazão mássica de saída, em kg/h, t_{op} é o tempo de operação dos equipamentos e PCI_{H_2} é o poder calorífico inferior do gás hidrogênio.

Além disso, $E_{p,eletr}$ representa as perdas por irreversibilidades do processo químico que ocorre no interior das pilhas eletrolíticas, que são comumente associadas à ineficiência do processo. Para Hosseini, Dincer e Rosen (2013), a eficiência de uma pilha eletrolítica é dada pela equação 18, que representa a razão entre a potência disponibilizada na forma de hidrogênio e a potência elétrica de entrada no eletrolisador.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}}{P_{el,eletr}} \quad (18)$$

Logo, $E_{p,eletr}$ é dado pela equação 19.

$$E_{p,eletr} = P_{el,eletr} \cdot t_{op} \cdot (1 - \eta) \quad (19)$$

Objetivando uma compreensão construtiva da produção de hidrogênio proposta por esse estudo, a figura 27 ilustra a parte interna e externa de uma Estação de Eletrólise com o equipamento Silyzer 300, da fabricante Siemens, na cidade de Linz, na Áustria, com potência de 6 MW. Ressalta-se que o eletrolisador tem dimensões de 15 m de comprimento, 7,5 m de largura e 3,7 m de altura, e podem compor instalações modulares, com vários equipamentos associados. (SIEMENS, 2021).

Figura 27 – Estação de Eletrólise instalada.



Fonte: H2Future, 2019.

4.2.4 Compressores

No intuito de comprimir o gás hidrogênio para possibilitar a distribuição até às Estações de Reabastecimento, são utilizados compressores a pistão multiestágios, com acionamento por motores elétricos de corrente alternada. Analisando o volume de controle do Compressor na figura 26, o balanço energético para esses componentes é demonstrado na equação 20.

$$E_{el,comp} = E_{w,comp} + E_{p,comp} \quad (20)$$

Em que $E_{el,comp}$ é a energia elétrica consumida pelos compressores, dada pela potência do equipamento fornecido pela fabricante, $E_{w,comp}$ é a energia útil, transformada em trabalho para aumento de pressão do hidrogênio, de 2 MPa (saída dos eletrolisadores) para 45 MPa (superior aos 35MPa de abastecimento) e $E_{p,comp}$ são as perdas energéticas relacionadas às eficiências do motor elétrico de acionamento ($\eta_{m,el}$), da mecânica de compressão (η_{comp}) e politrópica do gás (η_p). Segundo Micena (2020), os valores das eficiências citadas, respectivamente, são de: 0,9; 0,95; 0,9, para compressores comerciais de hidrogênio.

4.2.5 Estações de Reabastecimento

No processo do abastecimento, o tanque de combustível do FCEB está a uma pressão menor do que o tanque de armazenamento da HRS. Isso implica, portanto, a expansão e o aumento de temperatura do hidrogênio no momento do abastecimento. Com isso, a

temperatura do gás deve ser mantida a -40°C , como estabelece o protocolo SAE J2601, no intuito de evitar acidentes durante o abastecimento.

Nesse contexto, os equipamentos responsáveis pela regulação da temperatura, e consequentemente, representantes de maior importância do consumo energético das Estações de Reabastecimento, são as unidades de pré-resfriamento, também chamadas de *precoolers*. Esse consumo específico (kWh/kg) é caracterizado em função da massa de hidrogênio refrigerado dispensado por período e a temperatura ambiente medida, em $^{\circ}\text{C}$, conforme a equação 21. (ELGOWAINY *et al.*, 2017).

$$CE_{hrs} = \frac{0,3}{1,6 \cdot e^{-0,018 \cdot T_{amb}}} + \frac{25 \cdot \ln(T_{amb}) - 21}{D_{H_2}} \quad (21)$$

Sendo assim, o consumo de energia elétrica da Estação de Reabastecimento, $E_{el,hrs}$, é dado pela equação 22.

$$E_{el,hrs} = CE_{hrs} \cdot D_{H_2} \quad (22)$$

4.2.6 Tanques de Armazenamento

O dimensionamento dos tanques de armazenamento de hidrogênio varia substancialmente conforme a estratégia de abastecimento adotada. No modelo proposto por este estudo, cada Estação de Eletrólise é associada a dois tanques, um de baixa pressão, que recebe o gás na saída do eletrolisador e o direciona para o compressor, e um de alta pressão, que recebe o gás comprimido e armazena até o transporte para as Estações de Reabastecimento.

Atuando como um *buffer* de surto, o tanque de baixa pressão deve ter capacidade suficiente para suprir a demanda diária de hidrogênio com o fito de assegurar o abastecimento da frota mesmo em situações de manutenção preventiva ou de falha do eletrolisador. Nesse aspecto, a capacidade do tanque de baixa pressão, em cada estação, é igual a $\frac{D_{H_2}}{2}$.

Neste estudo, em virtude da quantidade de veículos abastecidos, o hidrogênio é produzido e consumido a vazões consideravelmente grandes, o que implica na necessidade de reservas substanciais de hidrogênio, com uma ampla margem de segurança, além da demanda diária. Dessa forma, considera-se a capacidade do tanque de alta pressão, em cada estação, equivalente a D_{H_2} .

4.2.7 Parque Eólico

Um parque eólico é constituído de aerogeradores, conexões elétricas e uma subestação elevadora, convertendo a energia mecânica, do tipo cinética, presente nas massas de

ar com velocidade, isto é, no vento, em energia elétrica com a atuação do gerador, localizado na nacelle.

Esse componente transforma o movimento de rotação das pás em corrente elétrica, que por sua vez, é conectada à subestação elevadora por meio de condutores. A subestação elevadora tem por finalidade a elevação da média tensão para a alta ou extra alta tensão, na qual é realizada a transmissão da energia na rede elétrica, representada por meio de um barramento de corrente alternada.

Visando o dimensionamento de um Parque Eólico com produção de energia elétrica suficiente para o abastecimento da solução proposta neste trabalho, três fatores principais devem ser considerados para a caracterização do empreendimento, são eles: A Demanda Energética, representada na figura 26 por E_{eol} ; A Localidade, que determinará a velocidade média anual dos ventos, bem como sua distribuição de frequência; As Especificações dos equipamentos, que, com base na potência, determinarão a quantidade de aerogeradores necessários para atingir a demanda na localidade estabelecida.

Com isso, analisando o volume de controle do Parque Eólico, na figura 26, o balanço energético dessa região é dado pela equação 23.

$$E_{eol} = E_{p,eol} + E_{el,tot} \quad (23)$$

Em que E_{eol} representa a Demanda Energética e $E_{p,eol}$ equivale às perdas mecânicas e elétricas totais no processo de transformação e de transmissão de energia do parque eólico. Vale ressaltar também a presença do $E_{el,rede}$ como variável bidirecional no volume de controle do Parque Eólico, visto que, na solução proposta, a energia produzida não é diretamente transmitida aos locais de consumo, e sim injetada na rede elétrica. Nesse sentido, a rede elétrica atua como “armazenamento” de energia, sendo compensada nos períodos de alta produção de energia.

4.2.7.1 Localidade Escolhida

A região escolhida para o estudo de dimensionamento proposto por este trabalho trata-se da composição entre duas áreas com formato poligonal traçada a partir do Atlas Digital Eólico e Solar do Ceará, desenvolvido a partir do convênio entre Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. (ADECE, 2019).

As áreas, ilustradas na figura 28, totalizam 11,6 km² e se localizam no município de Caucaia, pertencente à RMF, a uma latitude 3°43'48" sul e a uma longitude 38°46'37" oeste, estando a área menor situada a 301 metros e a área maior a 414 metros de altitude, com

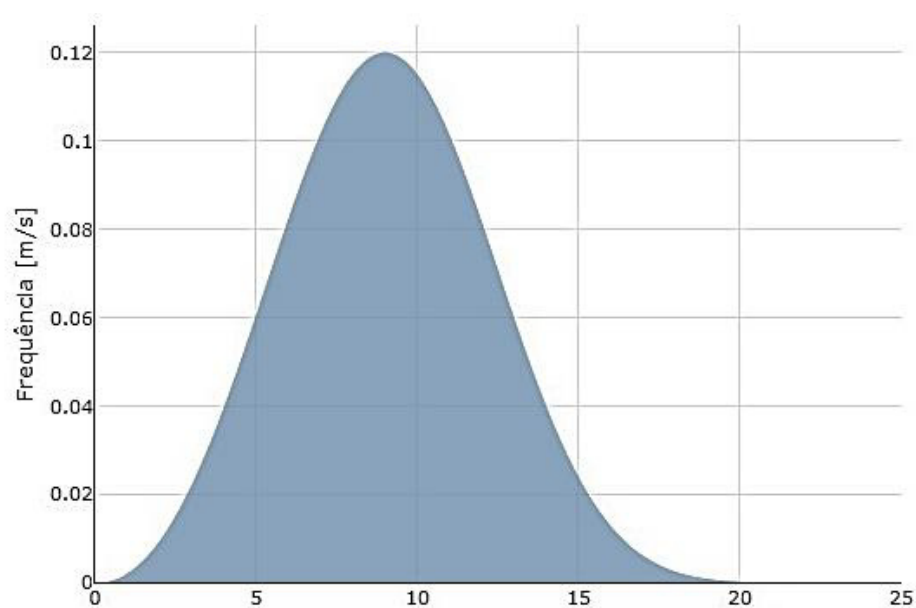
temperatura da superfície de $24,5^{\circ}\text{C}$ e densidade do ar de $1,125\text{ kg/m}^3$. Além disso, estão distantes em torno de 6 km da subestação elétrica, 4 km da linha de alta tensão, 800 m da linha de média tensão, 10 km da linha de distribuição (69 kV) e 5 km da linha de transmissão (230 e 500 kV) mais próximas. (ADECE, 2019).

Figura 28 – Área escolhida para o Parque Eólico.



Fonte: Google, 2009.

Figura 29 – Distribuição de Frequência dos Ventos nas áreas.



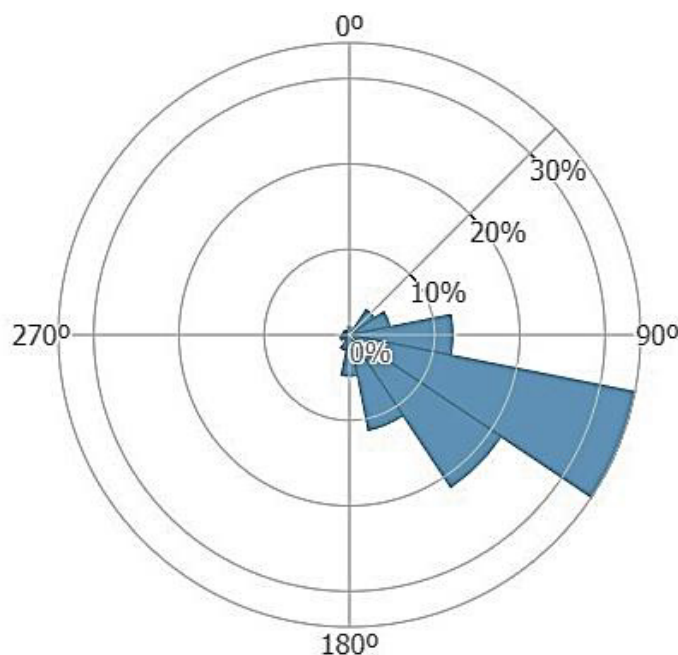
Fonte: ADECE, 2019.

O Atlas Eólico e Solar do Ceará disponibiliza os dados meteorológicos oriundos de modelos numéricos, que não substituem as medições anemométricas para o desenvolvimento de projetos reais, mas podem compor uma análise teórica para o cumprimento dos objetivos deste trabalho. Nesse aspecto, tais modelos são constituídos a partir de um conjunto de 15 anos de dados climatológicos e estabelecem, para as áreas, a 150 metros de altura, uma velocidade de ventos de 9,5 m/s, um fator de capacidade de 0,61, um fator de forma (k) de 3,2 e um fator de escala de 10,4 da Distribuição de Weibull, resultando na curva de frequência ilustrada na figura 29.

Com relação à direção dos ventos, que é especialmente relevante para a composição do *layout* do Parque Eólico, em virtude do distanciamento adotado, equivalente a 2,5 vezes o diâmetro do rotor na linha perpendicular e a 5 vezes o diâmetro do rotor na linha paralela à essa direção para prevenir a perda de geração eólica pelo “efeito esteira”, que é quando a perturbação na corrente de vento causada por um aerogerador interfere nos demais, impactando negativamente na geração de energia.

Nesse sentido, também fornecida pelo Atlas Eólico e Solar do Ceará, a figura 30 ilustra a Rosa dos Ventos, isto é, uma distribuição de frequência por ocorrência, demonstrando que, para a região escolhida, os ventos surgem da lés-sueste, portanto, os aerogeradores devem estar voltados para essa direção, seguindo os critérios de distanciamento adotados. (ADECE, 2019).

Figura 30 – Rosa dos Ventos nas áreas.



Fonte: ADECE, 2019.

4.2.7.2 Aerogerador Escolhido

O equipamento escolhido para a composição do dimensionamento teórico foi o Aerogerador V150-6.0MW™ IEC S, com torre de concreto de 155m. O fator principal para a escolha deste modelo foi a produção nacional das pás eólicas por subsidiária nacional, com os dados técnicos expostos na tabela 5.

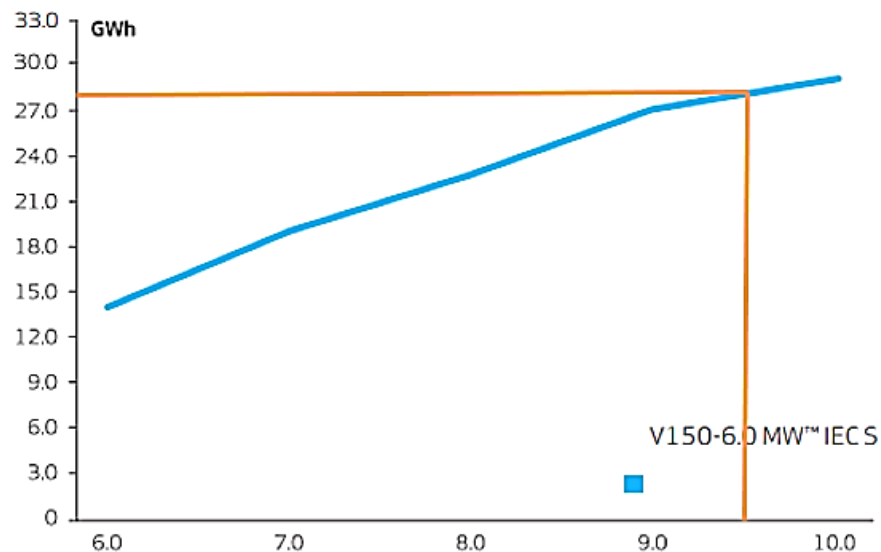
Tabela 5 – Especificações Técnicas do Aerogerador.

| Aerogerador V150-6.0MW™ IEC S | |
|---|------------------------|
| Família | V150 |
| Potência Nominal | 6000 kW |
| Diâmetro do Rotor | 150 m |
| Altura do Eixo do Rotor | 155 m |
| Tipo de Controle | Pitch |
| Número de Pás | 3 |
| Área de Varredura | 17671,5 m ² |
| Velocidade do Vento Início de Produção | 3 m/s |
| Velocidade do Vento (Corte de Produção) | 25 m/s |

Fonte: Vestas, 2021.

A fabricante também disponibiliza um gráfico de Energia Anual Gerada (EAG) por velocidade média anual dos ventos, proporcionando, para a localidade escolhida, um quantitativo anual aproximado de 28 GWh por aerogerador instalado, considerando 100% de disponibilidade, 0% de perdas e densidade do ar de 1,225 kg/m³, como ilustra a figura 31.

Figura 31 – Estimativa de geração anual.



Fonte: Vestas, 2021.

Além dos componentes principais, o aerogerador conta também com para-raios nas pás, sensores de proteção: estruturais e elétricos, de vento e de temperatura, e conexões elétricas de média tensão responsáveis por conduzir a energia elétrica produzida até uma subestação elevadora, composta por diversos equipamentos elétricos para a transformação da média tensão para níveis de transmissão ou de distribuição em benefício ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

4.2.8 Análise Econômica

Para a efetivação da solução proposta por esse trabalho, a análise econômica é substancialmente relevante em virtude da necessidade de envolvimento de diversas entidades públicas e privadas relacionadas à Geração, Transmissão e Distribuição de Energia, à Produção de Hidrogênio Verde, ao Armazenamento, Transporte e Distribuição desse gás e à Eletrificação da Mobilidade Urbana, que tem atuação notabilizada, sobretudo, pelos investimentos realizados em cada etapa da execução dessa proposta.

Nesse sentido, os dados de custo de aquisição, operação, manutenção e vida útil dos equipamentos considerados no item 4.2.2, Análise Energética, foram obtidos por meio de pesquisas disponibilizadas na literatura referenciada, expostos na tabela 6. Todos os valores estão convertidos com a taxa de câmbio de janeiro de 2022 [1,00 USD – 5,70 BRL – 0,88 EUR].

Tabela 6 – Levantamento de Custos dos Equipamentos.

| Equipamento | Custo de Aquisição | Vida Útil |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Parque Eólico | 1.473 US\$/kW (IRENA, 2020) | 30 anos (WISER; BOLLINGER, 2019) |
| Eletrolisadores | $3.424 * P_{el,elctr}^{0,885}$ US\$ (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018) | 20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018) |
| Compressores | $40.035 * P_{el,comp}^{0,6038}$ US\$ (MICENA, 2020) | 20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018) |
| Tanques de Baixa Pressão | 1.001 US\$/kg (MICENA, 2020) | 20 anos (MICENA, 2020) |
| Tanques de Alta Pressão | 1.534 US\$/kg (FCH JU, 2017) | 20 anos (FCH JU, 2017) |
| Subsistemas de Operação e Manutenção | 285 US\$/kg/dia (MICENA, 2020) | 20 anos (MICENA, 2020) |
| HRS | 1,13 US\$/kg/dia (FCH JU, 2017) | 20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018) |

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de FCH JU (2017), Gröger *et al.* (2018), IRENA (2020), Micena (2020), Miranda *et al.* (2017) e Wisser; Bollinger (2019).

Em outra perspectiva, a efetivação da proposta deste trabalho promove diversos benefícios além da diminuição dos gastos com a compra de combustíveis fósseis, sobretudo a redução do quantitativo de emissões de gases nocivos na cidade.

Nesse aspecto, segundo Paiva (2021), a quantificação dos impactos econômicos, relacionados sobretudo aos problemas ambientais e de saúde devidos à liberação de gases poluentes na atmosfera, é tradicionalmente associada a valoração de cada gás, cabendo ao Poder Público arcar com os custos decorrentes dessas emissões.

Tabela 7 – Valores e Emissões referentes a cada gás poluente.

| Gás | Valoração (US\$/t) (PAIVA, 2021) | Quantidade (g/km) (AGUIAR <i>et al.</i>, 2015) |
|----------------------|---|---|
| CO ₂ | 108,21 | ≈ 0 |
| CO | 673,32 | 1,5 |
| NO _x | 3.445,08 | 1,89 |
| SO _x | 13.112,88 | ≈ 0 |
| Hidrocarbonetos | 2.980,41 | 0,17 |
| Material Particulado | 17.622,05 | 0,17 |

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Aguiar *et al.* (2015) e Paiva (2021).

A tabela 7 contém os valores dos principais gases emitidos por veículos à MCI e a quantidade de cada gás emitida por quilômetro rodado em veículos pesados movidos à diesel em marcha lenta. Vale ressaltar que as taxas de emissões de poluentes nos ônibus são dependentes de vários fatores, a exemplo do combustível utilizado, do número de passageiros e até do estilo de pilotagem do motorista, portanto, foram utilizados valores médios para a composição da tabela.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A composição dos resultados da substituição da frota de ônibus de Fortaleza por FCEBs transcorre considerando uma substituição completa e imediata dos 1680 ônibus à diesel em atividade, com a finalidade de focar o estudo na avaliação econômica e de redução de emissões comparativa entre as duas fontes energéticas.

No entanto, ressalta-se a relevância da avaliação proposta por esse trabalho como justificativa para o investimento público e privado na descarbonização do transporte público, em virtude da seleção de parâmetros econômicos factíveis, podendo ser ajustado para a adequação aos cronogramas de testes e de implantação gradual.

Dessa forma, com a rodagem diária média adotada de 204,65 km e com o consumo médio de 0,11 kg/km de hidrogênio para a nova frota, calcula-se uma demanda diária D_{H_2} equivalente a 37.819,32 kg/dia por meio da equação 14. A partir desse valor, os subsistemas presentes na figura 26 foram dimensionados, com o cálculo dos fluxos indicados.

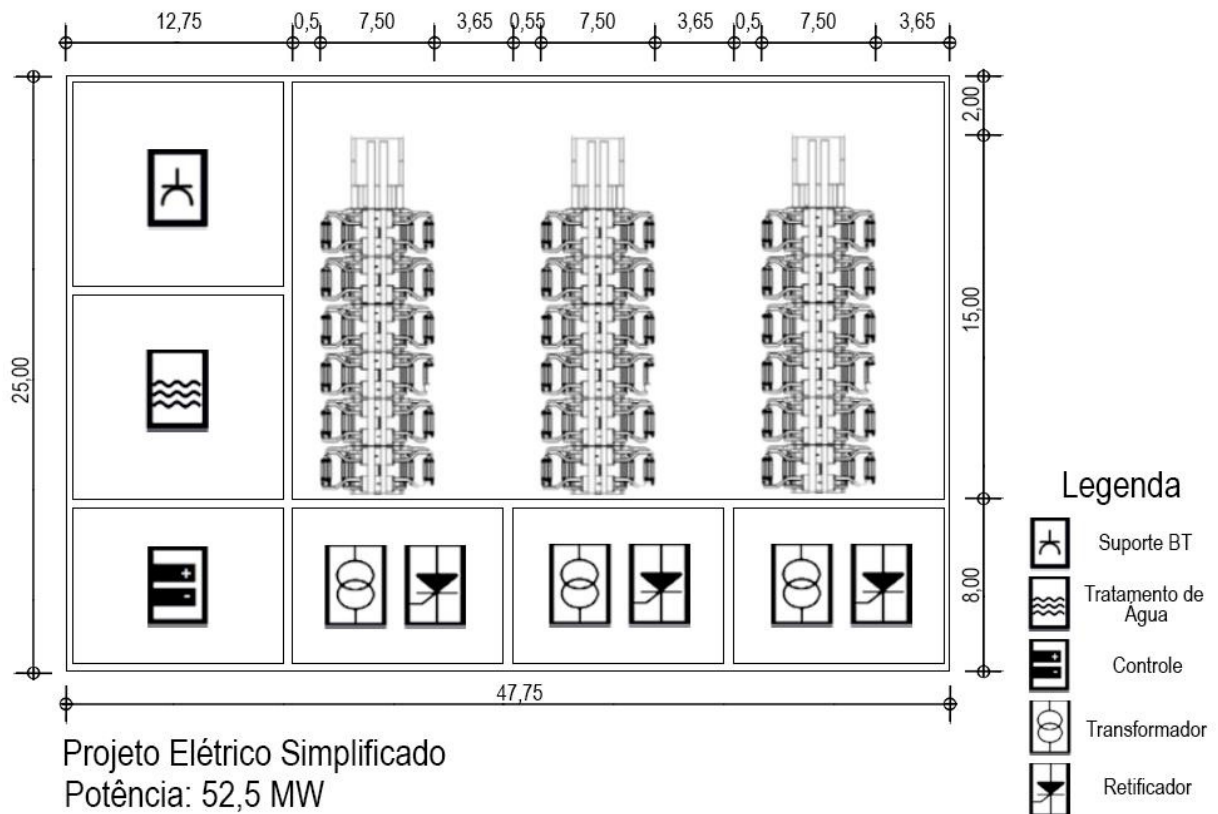
5.1 Estações de Eletrólise

No intuito de estabelecer uma base de cálculo, o eletrolisador Siemens Silyzer 300, possui uma taxa de produção de 330 kg/h no arranjo completo composto por 24 módulos (pilhas) do tipo PEMEC, a uma potência de 17,5 MW, com eficiência de 75,5%, consumo energético estimado de 39,45 kWh/kg, alimentação de água de 10 kg/kg de hidrogênio produzido e pressão de saída dos gases customizável. (SIEMENS, 2021).

Adotando como base duas instalações compostas por 3 eletrolisadores desse tipo, isto é, 52,5 MW de potência cada, é efetivada a produção total a uma vazão de 1980 kg/h, suficiente para abastecer totalmente a frota de FCEBs dimensionada para a cidade de Fortaleza, acrescida de uma folga de 25% para a previsão de expansão da frota e/ou redução no ritmo de produção dos eletrolisadores, no intuito de prolongar sua vida útil.

Em vista disso, foram compostas duas Estações de Eletrólise representadas pelo mesmo projeto simplificado ilustrado na figura 32, com os componentes auxiliares necessários em uma instalação de produção de hidrogênio, a saber: Suporte de Baixa Tensão, com o papel de conectar-se à rede elétrica; Tratamento de Água, com o intuito de eliminar impurezas da água de alimentação; Controle, com a finalidade de operar o eletrolisador; Transformador e Retificador de corrente, que tem a função de converter a corrente elétrica para CC em unidades de voltagem compatíveis a do equipamento.

Figura 32 – Estação de Eletrólise.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a vazão (\dot{m}_{H_2}) de 990 kg/h e a potência elétrica de entrada ($P_{el,elctr}$) de 52,5 MW para uma Estação de Eletrólise, e o PCI_{H_2} de 119.960 kJ/kg, equivalente a 33,32 kWh/kg, a eficiência da eletrólise (η) foi calculada em 62,83%. Para suprir a demanda diária de 37.819,32 kg, as duas estações devem operar por um período (t_{op}) de 19,1 horas/dia, produzindo todo o hidrogênio consumido pela frota diariamente.

Com isso, pode-se aferir a fração energética perdida no processo de produção do Hidrogênio ($E_{p,elctr}$) equivalente a 372.722,18 kWh em cada estação, conforme a equação 19. Dos quais 100.275 kWh são referentes à alimentação dos sistemas auxiliares ($E_{el,aux}$), isto é, 10% da energia de entrada em cada Estação de Eletrólise

Em posse do tempo de operação, pode-se calcular a energia efetivamente transferida para a eletrólise (E_{H_2}) equivalente a 630.047,88 kWh em cada estação, conforme a equação 17.

Por fim, a energia elétrica consumida por uma Estação de Eletrólise ($E_{el,elctr}$) idealizada, no período de um dia, corresponde ao somatório representado na equação 16, equivalente a 1.002.770,06 kWh.

Já no âmbito do Balanço de Massa das Estações de Eletrólise, calcula-se, para uma produção de 990 kg/h, uma quantidade de água 10 vezes superior, conforme o indicado pela

fabricante, ou seja, há uma necessidade de alimentação de 9900 kg/h de água potável, resultando também na produção do gás oxigênio a uma taxa de 7920 kg/h em cada uma das Estações de Eletrólise. A quantidade restante de água para completar o Balanço de Massa é considerada como subproduto e pode ser redirecionada para a alimentação.

A tabela 8 sintetiza os resultados diários da Análise Energética e do Balanço de Massa realizada para cada uma das Estações de Eletrólise propostas neste estudo.

Tabela 8 – Resultados das Estações de Eletrólise.

| Análise Energética | | Balanço de Massa | |
|----------------------|--------------|------------------|------------|
| E_{H_2} (kWh) | 630.047,88 | m_{H_2} (kg) | 18.909,66 |
| $E_{p,elctr}$ (kWh) | 372.722,18 | m_{O_2} (kg) | 151.277,28 |
| $E_{el,aux}$ (kWh) | 100.275,00 | m_{H_2O} (kg) | 189.096,60 |
| $E_{el,elctr}$ (kWh) | 1.002.770,06 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Compressores

O subsistema de Compressão admite uma entrada diária de 18.909,66 kg de Hidrogênio provenientes dos eletrolisadores, a uma pressão de 2 MPa, objetivando o aumento a níveis superiores a 35 MPa ideais para o abastecimento nos FCEBs, nesse estudo, se estabelece o valor de 45 MPa como referência para a análise energética do processo de compressão.

Nesse contexto, com o intuito de estabelecer uma base de cálculo com equipamentos comercialmente disponíveis, o compressor Sauer 6000 Series BasSeal^{H2} possui especificações de pressurização equivalentes, a uma taxa máxima de 1000 m³/h com uma potência de 200 kW, em soluções modulares com 2, 3 e 4 estágios e 6 cilindros. (SAUER, 2021).

Em vista disso, considerando a densidade do hidrogênio de 0,08987 kg/m³, a taxa máxima de compressão é de 89,87 kg/h, sendo necessários portanto, associados a cada Estação de Eletrólise e considerando um ritmo de atuação de 10h por dia, um arranjo de 21 compressores desse modelo.

Dessa forma, considerando a potência e o ritmo de atuação, a energia elétrica consumida diariamente no processo de compressão ($E_{el,comp}$) equivalente a 42000 kWh. Dos quais, utilizando as eficiências do motor elétrico de acionamento ($\eta_{m,el}$), da mecânica de compressão (η_{comp}) e politrópica do gás (η_p), 32.319 kWh são efetivamente transferidos para

o trabalho de compressão do hidrogênio ($E_{w,comp}$) e os 9.681 kWh referentes às perdas energéticas do processo ($E_{p,comp}$).

5.3 Estações de Reabastecimento

Segundo o FCH JU (2017), uma HRS de hidrogênio de grande porte possui capacidade de 6000 kg/dia de abastecimento, logo, considerando a demanda e a produção apresentadas, seriam necessárias 7 estações de reabastecimento para disponibilizar o hidrogênio produzido à frota.

No entanto, outra variável importante é o tempo de reabastecimento, já que, considerando um ritmo normal, de 3,6 kg/min, um FCEB do modelo selecionado levaria em torno de 10 min para ser completamente abastecido. Esse fato representa um total de 42 FCEBs abastecidos por hora em todas as HRS, isto é, seriam necessárias mais de 24h por dia de abastecimentos contínuos em cada estação para suprir à quantidade de veículos da frota.

Para contornar esse problema, será adotada a composição de 16 HRS com capacidade de 6000 kg/dia cada, resultando em uma rotina de abastecimento de 17,5h por dia para recarregar todos os FCEBs. Além disso, as HRS desta proposta seguirão a rota de armazenamento à pressão constante (Figura 24), com a utilização de um compressor e com a aplicação de unidades de pré-resfriamento.

Nesse aspecto, foi calculado o consumo específico (CE_{hrs}) equivalente a 0,3081, para uma temperatura ambiente de 27°C e a demanda de hidrogênio equivalente a um ramo da proposta, isto é, destinado a 8 HRS. Vale ressaltar que o consumo específico já considera as perdas energéticas no volume de controle da HRS, portanto, o consumo de energia diário ($E_{el,hrs}$) é equivalente a 5.826,48 kWh.

5.4 Tanques de Armazenamento

A estratégia adotada neste estudo é a de produção de hidrogênio localizada em pontos periféricos da cidade, com fácil abastecimento de água e de energia elétrica, e de transporte do gás por meio de caminhões até às Estações de Reabastecimento distribuídas no interior de Fortaleza, em locais estratégicos como garagens, proximidades de terminais e inícios/fins de rotas.

Nesse aspecto, nos pontos de produção, os componentes necessários são: Estação de Eletrólise, Compressores e Tanques de Armazenamento, posicionados na mesma região e com conexões de gás tubulares entre si.

O tanque de baixa pressão foi designado com capacidade para suportar metade da demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de um dia para eventuais manutenções preventivas e/ou corretivas, além de falhas dos equipamentos. Logo, o tanque de baixa pressão, a 2 MPa e 27°C, deve ter capacidade de 18909,66 kg, com a densidade do hidrogênio de 1,61 kg/m³ nessas condições, segundo Micena (2020). Portanto, o volume do tanque de baixa pressão deve ser equivalente a 11.745,13 m³, podendo também ser composto por um banco de tanques de menor volume.

O tanque de alta pressão, por sua vez, foi designado com capacidade para suportar a demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de dois dias para eventuais problemas de abastecimento ou de compressão. Logo, o tanque de alta pressão, a 45 MPa e 27° C, deve ter capacidade de 37891,32 kg, com a densidade do hidrogênio de 28.184 kg/m³ nessas condições, segundo CMB.Tech (2021). Portanto, o volume do tanque de alta pressão deve ser equivalente a 1.344,43 m³.

5.5 Parque Eólico

Analisando o ramo central do diagrama ilustrado na figura 26 e visando o suprimento elétrico de todos os subsistemas da solução proposta, que envolve a produção, o armazenamento e a distribuição de hidrogênio para a descarbonização da frota de ônibus de Fortaleza, o Parque Eólico é dimensionado para fornecer, anualmente, uma quantidade de energia à rede elétrica equivalente ao total consumido por todos os equipamentos.

Dessa forma, assume-se, nesse trabalho, um sistema compensatório hipotético em que a energia gerada pelo Parque Eólico é injetada na rede elétrica e, conforme a demanda, consumida pelos equipamentos, desconsiderando os modelos tarifários e leilões de compra e venda de energia, tendo como único parâmetro o quantitativo energético anual, no intuito de focar a abordagem no aspecto técnico e nos custos de implantação dos empreendimentos.

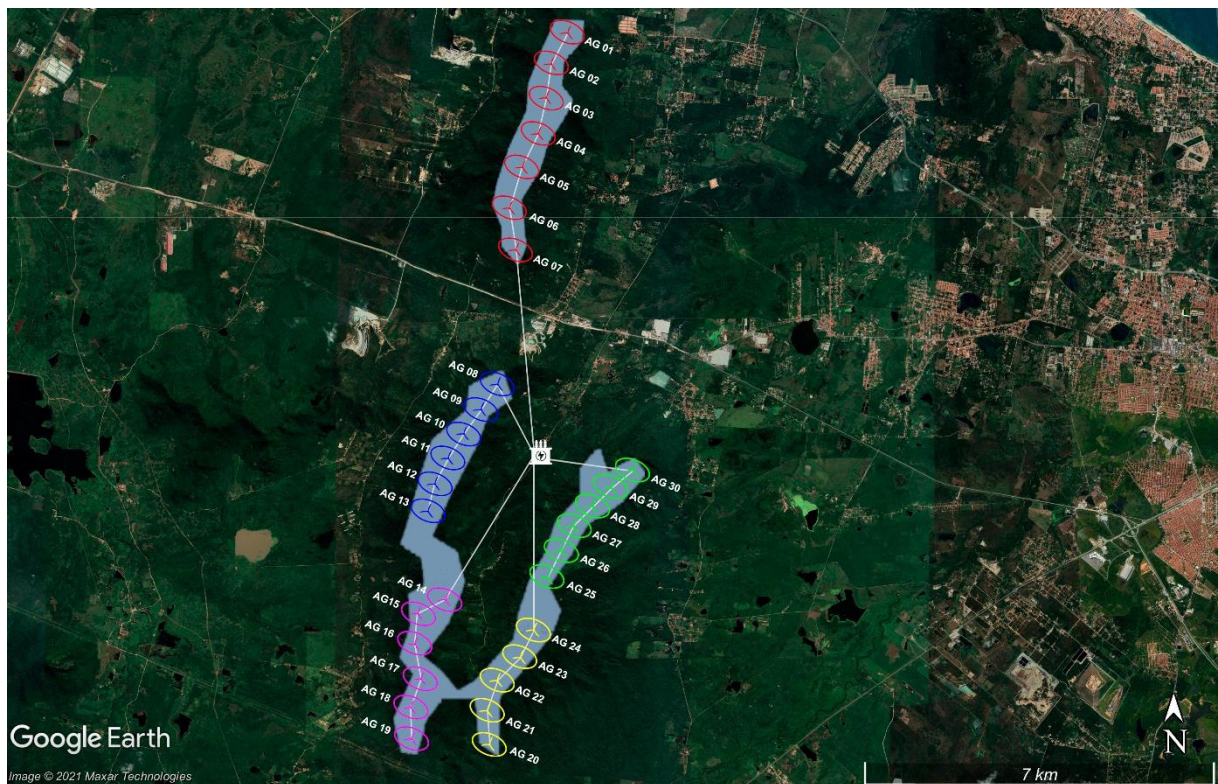
Nesse aspecto, o Parque Eólico deve produzir uma quantidade de energia anual equivalente a 365 vezes o consumo de energia elétrica diário dos equipamentos ($E_{el,tot}$), dado pela equação 15. Essa demanda de produção foi calculada em 766,93 GWh anualmente.

Considerando o modelo de aerogerador e a localidade escolhidos, com velocidade média dos ventos de 9,5 m/s e EAG de 28 GWh por aerogerador instalado, o Parque Eólico foi dimensionado com 30 aerogeradores, totalizando uma potência instalada de 180 MW, fornecendo 840 GWh à rede elétrica. Isso representa um quantitativo superior em 9,53% à demanda da proposta estabelecida por esse estudo, destinados, sobretudo, à compensação das

perdas mecânicas e elétricas no processo de conversão energética, logo ($E_{p,eol}$) equivale a 73,07 GWh.

A partir do dimensionamento, o *layout* proposto para o Parque Eólico é ilustrado na figura 33, detalhando o posicionamento dos aerogeradores na área designada para o empreendimento, as áreas elípticas de distanciamento para a prevenção do “efeito esteira”, as conexões elétricas entre os aerogeradores e o posicionamento da subestação elevadora.

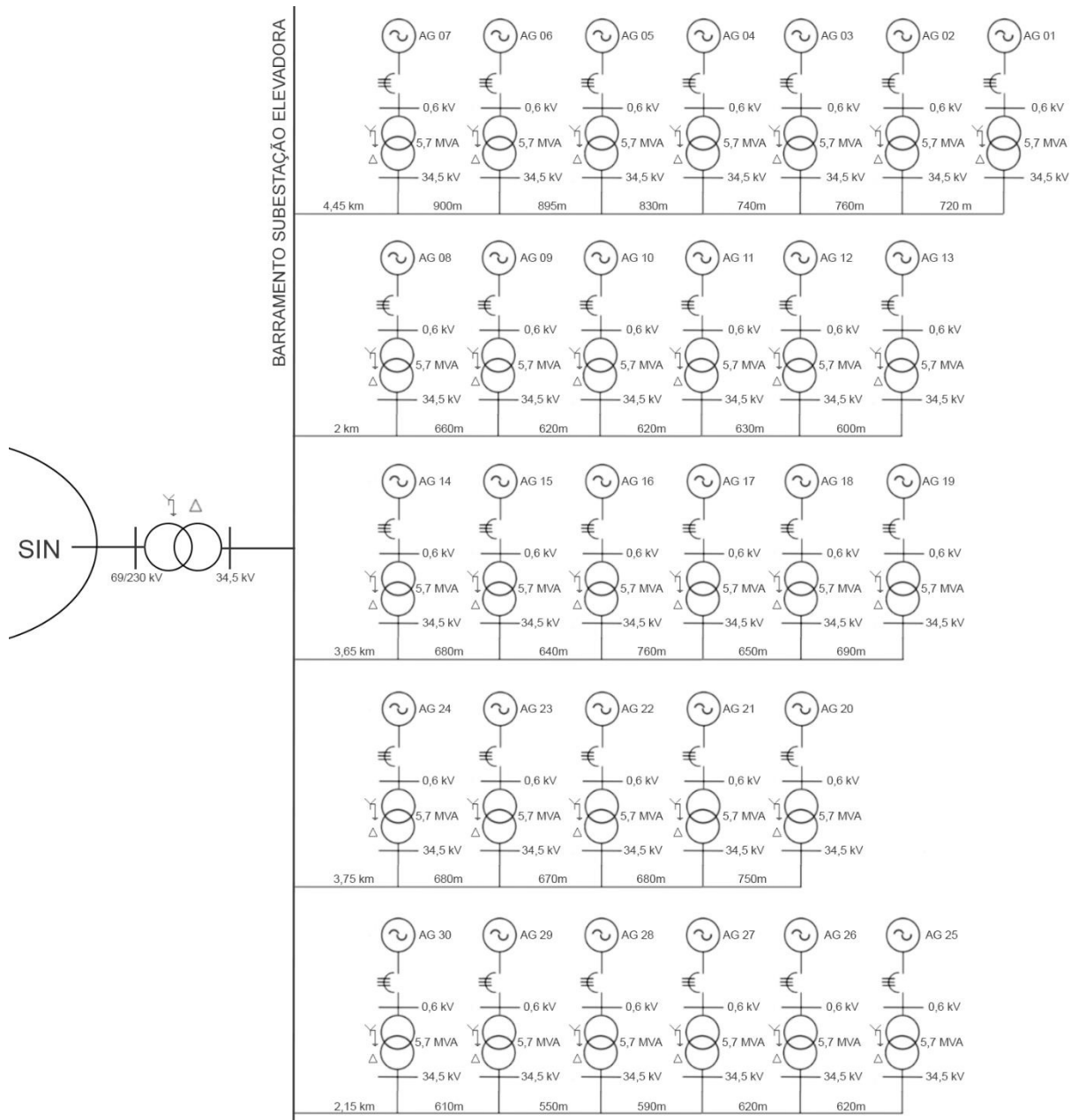
Figura 33 – *Layout* do Parque Eólico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em complemento ao *layout* ilustrado pela figura 33, a figura 34 representa o Diagrama Unifilar Simplificado correspondente ao Parque Eólico proposto por este estudo, contando com 5 circuitos conectados à subestação elevadora, transformadores, considerando um fator de potência na faixa de valores entre -0,95 a 0,95, disjuntores tripolares em cada aerogerador, além de especificar os tipos de ligação feitas nos transformadores.

Figura 34 – Diagrama Unifilar simplificado do Parque Eólico.



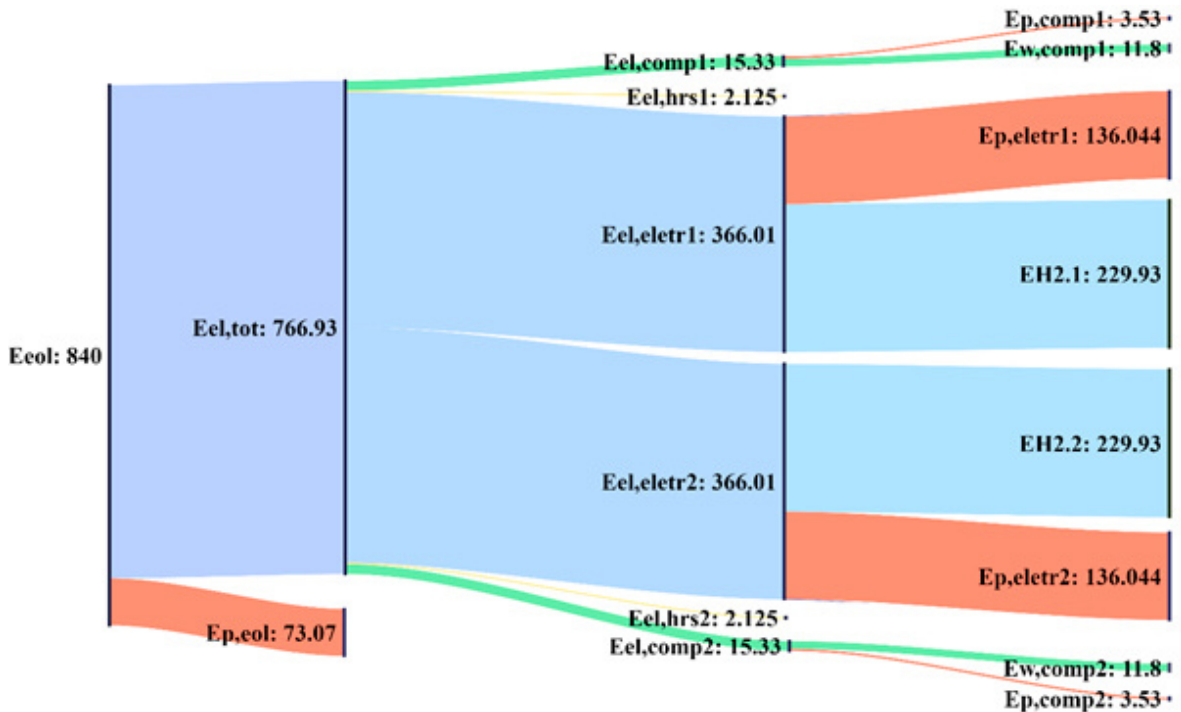
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Diagrama de Sankey

No intuito de estabelecer uma representação visual para os fluxos energéticos estabelecidos a partir da análise dos subsistemas da figura 26, foi idealizado um Diagrama de *Sankey*, que é uma ferramenta de visualização de dados desenvolvida durante a Revolução Industrial pelo capitão irlandês Matthew Sankey. (FIRMINO, 2020). No diagrama é possível visualizar a relação entre variáveis com um ponto de partida e pelo menos um ponto de chegada,

podendo também ter diversos níveis, como na figura 35, em que todos os fluxos energéticos partem da produção energética anual equivalente a 840 GWh.

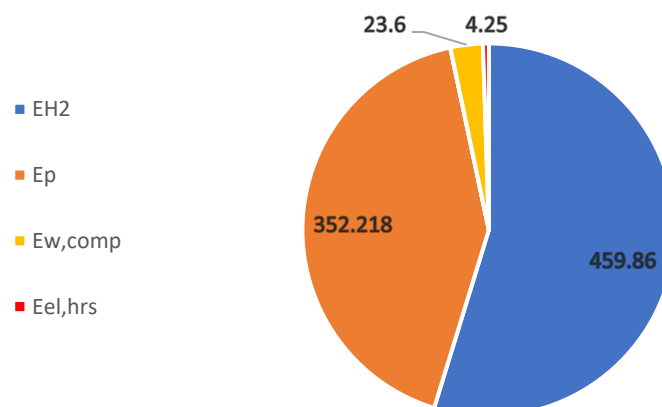
Figura 35 – Diagrama de *Sankey*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se, a partir da análise da figura 35, a quantidade de energia, em GWh, destinada a cada subsistema da solução proposta por este trabalho no período de um ano. Vale ressaltar que os fluxos indicados na cor vermelha representam as perdas energéticas, na cor azul, representam as quantidades de energia consumidas pela eletrólise da água, na cor verde, representam as quantidades de energia consumidas pela compressão do hidrogênio e na cor amarela, representam as quantidades de energia consumidas no abastecimento dos FCEBs.

Gráfico 4 – Quantidade de Energia por subsistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 4 ilustra a quantidade de energia anual efetivamente destinada à cada subsistema, e evidencia as perdas em cada um dos processos de forma unificada, dada por E_p .

Nesse aspecto, os fluxos indicados como $E_{H2.1}$ e $E_{H2.2}$ na figura 35 são as parcelas de energia efetivamente utilizadas para a produção do hidrogênio em cada uma das estações de eletrólise, logo, a eficiência global do processo de utilização da energia eólica para a produção do hidrogênio é de 54,75%.

No entanto, nem toda a fração energética não convertida em hidrogênio é equivalente às perdas por ineficiência, visto que, as perdas energéticas, representadas por E_p no gráfico 4, representam 41,93% do total produzido. Com isso, afirma-se que abastecimento, compressão e sistemas auxiliares de eletrólise consomem somente 3,32% da energia total produzida.

5.7 Análise Econômica

Em conformidade aos dimensionamentos dos subsistemas propostos por este estudo, foram calculados os custos com a aquisição dos equipamentos. Além disso, sobre esse valor foram adicionados os complementos de 5% para preparação do terreno, 10% para Engenharia, 5% para contingência e 3% para permissões. (MICENA, 2020).

Tabela 9 – Custo de Investimento em Equipamentos

| Equipamento | Quantidade | Investimento (US\$) |
|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Parque Eólico | 180 MW | 265.140.000,00 |
| Eletrolisador | 105 MW | 95.123.163,62 |
| Compressores | 2 x 21 x 200 kW | 9.373.885,96 |
| Tanques de Baixa Pressão | 2 x 18.909,66 kg | 37.857.139,32 |
| Tanques de Alta Pressão | 2 x 37.891,32 kg | 116.250.569,80 |
| Subsistemas de Operação e Manutenção | 37.891,32 kg/dia | 10.799.026,20 |
| Estações de Reabastecimento | 16 x 6000 kg/dia | 108.480,00 |
| Investimento em Equipamentos | | 534.652.264,9 |
| Preparação do Terreno (5%) | | 26.732.613,25 |
| Engenharia (10%) | | 53.465.226,50 |
| Contingência (5%) | | 26.732.613,25 |
| Permissões (3%) | | 16.039.567,95 |
| Investimento Total | | 657.622.285,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 sintetiza os custos relacionados aos equipamentos com base nos valores de aquisição da tabela 6 e nos dimensionamentos realizados no estudo. Nesse aspecto, admite-se o valor de aproximadamente US\$ 657,6 milhões para a aquisição e instalação dos equipamentos, com vida útil igual ou superior a 20 anos.

Ademais, é necessário considerar o custo anual do consumo de água para a eletrólise, com valores de 18,48 R\$/m³ indicados pela Cagece (2021) para categoria industrial, o dispêndio anual foi calculado em US\$ 455.533,70, considerando uma densidade de 1000 kg/m³.

Com relação aos custos com combustível para a frota atual de veículos à diesel, considerando um consumo médio de 0,40 L/km, e os mesmos parâmetros utilizados para o cálculo da demanda de hidrogênio, isto é, 1680 veículos em atividade e 204,65 km/dia de distância média percorrida, obteve-se uma demanda diária de 137.524,8 L de diesel. Considerando o preço do diesel de 5,67 R\$/L informado pela Petrobrás para janeiro de 2022 no Estado do Ceará, foi calculado um custo anual de US\$ 49.932.359,62.

A infraestrutura de recarga dos ônibus à diesel já está estabelecida nos postos de abastecimento comuns da cidade, no entanto, o valor do diesel atinge valores mais altos a cada ano, com a expectativa de aumento ainda maior à medida que as grandes economias transitam para a descarbonização. Em vista disso, já é possível traçar expectativas de retorno financeiro a longo prazo, mesmo com a aquisição e instalação de toda a infraestrutura de produção do hidrogênio.

Além disso, no contexto da emissão de gases, a tabela 10 sintetiza os valores anuais emitidos pela frota de ônibus atual e sua valoração respectiva, conforme a demanda de diesel calculada e os valores de referência informados na tabela 7.

Tabela 10 – Valores e Emissões anuais em Fortaleza.

| Gás Emitido | Quantidade (kg) | Valor Associado (US\$) |
|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| CO | 188.237,07 | 126.743,78 |
| NO _x | 237.178,71 | 817.099,62 |
| Hidrocarbonetos | 21.333,54 | 63.573,93 |
| Material Particulado | 21.333,54 | 375.940,60 |

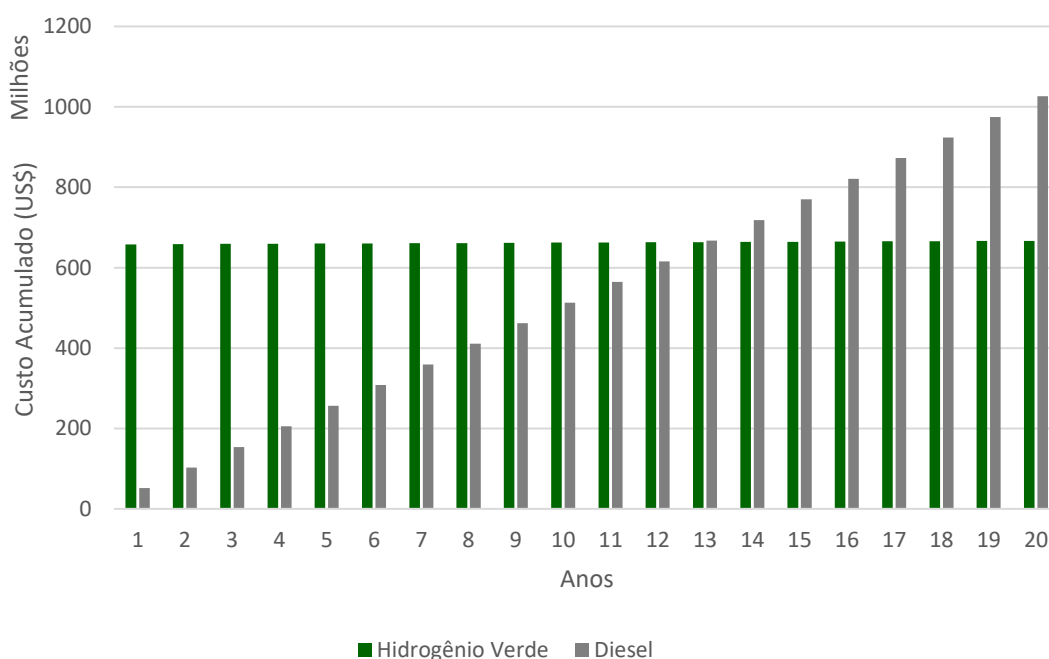
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, US\$ 1.383.357,93 são gastos, em média, anualmente em decorrência dos problemas ambientais e de saúde relacionados à emissão de gases tóxicos. Isso totaliza um custo atual de US\$ 51.315.717,55 por ano relacionado ao combustível e às emissões decorrentes de sua combustão.

Com a efetivação da proposta de substituição da frota de ônibus atual por FCEBs, esse custo anual passaria somente para US\$ 455.533,70 referentes à água consumida nas Estações de Eletrólise, já que todos os custos de consumo de energia elétrica de todos os subsistemas necessários são supridos pelo Parque Eólico, e já tem valores contabilizados no investimento inicial.

Sendo assim, o gráfico 5 demonstra o comparativo entre o custo total acumulado, no período de 20 anos, para o abastecimento das duas modalidades de ônibus analisadas por este estudo, em que, para o Hidrogênio Verde consideram-se o investimento inicial em infraestrutura de aquisição e instalação dos equipamentos para sua produção e as entradas anuais relacionadas ao custo da água consumida, já para o diesel, consideram-se somente as entradas anuais relacionadas ao custo do combustível.

Gráfico 5 – Comparativo entre combustíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico 5 é possível notar o *payback* do investimento inicial em infraestrutura para produção do Hidrogênio Verde em 13 anos, totalizando uma economia, no tempo total de vida útil dos equipamentos, equivalente a US\$ 359.541.391,20.

No entanto, um dos grandes entraves para a efetivação da descarbonização do transporte público de grandes cidades, como Fortaleza, é o alto custo relacionado à aquisição dos novos veículos movidos à hidrogênio. Segundo Miranda (2018), o custo unitário de produção de uma unidade de um FCEB no Brasil é de R\$ 2 milhões (US\$ 350.877,72), enquanto para um ônibus convencional esse valor é de R\$ 500 mil (US\$ 87.719,30).

Em vista disso, o valor adicional para cada substituição é de US\$ 263.158,42. Estendendo para o total da frota ativa e considerando duas substituições no período de 20 anos, já que a vida útil de um FCEB, segundo Miranda *et al.* (2017), é de 800.000 km, isto é, aproximadamente 11 anos considerando a rodagem média adotada nesse estudo, o custo total destinado à compra dos FCEBs foi calculado em US\$ 884.212.291,20.

Dessa forma, o valor de economia com o combustível representa 40,7% do custo total com a substituição dos ônibus convencionais por FCEBs no período de 20 anos.

Por fim, vale ressaltar que, para efetivar a descarbonização completa da frota de ônibus de Fortaleza, é recomendada uma ação pública de incentivo à produção local, fortalecendo a cadeia de valor do Hidrogênio Verde, bem como a geração de emprego e de renda para a população local, além disso, o ganho de escala para a produção dos mais de 4000 FCEBs, em 20 anos, podem significar uma grande redução do custo de produção unitário, evidenciando ainda mais a adoção do Hidrogênio Verde como alternativa válida para a transição energética do transporte coletivo urbano em Fortaleza.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando o contexto da transição energética e da descarbonização de diversos setores da economia à luz das metas estabelecidas no Acordo de Paris, este trabalho almejou a elaboração de uma proposta de aplicação do Hidrogênio Verde produzido a partir de Energia Eólica no transporte coletivo urbano de Fortaleza, por meio da análise técnica e econômica dos subsistemas necessários para produção, compressão, armazenamento, distribuição e utilização de uma quantidade de gás hidrogênio dimensionada com os parâmetros da atual frota de ônibus da cidade.

No intuito de compreender essa proposta, primeiramente, a bibliografia relacionada à Tecnologia do Hidrogênio, à Energia Eólica e aos Ônibus com células a combustível a Hidrogênio foi revisada, possibilitando a avaliação do estado atual dos atores envolvidos na proposta, bem como o funcionamento, seus critérios para dimensionamento, a confiabilidade e disponibilidade de mercado das tecnologias.

Em seguida, com os conhecimentos obtidos a partir da revisão bibliográfica, foram dimensionados os subsistemas de produção, de compressão, de armazenamento e de abastecimento, determinando os fluxos energéticos envolvidos na substituição total da frota de ônibus de Fortaleza por FCEBs, verificando a quantidade e a potência necessária de equipamentos comercialmente disponíveis, bem como seu consumo elétrico e seu custo de aquisição, instalação, operação e manutenção.

No aspecto da produção, foi calculada uma demanda diária de 37.819,32 kg de gás hidrogênio para atender a necessidade da frota substituída por FCEBs. Para suprir essa demanda, foram idealizadas duas Estações de Eletrólise com capacidade de produção de 1980 kg/h e potência de 52,5 MW cada. Dessa forma, foram calculados uma eficiência de 62,83% para as Estações de Eletrólise e um consumo elétrico diário de 1.002.770,06 kWh para cada estação.

Para comprimir a produção diária, foi composto um arranjo de 21 compressores comercialmente disponíveis, com potência total de 4,2 MW e consumo elétrico diário de 42000 kWh associados a cada Estação de Eletrólise.

No âmbito do armazenamento, verificou-se a necessidade de dois tanques de armazenamento de hidrogênio associados a cada Estação de Eletrólise, com capacidade de 18.909,66 kg ou 11.745,13 m³ para a baixa pressão (2 MPa) e 37.819,32 kg ou 1.344,43 m³ para a alta pressão (45 MPa), podendo ser idealizados em um sistema de banco de tanques de menor volume.

Já com relação as Estações de Reabastecimento, foi dimensionado uma necessidade de 16 HRSs com capacidade de abastecimento de 6000 kg/dia e tempo de abastecimento de 3,6 kg/min, totalizando um consumo elétrico diário de 11.652,96 kWh.

Com isso, foi calculada uma demanda energética anual, para todos os subsistemas envolvidos na proposta, de 766,93 GWh. Posteriormente, foi dimensionado um Parque Eólico com capacidade de geração de energia elétrica anual de 840 GWh, suficiente para a compensação energética da demanda dos subsistemas citados e das perdas mecânicas e elétricas do Parque. O dimensionamento foi feito a partir do posicionamento dos 30 aerogeradores comercialmente disponíveis, totalizando uma potência de 180 MW, e da elaboração do diagrama unifilar simplificado.

Diante da identificação de todos os fluxos energéticos, foi elaborado um diagrama de *Sankey*, em que se verificou a eficiência global do processo de 54,75%, isto é, do total de energia gerado no Parque Eólico, 54,75% é efetivamente transferido para a produção do hidrogênio. Além disso, foi estimada uma quantidade de perdas relacionada a cada um dos subsistemas, totalizando 41,93% do total de energia gerado, sendo assim, os 3,32% restantes são destinados a alimentação dos sistemas auxiliares de eletrólise, dos compressores e das Estações de Reabastecimento.

Por fim, foi feita a análise econômica da substituição da frota atual de veículos a diesel por FCEBs, avaliando os custos de aquisição dos equipamentos e da infraestrutura de produção de hidrogênio, estabelecendo um comparativo que revelou, para a mudança de combustível, uma economia anual de US\$ 49.932.359,62 referentes a compra do diesel para o abastecimento da frota e US\$ 1.383.357,93 referentes aos problemas ambientais e de saúde relacionados à emissão dos gases tóxicos pela frota movida à diesel.

Isso totaliza US\$ 359.541.391,20 no período de vida útil dos equipamentos e um *payback* do investimento em 13 anos, nas condições adotadas. Esse valor economizado é suficiente para suprir 40,7% do custo total do investimento nas substituições dos veículos realizadas no período de vida útil.

Dessa forma, pode-se afirmar que a descarbonização da frota de ônibus, com a utilização de veículos movidos a hidrogênio, é tecnicamente viável em virtude da disponibilidade comercial de todos os equipamentos envolvidos nos subsistemas detalhados nesse estudo. Além disso, a análise econômica realizada indicou uma redução massiva dos custos associados ao abastecimento da frota, no contexto de transição energética mundial emergente devido às mudanças climáticas, que já impacta no custo dos combustíveis fósseis.

No entanto, os valores economizados não são suficientes para suprir os altos custos de aquisição dos FCEBs. Esse problema pode ser contornado a partir de uma ação pública de incentivo à produção local desses veículos, bem como dos seus componentes, o que pode contribuir significativamente para a redução de custos em virtude do ganho de escala, além da geração de emprego e renda para a população local, do incentivo ao desenvolvimento de soluções tecnológicas adaptadas à realidade regional e do fortalecimento da cadeia de valor do Hidrogênio Verde.

Vale ressaltar que a utilização de FCEBs apresenta diversas vantagens em relação aos ônibus elétricos com baterias, destacando a carga reduzida, maior vida útil, maior autonomia e abastecimento em tempos menores, assumindo assim, o papel de tecnologia protagonista no aspecto loco regional visando à eletromobilidade.

Dentre as limitações do estudo estão: A consideração do oxigênio, também produzido pelas Estações de Eletrólise com pureza de 99,5%, como subproduto, desprezando o aproveitamento comercial desse gás e a impossibilidade de considerar os fluxos energéticos envolvidos no transporte do oxigênio, em caminhões-tanque, das Estações de Eletrólise até as Estações de Reabastecimento, em virtude da opção por não determinar locais fictícios para essas instalações.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citadas diversas formas de complementaridade à proposta realizada, em virtude do alto grau de complexidade e de importância, dentre as quais, destaca-se: O planejamento da substituição gradual da frota de ônibus por FCEBs, bem como a implantação gradual dos subsistemas para a disponibilidade do combustível, se valendo das características modulares apresentadas nesse estudo; O estudo logístico de posicionamento das Estações de Eletrólise e de Reabastecimento, bem como o planejamento do transporte do gás entre essas unidades; Estudos relacionados a alimentação de água para as Estações de Eletrólise, em virtude dos grandes volumes, necessitando de uma solução de dessalinização, de aproveitamento de águas residuais e da coleta pluvial, entre outras diversas possibilidades adotando cada um dos subsistemas como cenário para a aplicação de estudos de caso.

REFERÊNCIAS

- ADECE. **Atlas Eólico e Solar do Ceará**. Curitiba: Camargo Schubert; Fortaleza: ADECE, FIEC, SEBRAE, 2019. 188 p. Disponível em:
<http://atlas.adece.ce.gov.br/ebook/mobile/index.html>. Acesso em: 9 nov. 2021.
- 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.
- ANDREA, Vinicius. Estudo comparativo de desempenho e durabilidade de células a combustível do tipo PEM. 2017. **Tese** (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. doi:10.11606/T.85.2018.tde-29012018-103733. Acesso em: 7 nov. 2021.
- AJANOVIC, A. GLATT, A. HAAS, R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell buses. **Energy**. Volume 235, 2021, 121340, ISSN 0360-5442,
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>. Acesso em: 7 nov. 2021.
- 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: 22 jul. 2021.
- ASSIS, Maria Cristina de. **Metodologia do Trabalho Científico**. In: Evangelina Maria B. de Faria; Ana Cristina S. Aldrigue. (Org.). *Linguagens: usos e reflexões*. 3 Ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim Anual de Geração Eólica 2020**. 2020. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o_2020.pdf. Acesso em: 29 set. 2021.
- 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**,

p. 4, 2021. Disponível em:

https://6fefcbb86e61af1b2fc4c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/005/845/original/CDP-relatorio-governoseclima-FINAL_.pdf?1628892687 Acesso em: 29 set. 2021.

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: 10 jan. 2022.

COPPE. **Terceira geração do Ônibus a Hidrogênio da Coppe aproxima veículo do mercado**. 2017. Disponível em: <https://www.coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/terceira-geracao-do-onibus-a-hidrogenio-da-coppe-aproxima-veiculo-do>. Acesso em: 10 jan. 2022.

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.

EMTU. **Consórcio para a Implementação do Projeto “Ônibus a Célula a Combustível para Transporte Urbano no Brasil”**. 2009. Disponível em: <https://www.emtu.sp.gov.br/EMTU/pdf/p06epri.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

FAERMAN, H.; FREIRE, W. Brasil pode ser hub de exportação de hidrogênio. **Canal Energia**, 2020. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/especiais/53146389/brasil-pode-ser-hub-de-exportacao-dehidrogenio>. Acesso em: 29 set. 2021.

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/wpcontent/uploads/2017/03/NewBusFuel_D4.3_Guidance-document-for-large-scale-hydrogenrefuelling_final.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br&client=opera. Acesso em: 7 nov. 2021.

FELTRE, R. **Química Volume 2 - Físico-Química**. 6ed. São Paulo: Moderna, 2004

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 ago. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.18391/req.v19i3.5640>.

FIRMINO, D. A. **Diagrama de Sankey: o que é, e como fazer no Excel**. 2020. Disponível em: <https://www.opuspesquisa.com/blog/tecnicas/diagrama-sankey/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

FORTALEZA, Prefeitura Municipal. **Plano Fortaleza 2040**. 8 Volumes. Fortaleza: Iplanfor, 2016.

FONTANET, Flávia Aguiar. Avaliação de uma opção de espera de um Parque Eólico pelo Método de Opções Reais. **Dissertação** (Mestrado). Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2012. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22813/22813_1.PDF. Acesso em 7 nov. 2021.

FUEL CELL BUSES. Project Information the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. **About fuel cell electric buses**. 2020. Disponível em: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/fuel-cell-electric-buses-fuel-cell-electric-buses/about-fuelcell-electric-buses>. Acesso em: 7 nov. 2021.

FURLAN, André Luís. Análise técnica e econômica do uso do hidrogênio como meio armazenador de energia elétrica proveniente de fontes eólicas. **Tese** (Doutorado). Campinas,

SP: [s.n.], 2012. Disponível em:

http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/263953/1/Furlan_AndreLuis_D.pdf. Acesso em 29 set. 2021.

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.

GHOTE, C. C. **O arco-íris do hidrogênio**. 2021. Disponível em:

<https://pt.linkedin.com/pulse/o-arco-%C3%AADris-do-hidrog%C3%AAnio-carlos-caio-gothe>.

Acesso em: 29 set. 2021.

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. 2021.

GOOGLE. **Google Earth website**. 2009. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em 29. set. 2021.

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: 9 nov. 2021.

H2FUTURE. **A European Flagship Project for Generation and Use of Green Hydrogen**.

2019. Disponível em: <https://www.h2future-project.eu/images/news/H2FUTUREshort-description.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2021.

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.

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.; WĘCEL, 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: 9 nov. 2021.

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

LAGUNA-BERCERO, M. A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. **Journal of Power Sources**, v. 203, p. 4–16, 2012. Elsevier B.V.

LINARDI, M. **Introdução a Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**, 1.ed., São Paulo, SP: Artiber, 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-no-brasil-e-destaque-em-conferencia-mundial/#:~:text=Paulo%20Em%C3%ADlio%20de%20Miranda%2C%20coordenador>. Acesso em: 10 jan. 2022.

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.

NAÇÕES UNIDAS. **Adoção do Acordo de Paris**, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uplo-ads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 29 set. 2021.

NEL HYDROGEN. **Hydrogen Production**. 2021. Disponível em: <https://nelhydrogen.com/market/hydrogen-production/>. Acesso em: 29 set. 2021.

NEOENERGIA. **Você sabe como funciona um aerogerador?**, 2021. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx>. Acesso em: 29 set. 2021.

NEWBOROUGH M.; COOLEY G. Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. **Fuel Cells Bulletin**, Volume 2020, Issue 11, 2020, Pages 16-22, ISSN 1464-2859, [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0).

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.

REIS, P. **Células de Combustível: Principais tipos e características**. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-tipos/>. Acesso em: 9 nov. 2021.

RENEWABLE UK. **What causes the wind?**, 2011. Disponível em: <http://web.archive.org/web/20110304181329/http://www.bwea.com/edu/wind.html>. Acesso em: 29 set. 2021.

ROBALINHO, E. SANTOS, K A. Célula a Combustível tipo PEMFC: Energia renovável e eficiente. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 13. n. 3. 2021.

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 Étnico Racial**. v. 7. n. 1. 2019.

ROSA, A. V. da. **Processos de energias renováveis**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SAUER. **Hydrogen Compressors: Dependable up to 500 bar – anywhere, anytime, anygas**. 2021. Disponível em: https://www.ynna.cz/obrazky-soubory/sauer_hydrogen_compressors_en-378c4.pdf?redir. Acesso em 9 nov. 2021.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa. **Perfil de Emissões**. 2018. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territories/ce-fortaleza/card?year=2018&cities=true>. Acesso em: 29 set. 2021.

SENGER, Eduardo Cesar; FILHO, Francisco Antônio Reis. Plantas eólicas: modelagem para estudos de curto-circuito e critérios de ajustes das proteções de planta eólica. **Revista digital - O Setor Elétrico**. Ed. 114, Julho, 2015. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1722-plantas-eolicasmodelagem>. Acesso em: 29 set. 2021.

SGL CARBON. **Gas Diffusion Layers for Polymer-Electrolyte-Membrane-Fuel-Cells**. 2021. Disponível em: <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/applications/polymer-electrolyte-membrane-fuel-cells-pemfc/#>. Acesso em: 9 nov. 2021.

SIEMENS. Green Hydrogen: Cornerstone of a sustainable energy future. **Expo Dubai UAE**. 2021. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>. Acesso em: 29 set. 2021.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 121 p.

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

SMITHSONIAN INSTITUTION. **A Basic Overview of Fuel Cell Technology**. 2017. Disponível em: <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>.

SOLARIS. **Zero Emissions Powertrains: Product Catalogue 2021/2022**. 2021. Disponível em: https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2021/2021/EN_Zeroemisyjne_1920_x_1080.pdf. Acesso em 9 nov. 2021.

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.

STOLTEN D, SAMSUN RC, GARLAND N. Fuel cells: data, facts, and figures. **John Wiley & Sons**; 2016.

SYHUAN'S, A. P. **Presentation**. Introduction on Fuel Cell. Bangi, Malaysia: 9th Asian School on Renewable Energy Committee. 2016.

VESTAS. **Enventus™ Platform**. 2021. Disponível em:
<https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/enventus/enventus/enventus-brochure-2021/>. Acesso em: 9 nov. 2021.

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

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