



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

**MATEUS VALQUIRO PEREIRA LIMA**

**CENÁRIOS DE CUSTO E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DO TRANSPORTE PÚBLICO  
DE FORTALEZA (CE): ESTUDO DE CASO DA ADOÇÃO DO HIDROGÊNIO  
VERDE**

**FORTALEZA**

**2023**

MATEUS VALQUIRO PEREIRA LIMA

CENÁRIOS DE CUSTO E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DO TRANSPORTE PÚBLICO DE FORTALEZA (CE): ESTUDO DE CASO DA ADOÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

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.

Orientadora: Profa. Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço

FORTALEZA

2023

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

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

---

L699c Lima, Mateus Valquiro Pereira.

Cenários de custo e de emissões de CO<sub>2</sub> do transporte público de Fortaleza (CE) : estudo de caso da adoção do hidrogênio verde / Mateus Valquiro Pereira Lima. – 2023.  
90 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço.

1. Emissão de dióxido de carbono. 2. Cenários de descarbonização. 3. Mudanças climáticas. 4. Mobilidade urbana. I. Título.

CDD 621.042

---

MATEUS VALQUIRO PEREIRA LIMA

CENÁRIOS DE CUSTO E DE EMISSÕES DE CO2 DO TRANSPORTE PÚBLICO  
DE FORTALEZA (CE): ESTUDO DE CASO DA ADOÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

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: 23/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Prof. Me. Thiago Ribeiro Francelino  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Eng. Mestrando Hariel Abreu Pereira  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

À Deus.

Aos meus pais, Valquiro e Fátima.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de concluir este trabalho. Gostaria de expressar minha gratidão a minha orientadora Profa. Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço por sua orientação, paciência e motivação durante todo o processo.

Também gostaria de agradecer aos membros da banca examinadora, o Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire, o Prof. Me. Thiago Ribeiro Francelino e o Eng. Mestrando Hariel Abreu Pereira, por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho.

Agradeço à minha família, meus tios e primos, e em especial meus pais, Valquiro Pereira Maciel e Maria de Fátima Pereira Lima, por me apoiarem em todos os momentos e me incentivarem a buscar meus sonhos. Enfatizo que a garra de minha mãe, seu empenho, dedicação, amor e carinho sendo uma mulher extremamente forte que nunca deixou a fé e a paixão por ajudar o próximo serviram-me de imensa força motriz para realizar os meus sonhos, muito obrigado minha “Mainha”.

Ao meu irmão Benedito que sempre esteve ao meu lado enfrentando os desafios dessa caminhada, orientando-me na vida.

As minhas avós, Maria e Sebastiana, por todo amparo e carinho, durante o curso.

A minha futura esposa, Sara Alcântara de Carvalho, por toda a motivação, amparo e amor que sempre me deu forças para lutar pelos meus sonhos.

Aos meus amigos, Breno Matias, Djones Oliveira, Érica Ribeiro, Gabriela Pinheiro, José Hiago e Rafael Lemos agradeço por me ajudarem a manter o equilíbrio emocional e me motivarem a continuar, pois a amizade em Deus permanece eternamente.

Em especial a minha gratidão vai ao meu amigo Lucas Fernando que sempre me ajudou na minha caminhada durante todos esses anos de graduação.

Agradeço também à Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de estudar e realizar este trabalho, e aos funcionários de toda a instituição, pois vocês fazem a diferença na vida de todos nós universitários.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores e colegas que contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal ao longo do curso.

“A fé é a força pela qual um homem pode conseguir qualquer coisa de Deus.” (São Pio de Pietrelcina).

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo quantificar os custos da tarifa de ônibus e as emissões de Gases de Efeito Estufa para o ano de 2030 em Fortaleza, considerando dois cenários: i) um que mantém o uso do combustível atual da frota (diesel); e ii) outro no qual a frota seria totalmente substituída por uma movida a hidrogênio verde. Para tanto, adotou-se a metodologia desenvolvida pelo Núcleo de Estudos das Cidades (NEC), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP, para o cálculo do valor unitário da tarifa de transporte público. 3 tipologias de premissas de projeções foram consideradas. A primeira levou em consideração a utilização exclusiva do método NEC, culminaram no valor de 14,43 reais para o hidrogênio e 4,78 reais para o diesel. A segunda adotou uma correção tarifária com base na série histórica fornecida pela ETUFOR, resultando em uma tarifa projetada de 7,08 reais em 2030 para o diesel e em 16,32 reais para o hidrogênio. A terceira projeção avaliou um cenário hipotético de implementação de um mercado de carbono, e associou, na tarifa final dos passageiros, um custo/subsídio as emissões de CO<sub>2</sub> para cada combustível considerando valor total de emissão evitada até 2030. Ao considerar a substituição da frota a diesel por uma movida a hidrogênio verde, o transporte público da cidade deixaria de emitir cerca de 151 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, obtendo os valores de 12,98 reais em 2030 para o diesel e em 10,42 reais para o hidrogênio. Ademais, admitindo o cenário onde o hidrogênio serve-se do desconto da pegada de carbono e o diesel é penalizado, em 2029 a taxa da tarifa para o hidrogênio já se torna mais econômica que a do diesel: para o ano 2030 tem-se a tarifa de 10,42 reais para o hidrogênio e para o diesel de 12,98 reais. Diante das inferências dos cenários propostos, o horizonte sugerido para 2030 é de curto prazo, mas já apresenta que a utilização do hidrogênio é promissora e competitiva a longo prazo. Se considerarmos a terceira tipologia, o uso do hidrogênio como combustível já se torna competitivo em 2029, apresentando uma diferença de dois reais para o fortalezense.

**Palavras-chave:** H2V; cenários de descarbonização; mudanças climáticas, mobilidade urbana.

## ABSTRACT

This research aimed to quantify the costs of bus fares and Greenhouse Gas (GHG) emissions for the year 2030 in Fortaleza, considering two scenarios: i) one that maintains the use of the current fleet's fuel (diesel); and ii) another in which the fleet would be completely replaced by one powered by green hydrogen. To achieve this, the methodology developed by the Núcleo de Estudos das Cidades (NEC), from the Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) at USP, was adopted for calculating the unitary value of public transportation fares. Three typologies of projection assumptions were considered. The first took into account the exclusive use of the NEC method, resulting in a value of 14,43 reais for hydrogen and 4,78 reais for diesel. The second adopted a fare adjustment based on the historical series provided by ETUFOR, resulting in a projected fare of 7,08 reais in 2030 for diesel and 16,32 reais for hydrogen. The third projection assessed a hypothetical scenario of implementing a carbon market and associated, in the passengers' final fare, a cost/subsidy for CO<sub>2</sub> emissions for each fuel, considering the total avoided emission value until 2030. Considering the replacement of the diesel fleet with one powered by green hydrogen, the city's public transportation would avoid emitting about 151 thousand tons of CO<sub>2</sub>, resulting in values of 12,98 reais in 2030 for diesel and 10,42 reais for hydrogen. Moreover, assuming the scenario where hydrogen benefits from a carbon footprint discount and diesel is penalized, in 2029, the fare rate for hydrogen already becomes more economical than diesel: for the year 2030, the fare is 10,42 reais for hydrogen and 12,98 reais for diesel. Faced with the inferences from the proposed scenarios, the suggested horizon for 2030 is short-term but already demonstrates that hydrogen use is promising and competitive in the long run. If we consider the third typology, the use of hydrogen as fuel becomes competitive in 2029, presenting a two-reais difference for residents of Fortaleza.

**Keywords:** H2V; decarbonization scenarios; climate change; urban mobility.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DEMANDA GLOBAL DE HIDROGÊNIO POR TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO, 2020-2030. .....	8
FIGURA 2: DIFERENTES CAMINHOS PARA A GERAÇÃO E EMPREGO DO HIDROGÊNIO COMO PORTADOR DE ENERGIA .....	9
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO BÁSICA DA ELETRÓLISE DA ÁGUA. ....	10
FIGURA 4: PROCESSO DE ELETRÓLISE DA ÁGUA. ....	10
FIGURA 5: DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA BÁSICO DE ELETRÓLISE ALCALINA DA ÁGUA. ....	12
FIGURA 6: DESENHO ESQUEMÁTICO DOS ELETROLISADORES, A) UNIPOLAR E B) BIPOLAR....	13
FIGURA 7: FUNCIONAMENTO DE UM ELETROLISADOR DO TIPO PEM. ....	15
FIGURA 8: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM ELETROLISADOR SOE. ....	16
FIGURA 9: FUNCIONAMENTO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL. ....	18
FIGURA 10: CONFIGURAÇÃO MECANISMO FCEB E DISTRIBUIÇÃO MECANISMO FCEB. ....	20
FIGURA 11: MODELO URBINO 12 HYDROGEN. ....	27
FIGURA 12: MAPA DAS 12 REGIONAIS DE FORTALEZA 2023. ....	42
FIGURA 13: ÔNIBUS TIPO PADRON - MERCEDEZ BENS. ....	51
FIGURA 14: CARROCERIA OF 1721/59 EURO 6 DA MERCEDEZ BENZ .....	51
FIGURA 15:LCOH EM 2030 NO BRASIL. ....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: QUANTIDADE DE EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DO SETOR DE ENERGIA EM FORTALEZA-CE. .....	41
GRÁFICO 2: EVOLUÇÃO DA TARIFA DIESEL (2021-2030). .....	55
GRÁFICO 3: TONELADAS DE CO <sub>2</sub> EMITIDAS POR ANO. ....	56
GRÁFICO 4: TARIFA COM O USO DE H <sub>2</sub> V AO LONGO DOS ANOS. ....	61
GRÁFICO 5: COMPARAÇÃO ENTRE AS TARIFAS PARA H <sub>2</sub> V E DIESEL. ....	62
GRÁFICO 6: EVOLUÇÃO DAS TARIFAS COM A PEGADA DE CARBONO. ....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALORES ADOTADOS PARA AS PROJEÇÕES.....	26
TABELA 2: VARIÁVEIS FIXAS .....	26
TABELA 3: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DE FORTALEZA. FORTALEZA, UFC, 2017. .....	38
TABELA 4: MÉDIA MENSAL DE PASSAGEIROS POR ANO (CRESCIMENTO DE 3,2% ANO). .....	44
TABELA 5: VALORES DO PNEU E DA REFORMA .....	45
TABELA 6: FROTA DE ÔNIBUS .....	45
TABELA 7:EVOLUÇÃO DO SALÁRIO-MÍNIMO .....	46
TABELA 8: PREVISÃO DE SALÁRIOS (2022 - 2030). .....	46
TABELA 9: MÉDIA MENSAL POR ANO DE KM/VEI.....	47
TABELA 10: PREVISÃO DE SUBSÍDIOS (2021 - 2030).....	48
TABELA 11: EVOLUÇÃO DO PREÇO MÉDIO DO ÓLEO DIESEL PARA GRANDES .....	48
TABELA 12: PROJEÇÕES PARA O DIESEL.....	49
TABELA 13: DADOS COMPILADOS DO MAPA DE OPERACIONALIZAÇÃO DE LINHA (MOL) DA DIPLA/ETUFOR. ....	50
TABELA 14: VALORES PROJETADOS PARA O CENÁRIO 1. ....	52
TABELA 15: VALORES DA TARIFA COM O USO DO DIESEL .....	52
TABELA 16: CRESCIMENTO DA TARIFA PELA MÉDIA HISTÓRICA.....	53
TABELA 17: VALORES DA TARIFA COM O USO DO DIESEL.....	54
TABELA 18: QUANTITATIVO PARA AS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	55
TABELA 19: DADOS PARA A OBTENÇÃO DA TARIFA TENDO COMO COMBUSTÍVEL O HIDROGÊNIO. .....	57
TABELA 20: VALORES PARA H <sub>2</sub> V E FCEBs 2021-2030. ....	58
TABELA 21: VALORES ESTATÍSTICO PARA COTAÇÃO R\$/US\$.....	59
TABELA 22: VALORES CORRIGIDOS PARA O REAL (R\$).....	59
TABELA 23: TARIFA COM O USO DE HIDROGÊNIO .....	60
TABELA 24: R\$ EVITADOS COM A DOÇÃO DO CENÁRIO 2. ....	61
TABELA 25: VALOR EM REAIS DA EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> POR PASSAGEIROS.....	62
TABELA 26: VALORES CORRIGIDOS COM A PEGADA DE CARBONO.....	63
TABELA 27: VALORES DAS TARIFAS COM A PEGADA DE CARBONO .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADM	Custo mensal de despesas administrativas
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
BEN	Valor total mensal dos benefícios
CAP	Custo mensal de capital
CCS	tecnologias de captura e armazenamento de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
CME	Custo mensal total
CMP	Custo mensal para os passageiros
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COM	Custo mensal de combustível
CON	Consumo de combustível
COP	Conference of the Parties
CPQ	Custo por quilômetro
DPN	Duração total de pneus
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESO	Encargos sociais
ETUFOR	Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza
FAD	Fator pessoal de administração
FCEB	Fuel Cell Electric Buses
FCV	Full Cell Vehicle
FDA	Fator despesas administrativas
FLU	Fator lubrificantes
FMA	Fator pessoal de manutenção
FPA	Fator peças e acessórios
GEE	Gases do Efeito Estufa
GEIPOT	Grupo Executivo para a Integração da Política de Transportes
H2V	Hidrogênio Verde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Internal Combustion Engine

ICO	Índice de cobradores por ônibus em operação no pico
IEA	International Energy Agency
IFD	Índice de fiscais/despachantes por ônibus em operação no pico
IMO	Índice de motoristas por ônibus em operação no pico
IO	Idade do ônibus
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPKe	Índice de passageiros por quilômetro equivalente
IPKt	Índice de passageiros por quilômetro total
IRENA	International Renewable Energy Agency
LUB	Custo mensal de lubrificantes
MOL	Mapa de Operalização da Linha
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NEC	Núcleo de Estudos das Cidades
NOF	Número de ônibus na frota
NOP	Número de ônibus em operação no pico
NPN	Número de pneus
NRE	Número de reformas
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
PCO	Preço do combustível
PEA	Custo mensal de peças e acessórios
PES	Custo mensal de pessoal
PME	Número mensal de passageiros equivalentes
PMT	Número mensal total de passageiros
PPA	% De passageiros que pagam 100% da tarifa
PPB	% De passageiros que pagam 50% da tarifa
PPC	% De passageiros que pagam 0% da tarifa
PPD	% De passageiros que pagam 0% da tarifa
PPI	% De passageiros que pagam a tarifa integral
PPN	Preço do pneu
PRE	Preço da reforma
QME	Quilometragem mensal percorrida pela frota
ROD	Custo mensal de rodagem

SCO	Salário mensal dos cobradores
SFD	Salário mensal dos fiscais/despachantes
SMO	Salário mensal dos motoristas
TDO	Tipo de ônibus
TRE	Taxa de remuneração
TRI	Custo mensal de tributos
TTR	Taxa de tributos
USP	Universidade de São Paulo
VON	Valor do ônibus novo
VONb	Valor do ônibus novo básico
VSM	Valor do subsídio mensal
VSM	Valor do subsídio mensal

## LISTA DE SÍMBOLOS

US\$	Dólar
%	Porcentagem
R\$	Real
Kg	Quilograma
l	Litro

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. OBJETIVO GERAL .....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
3.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	4
3.2. DESCARBONIZAÇÃO .....	5
3.3. ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	5
3.3.1. HIDROGÊNIO VERDE: ELETRÓLISE POR VIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS .....	9
3.3.2. TIPOS DE ELETROLISADORES .....	11
3.4. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	16
3.5. ÔNIBUS COM CÉLULA A COMBUSTÍVEL .....	18
3.5.1. EVOLUÇÃO DOS FCEBS.....	23
4. METODOLOGIA.....	24
4.1. O MÉTODO NEC PARA CÁLCULO DO VALOR DAS TARIFAS NO HORIZONTE 2030 .....	27
4.2. CUSTOS NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO: CÁLCULO DO VALOR DA TARIFA .....	28
4.2.1. CUSTOS VARIÁVEIS.....	29
4.2.1.1. COMBUSTÍVEL: .....	29
4.2.1.2. RODAGEM .....	30
4.2.1.3. PEÇAS E ACESSÓRIOS .....	30
4.2.2. CUSTOS FIXOS .....	31
4.2.2.1. DEPRECIAÇÃO E REMUNERAÇÃO (CAPITAL) .....	31
4.2.2.2. PESSOAL .....	32
4.2.2.3. ADMINISTRAÇÃO .....	33
4.2.2.4. TRIBUTOS .....	34

4.2.3.	CUSTO MENSAL A SER PAGO PELOS PASSAGEIROS .....	35
4.2.4.	VALOR DO SUBSÍDIO MENSAL .....	35
4.2.5.	DETERMINAÇÃO DA TARIFA .....	35
4.3.	ANÁLISE AMBIENTAL: EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	36
4.4.	ESTUDO DE CASO.....	37
4.5.	A MODELAGEM DOS CENÁRIOS.....	43
4.5.1.	AUTONOMIA DOS VEÍCULOS .....	43
4.5.2.	NÚMERO TOTAL DE PASSAGEIROS .....	44
4.5.3.	VALOR DO PNEU E DA REFORMA .....	44
4.5.4.	FROTA DE ÔNIBUS .....	45
4.5.5.	SALÁRIO DO MOTORISTA E DO FISCAL.....	45
4.5.6.	QUILÔMETRO PERCORRIDOS .....	47
4.5.7.	VALOR MÉDIO DO SUBSÍDIO.....	47
4.5.8.	VALOR DO COMBUSTÍVEL.....	48
4.5.9.	ANO DE REFERÊNCIA, 2021 .....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1.	CENÁRIO 1: ADOÇÃO DO DIESEL .....	52
5.1.1.	EVOLUÇÃO DA TARIFA .....	52
5.1.2.	EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	55
5.2.	CENÁRIO 2: ADOÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE .....	57
5.2.1.	VALOR DO COMBUSTÍVEL.....	57
5.2.2.	EVOLUÇÃO DA TARIFA.....	59
5.2.3.	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	61
6.	COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS.....	62
7.	CONCLUSÃO .....	66
	REFERÊNCIAS.....	69

## 1. INTRODUÇÃO

A invenção do primeiro motor movido a vapor em 1712 por Thomas Newcomen marcou o início da Revolução Industrial (SMITH, 2023), que trouxe consigo o uso generalizado do carvão mineral como combustível e teve impactos duradouros até os dias atuais. No século XX, as preocupações com o clima ganharam destaque devido à crise climática global, causada principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes da queima de combustíveis fósseis.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) das Nações Unidas é a principal autoridade científica no estudo das alterações climáticas. De acordo com o sexto ciclo de avaliação (AR6) do IPCC, lançado entre 2021 e 2023, os níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aumentaram 47,3%, atingindo uma média anual de 410 partes por milhão. O metano (CH<sub>4</sub>) chegou a 1866 partes por bilhão, representando um aumento de 157,8%. As atividades relacionadas aos combustíveis fósseis são responsáveis pela maioria das emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo com 80% de todas as emissões relacionadas à atividade humana em 2019.

Para lidar com esse desafio, é necessário reduzir significativamente as emissões de GEE e alcançar a neutralidade de carbono o mais rápido possível. Isso requer a implementação de políticas de mitigação e adaptação. As políticas de mitigação buscam conter e prevenir as emissões de GEE, envolvendo a tributação do carbono, esquemas de comércio de emissões, regulamentações setoriais específicas e incentivos fiscais para promover o uso de energias limpas e a eficiência energética.

As políticas de adaptação visam antecipar os efeitos adversos das mudanças climáticas e adotar medidas apropriadas para minimizar danos e prejuízos, como a promoção de construções resilientes, o desenvolvimento de culturas tolerantes à seca e práticas florestais sustentáveis. Nesse contexto, o hidrogênio verde produzido a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica, tem sido considerado uma solução promissora para a descarbonização da economia. Sua utilização pode reduzir as emissões de GEE em setores como transporte, indústria e geração de energia.

No setor de transporte coletivo, uma tecnologia em destaque é o ônibus elétrico a célula de combustível (FCEBs, do inglês *Fuel Cell Electric Buses*), que utiliza hidrogênio e células de combustível para gerar eletricidade e impulsionar o veículo.

Essa tecnologia oferece vantagens em relação aos veículos tradicionais de combustão interna e aos convencionais veículos elétricos a baterias, como tempos de recarga mais rápidos e autonomia de até 500 km.

No entanto, apesar do potencial do hidrogênio verde, existem desafios a serem superados para viabilizar seu uso em larga escala. Alguns desses desafios incluem o custo elevado da produção em comparação com o hidrogênio obtido de combustíveis fósseis, a necessidade de infraestrutura adequada para armazenamento, transporte e distribuição, a melhoria da eficiência da eletrólise, a garantia da segurança no manuseio do hidrogênio, a produção em grande escala e a competição com outras tecnologias renováveis.

Nesse interim, o trabalho se propôs a buscar realizar a conexão entre o avanço da transição energética a través do hidrogênio verde e a sociedade, em especial a população que utiliza o transporte coletivo público como meio de locomoção. Para isso, a comparação entre os dois tipos de combustíveis proposto, diesel e hidrogênio são necessários para embasar a tomada de decisão e apoiar a formulação de políticas públicas baseadas em evidência.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Quantificar os custos da tarifa de ônibus, assim como as emissões de GEE, no horizonte de 2030, tendo como base o ano de 2021, no caso da substituição integral da frota de ônibus atual da cidade de Fortaleza por uma nova movida a H2V.

### **2.2. Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram formulados:

- a) Levantar metodologias de cálculo de tarifa de ônibus;
- b) Identificar as rotas de tecnologia e os dados técnicos da produção de H2V que irão abastecer uma frota de transporte coletivo na cidade de Fortaleza, incluindo energia e combustível;
- c) Levantar os dados sobre o transporte público da capital do Ceará, considerando o ano base de 2021 e as projeções para os anos de 2030, e criar cenários de emissão de CO<sub>2</sub> com e sem a adoção do H2V;
- d) Modelar a nova tarifa de ônibus da cidade de Fortaleza com o uso de H2V, identificando o valor final da tarifa de ônibus e as emissões de GEE.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são um dos desafios mais urgentes e complexos enfrentados pela humanidade no século XXI. Com base em extensas pesquisas científicas, sabemos que as atividades humanas têm contribuído significativamente para o aumento da concentração de GEE na atmosfera, levando a alterações nos padrões climáticos globais.

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) fornece avaliações científicas sobre as mudanças climáticas, destacando os impactos das mudanças climáticas em diferentes regiões do mundo, incluindo alterações nos padrões de temperatura, precipitação, eventos climáticos extremos e níveis do mar.

Uma das principais causas das mudanças climáticas é o aumento da concentração de GEE na atmosfera. O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera da Terra, onde certos gases retêm parte do calor solar irradiado pela superfície do planeta, contribuindo para manter a temperatura média global em um nível adequado para a vida (IPCC, 2021). No entanto, o aumento das concentrações de GEE, devido às atividades humanas, tem intensificado esse efeito, levando ao aquecimento global e às mudanças climáticas.

As emissões de GEE, pela queima de combustíveis fósseis é a principal fonte antropogênica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) na atmosfera (IPCC, 2021). Outro fator é o desmatamento e mudanças no uso da Terra, onde contribui para aproximadamente 10% das emissões globais de gases de efeito estufa (BONAN, 2019), como também o uso de fertilizantes (NOGUEIRA et al., 2020).

As alterações climáticas decorrentes do alto nível de concentração de tais gases, resulta em impactos significativos nos sistemas socioeconômicos e ambientais, tais como o aumento da temperatura média global. Segundo a NASA, 2022, já alcançou um aumento de temperatura de aproximadamente 1°C causando o derretimento de geleiras e calotas polares, aumentando o nível do mar, podendo ocasionar perda de *habitats* de espécies (IPCC, 2021), e acidificação dos oceanos (DONEY, et. al, 2020).

Já com relação as mudanças indiretas, como o aumento da frequência e

intensidade de eventos climáticos extremos, segundo a *World Meteorological Organization* (WMO, 2021), alterações nos regimes das chuvas (STOCKER, *et al.* 2019), e mudanças nos padrões de vento (VECCHI, *et al.* 2018) podem ocorrer como consequências da concentração dos gases.

Mitigar as mudanças climáticas demanda esforços coletivos que devem abarcar a promoção da sustentabilidade, e o desenvolvimento de soluções inovadoras para lidar com seus impactos.

Dentre as tecnologias com potencial de reduzir as emissões, tem-se a expansão das energias renováveis como a energia solar e eólica (IRENA, 2021), e a transição para economia de baixo carbono a partir da descarbonização no setor de transportes por meio da eletrificação e uso de biocombustíveis (MCCOLLUM *et al.*, 2018) entre outras estratégias que não estão no escopo deste trabalho.

### **3.2. Descarbonização**

A descarbonização é um processo fundamental para limitar o aquecimento global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, em todos os setores, seja energético ou de transporte, como exemplo (MCCOLLUM *et al.*, 2018). Tal processo demanda o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de baixa ou nenhuma emissão de carbono.

Diversas tecnologias de descarbonização estão em desenvolvimento, no âmbito das energias renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica e bioenergia, pois não emitem CO<sub>2</sub> durante a geração de eletricidade (IRENA, 2021). O mesmo acontece no contexto de armazenamento de energia, por meio de baterias avançadas e sistemas de armazenamento térmico, para garantir o suprimento contínuo e confiável (LU *et al.*, 2020). Também a captura e armazenamento de carbono (CAC), permitindo a captura de emissões de CO<sub>2</sub> e posterior armazenamento subterrâneo (KEITH *et al.*, 2018). Finalmente, temos também a tecnologia do H<sub>2</sub>V, por meio da eletrólise alimentada por energia renovável (GARCÍA-ALONSO *et al.*, 2021).

### **3.3. Rotas de produção de hidrogênio**

Não existe consenso sobre a categorização dos diferentes tipos de

hidrogênio. No entanto, a maior parte da literatura usa uma classificação por cores para fazer menção aos diferentes tipos de recursos de energia que são usados na produção de H<sub>2</sub>, como apresentado a seguir:

- ✓ Hidrogênio Verde: É o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente exclusivamente de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica. Esse processo não emite GEE (CHAFFIN, et. al. 2020);
- ✓ Hidrogênio Azul: é produzido a partir do gás natural, utilizando o processo de reforma a vapor, em que o carbono liberado durante a produção é capturado e armazenado por meio de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). Essa abordagem permite a redução significativa das emissões GEE associadas à produção de hidrogênio;
- ✓ Hidrogênio Cinza: O hidrogênio cinza é produzido a partir do gás natural, utilizando o processo de reforma a vapor, porém sem a captura e armazenamento de carbono. Nesse caso, as emissões de CO<sub>2</sub> são liberadas diretamente na atmosfera;
- ✓ Hidrogênio Marrom: O hidrogênio marrom é obtido a partir do carvão, por meio do processo de gaseificação. Esse método é altamente poluente e resulta em grandes emissões de CO<sub>2</sub>, tornando-o a opção mais poluente de todas as classificações.

Este trabalho irá focar-se sobre o hidrogênio verde, considerando que o mesmo tem sido apresentado como uma solução promissora para a descarbonização da economia (GARCÍA-ALONSO *et al.*, 2021).

No entanto, há obstáculos a serem superados para tornar a produção de hidrogênio verde economicamente viável, uma vez que, atualmente, apresenta custos relativamente elevados em comparação com outras formas de obtenção (ECOINVENT, 2019).

Para viabilizar a transição energética para o hidrogênio verde, é necessário avançar tecnologicamente na produção, utilização, transporte e armazenamento do H<sub>2</sub> (LU et al., 2020). Além disso, é essencial estabelecer marcos regulatórios apropriados nos países produtores e consumidores, bem como adotar políticas e estratégias econômicas que incentivem e facilitem o desenvolvimento de novas

cadeias de produção baseadas nessa fonte de energia limpa (IEA, 2021).

Essa transformação representará uma grande oportunidade para regiões com alto potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como é o caso do Nordeste brasileiro (EPE, 2020).

A utilização do hidrogênio como fonte de energia tem sido objeto de discussão há décadas, porém foi somente a partir dos anos 2000 que a tecnologia do hidrogênio verde - produzido a partir de fontes renováveis de energia - recebendo maior atenção e investimentos em escala global.

Em 2002, o presidente dos Estados Unidos, George W. Bush, anunciou o programa *Hydrogen Fuel Initiative*, com o intuito de direcionar um investimento de aproximadamente US\$ 1,7 bilhão em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio (DEPARTMENT OF ENERGY, 2003). Nesse mesmo período, a União Europeia também lançou a Iniciativa Europeia do Hidrogênio, com o objetivo de impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio e promover sua aplicação em diversos setores (EUROPEAN COMMISSION, 2003).

Nos últimos anos, vários países começaram a desenvolver a produção de hidrogênio verde, sendo a Alemanha um dos principais destaques nesse cenário. A Alemanha se tornou líder mundial na produção de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Em 2010, o país lançou o Programa Nacional do Hidrogênio e das Células a Combustível, com o intuito de incentivar o uso desse elemento em diversos setores e impulsionar o desenvolvimento de tecnologias relacionadas (TARHAN *et al.*, 2020).

A importância do hidrogênio verde como solução para a redução das emissões de gases do efeito estufa e o combate às mudanças climáticas foi enfatizada durante a COP21, realizada em Paris em 2015. Na ocasião, mais de 20 países se comprometeram a investir em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde (UNITED NATIONS, 2015).

Em 2018, a União Europeia lançou a Estratégia do Hidrogênio, com a meta de se tornar líder mundial na produção de hidrogênio verde até 2030. A estratégia envolve um investimento significativo de cerca de € 470 bilhões em toda a cadeia de valor do hidrogênio verde, abrangendo desde a produção, até o uso em diferentes setores, como transporte, indústria e geração de energia (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

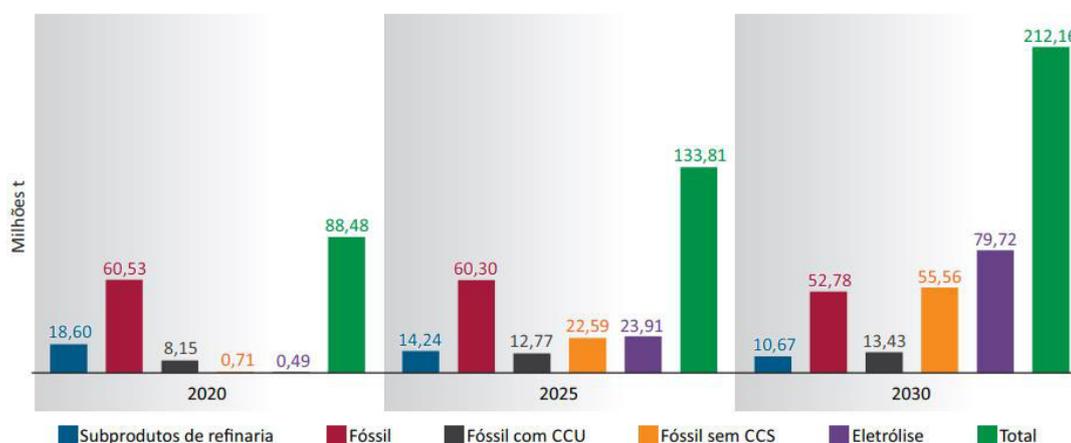
Outro país que vem direcionando esforços para a utilização do hidrogênio como fonte de energia limpa é o Japão. Em 2018, o país lançou sua Estratégia do Hidrogênio, com o objetivo de se tornar líder mundial na utilização desse elemento e promover sua exportação para outras nações (METI, 2018).

Em 2020, durante a COP26, a União Europeia lançou a Aliança do Hidrogênio Verde, uma iniciativa que busca reunir países e empresas com o propósito de acelerar a produção e utilização de hidrogênio verde em âmbito global. Essa iniciativa prevê investimentos de aproximadamente € 80 bilhões até 2030, além da criação de uma rede de produção e distribuição de hidrogênio verde em toda a Europa (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

Conforme informações da IEA (2021), a demanda de hidrogênio em 2020 foi de aproximadamente 90 milhões de toneladas (Mt), sendo mais de 70 Mt utilizados como hidrogênio puro e menos de 20 Mt misturados com gases contendo carbono para produção de metanol e fabricação de aço. Essa demanda, quase que exclusivamente, estava direcionada para fins de refino e usos industriais.

Em contraste, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise ainda está em estágio inicial, atingindo apenas 0,49 Mt em 2020, o que representa menos de 1% do total de hidrogênio produzido, como aponta IEA (2021). No entanto, espera-se que essa realidade se transforme nos próximos anos, com previsões indicando que a produção de hidrogênio através da eletrólise se torne líder até 2030 (Figura 1).

Figura 1: Demanda global de hidrogênio por tecnologia de produção, 2020-2030.



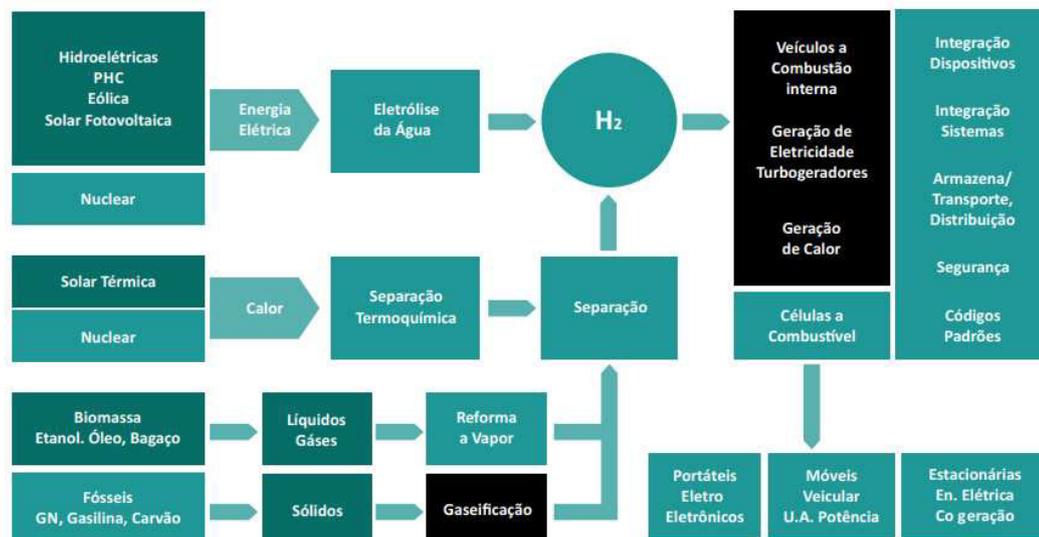
Fonte: Adaptado de IEA (2021).

Notas: CCS = captura e armazenamento de carbono. CCU = captura e uso de carbono. O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com CCU se refere à produção de amônia na qual o CO<sub>2</sub> capturado é usado para produzir fertilizante de ureia. Quando o fertilizante de ureia é aplicado ao solo, ele se decompõe novamente em amônia e CO<sub>2</sub>, sendo este último liberado na atmosfera.

### 3.3.1. Hidrogênio Verde: eletrólise por via de energias renováveis

A utilização do gás hidrogênio como um portador energético, gerado a partir de matérias orgânicas e combustíveis biológicos (como o álcool), ou por meio da energia elétrica obtida de fontes renováveis, convertendo eletricidade em energia móvel e armazenável, é considerada como uma das maneiras mais eficazes e ecologicamente atrativas, especialmente quando combinada com o emprego de células a combustível para transformar o hidrogênio em energia elétrica. Essa propriedade do hidrogênio, que é sua capacidade de ser produzido através de vários insumos e processos, posiciona-o como um elemento de integração entre diversas tecnologias, como pode ser visualizado na Figura 2 (CGEE, 2010).

Figura 2: Diferentes caminhos para a geração e emprego do hidrogênio como portador de energia

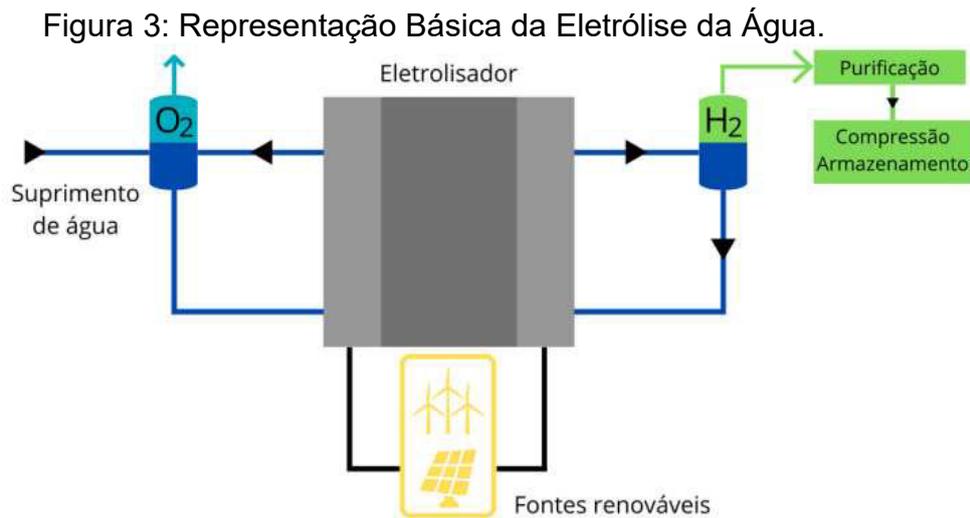


Fonte: CENEH, citado por CGEE (2010).

A eletrólise da água é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria química e em processos industriais para a produção de hidrogênio (MIRANDA, 2019). No entanto, é importante destacar que a produção de H<sub>2</sub> ainda é predominantemente realizada por meio da reforma a vapor do metano, devido a fatores como o custo da eletricidade e a proporção de eletrolisadores, o que ainda não a torna competitiva.

O processo de eletrólise é caracterizado como uma reação química desencadeada por uma fonte de energia externa ao sistema reacional (NETO; MOREIRA, 2007). Sendo assim, é um processo que possibilita a produção de

hidrogênio e oxigênio gasoso, que é obtido através da molécula de água que, com a ação da eletricidade, transforma-se em um cátion e um ânion em seus estados elementares, conforme mostrado na Equação 1 e na Figura 4. Ou seja, durante a eletrólise da água (Figura 3), a molécula de água é decomposta em hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica (PALHARES *et al.*, 2016).



Fonte: Adaptado de IRENA (2020b).

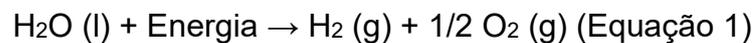
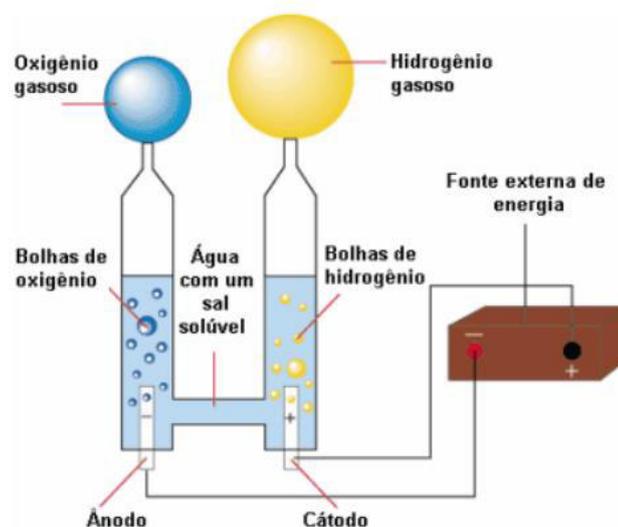


Figura 4: Processo de eletrólise da água.



Fonte: Longo et al. (2008).

As semirreações de redução e oxidação que ocorrem no cátodo e no ânodo, respectivamente, dependem dos eletrólitos presentes na solução aquosa. Isso

divide a eletrólise da água em diferentes tipos, como a eletrólise alcalina, a eletrólise de membrana de troca de prótons e a eletrólise de óxido sólido (SOUZA, 2020), e que serão apresentadas a seguir.

### 3.3.2. Tipos de Eletrolisadores

A produção de hidrogênio por eletrólise da água ocorre nos chamados eletrolisadores, que podem ser de três tipos: alcalinos, PEM (*Proton Exchange Membrane*) e SOE (*Solid Oxide Electrolysers*) (GAMBETTA, 2010; URSÚA et al., 2012).

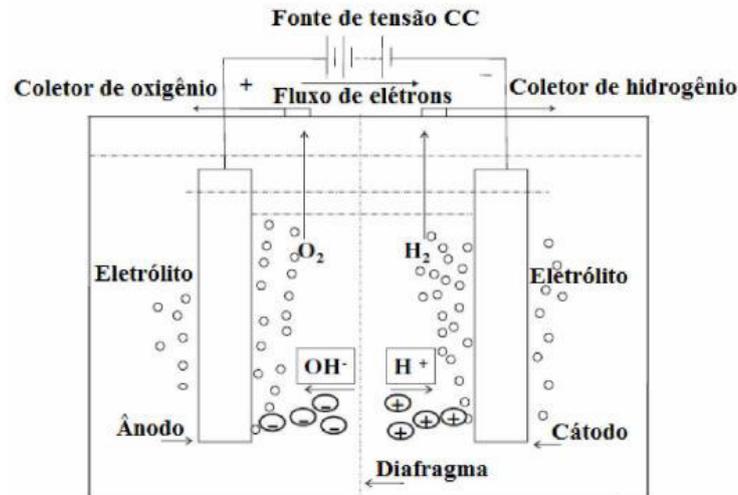
#### a) Eletrolisadores Alcalinos

De acordo com Gambetta (2010) e Ursúa et al. (2012), os eletrolisadores alcalinos são caracterizados pelo uso de uma solução alcalina, geralmente hidróxido de potássio (KOH), como eletrólito. Esses eletrolisadores operam em temperaturas que variam de 65 a 100 °C, com pressões tipicamente em torno de 25-30 bar, embora existam modelos que operem em pressão atmosférica ou até 448 bar.

A densidade de corrente dos eletrolisadores alcalinos industriais varia entre 1000 e 3000 A/m<sup>2</sup>. No entanto, é importante ressaltar que os sobre-potenciais e as perdas ôhmicas aumentam à medida que a densidade de corrente aumenta, o que resulta em uma redução da eficiência da eletrólise devido à conversão de energia elétrica em calor (ZENG; ZHANG, 2010).

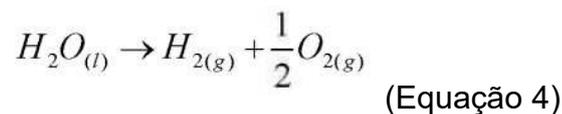
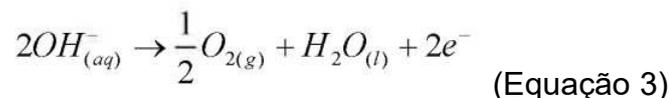
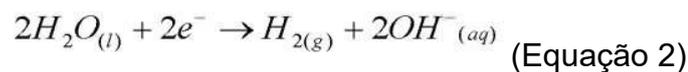
No processo de eletrólise alcalina, os íons ganham ou perdem elétrons na superfície dos eletrodos, resultando em um sistema multifásico gás-sólido-líquido (URSÚA et al., 2012). Os elétrons fluem do terminal negativo da fonte de energia externa para o cátodo, onde são consumidos pelos íons de hidrogênio (prótons) para a formação do gás hidrogênio. Para manter a carga elétrica equilibrada, os íons hidróxido (ânions) deixam o ânodo, liberando os elétrons que retornam para o terminal positivo da fonte de energia externa, resultando na formação do gás oxigênio (ZENG; ZHANG, 2010) (Figura 5).

Figura 5: Desenho esquemático de um sistema básico de eletrólise alcalina da água.



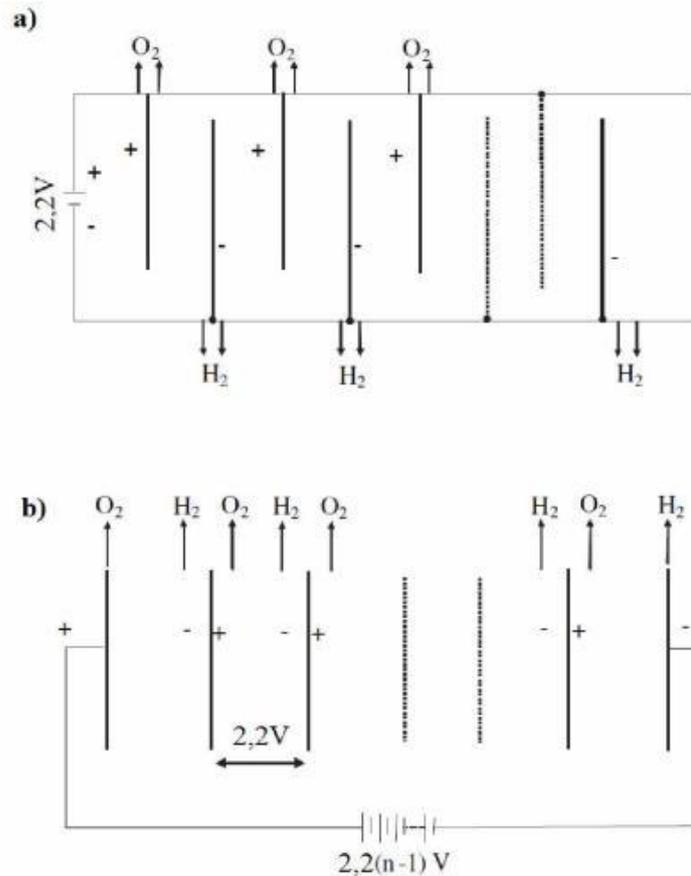
Fonte: ZENG E ZHANG (2010).

De acordo com Gambetta (2010), as semirreações envolvidas na eletrólise alcalina podem ser descritas por duas equações, Equação 2 e Equação 3, enquanto a reação global é representada pela Equação 4. Na primeira semirreação, ocorre a formação de gás hidrogênio ( $H_2$ ) e íons hidroxila ( $OH^-$ ) a partir da redução de água ( $H_2O$ ). Na segunda semirreação os íons hidroxila sofrem oxidação, resultando na formação de gás oxigênio ( $O_2$ ) e água ( $H_2O$ ). A reação global mostra a separação da molécula de água em gás hidrogênio e gás oxigênio.



Os eletrolisadores alcalinos podem ser classificados em dois tipos: unipolares e bipolares, conforme ilustrado na Figura 6. Ambos são compostos por células individuais dispostas em sobreposição, com conexão em paralelo nos eletrolisadores unipolares e em série nos eletrolisadores bipolares (GAMBETTA, 2010).

Figura 6: Desenho esquemático dos eletrolisadores, a) unipolar e b) bipolar.



Fonte: ZENG E ZHANG (2010).

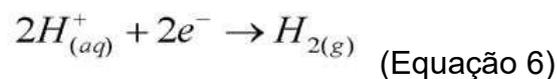
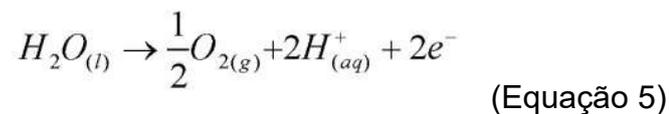
Nos eletrolisadores unipolares, cada semirreação ocorre em eletrodos separados, enquanto nos eletrolisadores bipolares, as duas semirreações ocorrem em ambos os lados do mesmo eletrodo, exceto nos dois eletrodos finais conectados à fonte de corrente contínua. Essa diferença na disposição dos eletrodos resulta em tensões e correntes de operação distintas. Em processos industriais, os valores típicos de tensão encontrados nos eletrolisadores unipolares são 2,2 V, enquanto nos eletrolisadores bipolares, a tensão é de  $2,2 \times (n-1)$  V, onde  $n$  é o número de eletrodos.

Os eletrolisadores unipolares são mais simples de fabricar, mas requerem altas correntes e baixas tensões, o que leva a uma maior perda ôhmica. Por outro lado, nos eletrolisadores bipolares, a perda ôhmica é menor, mas sua fabricação exige maior precisão para evitar vazamentos de gás e eletrólito entre as células (ZENG; ZHANG, 2010).

## b) Eletrolisadores PEM

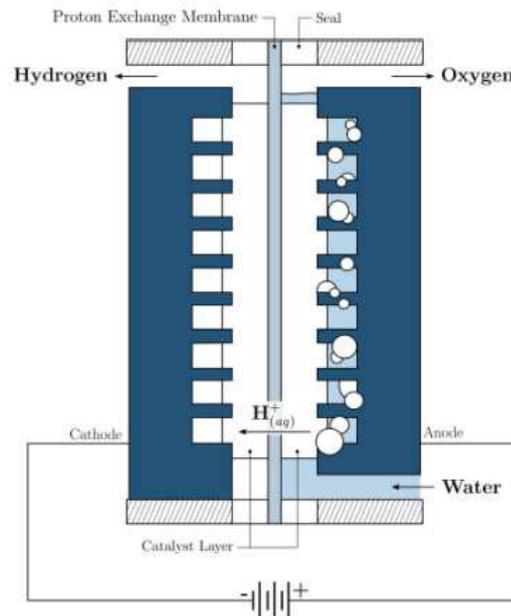
Os eletrolisadores de membrana polimérica, conhecidos como PEM (*Proton Exchange Membrane*) ou SPE (*Solid Polymer Electrolyte*), possuem como característica principal a utilização de um eletrólito sólido. Esse eletrólito consiste em uma fina membrana polimérica, com espessura inferior a 0,2 mm, que é impermeável a gases e possui um caráter ácido forte devido à presença de grupos ácido sulfônico ( $\text{HSO}^3$ ).

Esses grupos são responsáveis pela condução dos íons  $\text{H}^+$  através de um mecanismo de troca iônica. A membrana mais comumente utilizada é o Nafion, um polímero sulfonado similar ao politetrafluoretileno (Teflon), e os eletrodos são geralmente fabricados com metais nobres como platina e irídio (GAMBETTA, 2010; URSÚA *et al.*, 2012). As semirreações no ânodo e no cátodo são descritas por duas equações, Equação 5 e Equação 6.



Em comparação com os eletrolisadores alcalinos, os eletrolisadores PEM oferecem vantagens significativas, como maior eficiência energética, maiores taxas de produção e tamanho compacto. No entanto, eles também têm custos de investimento mais elevados, principalmente devido aos materiais necessários para a fabricação da membrana e dos eletrodos. Além disso, os eletrolisadores PEM tendem a ter uma vida útil mais curta em comparação com os alcalinos (URSÚA *et al.*, 2012; ZENG; ZHANG, 2010). Na Figura 7 tem-se uma ilustração do funcionamento.

Figura 7: Funcionamento de um eletrolisador do tipo PEM.

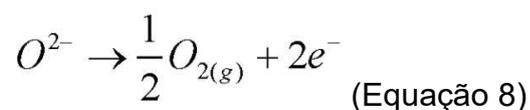
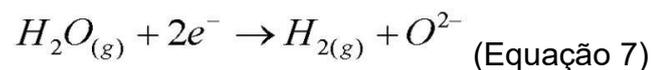


Fonte: Vidas; Castro, 2021.

### c) Eletrolisadores SOE

Os eletrolisadores SOE (*Solid Oxide Electrolyzers*) realizam a eletrólise do vapor de água em temperaturas elevadas, geralmente variando de 600 a 900°C. Isso resulta em uma eficiência maior quando comparado aos eletrolisadores alcalinos e PEM. A operação desses eletrolisadores pode ser entendida como o oposto de uma célula a combustível de óxido sólido (URSÚA *et al.*, 2012; ZENG; ZHANG, 2010).

No processo, o vapor de água é alimentado no cátodo, onde ocorre a produção de gás hidrogênio. Os íons de óxido gerados atravessam o eletrólito sólido até o ânodo, onde são formados o gás oxigênio, liberando os elétrons e fechando o circuito. As semirreações no cátodo e no ânodo estão descritas nas seguintes equações: Equação 7 e Equação 8.

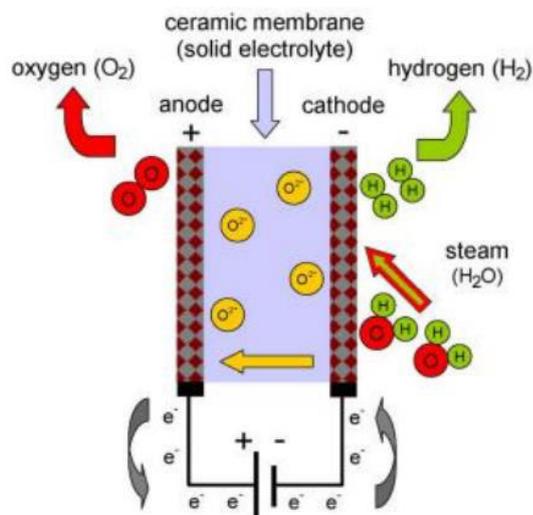


O funcionamento dos eletrolisadores SOE em altas temperaturas traz

benefícios, como a redução das tensões na célula e o aumento das taxas das reações eletroquímicas. No entanto, esses eletrolisadores enfrentam desafios de estabilidade a longo prazo devido ao envelhecimento do eletrólito e à desativação do eletrodo (URSÚA *et al.*, 2012).

No que diz respeito à eficiência, os eletrolisadores alcalinos apresentam eficiências na faixa de 59% a 70%, enquanto os eletrolisadores PEM têm eficiências entre 65% e 82%, calculadas com base no poder calorífico superior do hidrogênio. Já os eletrolisadores SOE possuem eficiências que variam de 40% a 60%. No entanto, é importante ressaltar que, no caso dos eletrolisadores SOE, a eficiência líquida é calculada considerando as perdas térmicas no processo (ZENG; ZHANG, 2010). Na Figura 8 tem-se o esquema de funcionamento de um eletrolisador SOE.

Figura 8: Esquema de funcionamento de um eletrolisador SOE.



Fonte: URSÚA *et al.*, 2012.

### 3.4. Células a combustível

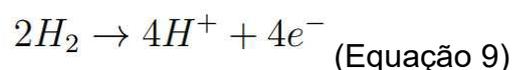
O princípio fundamental das células a combustível é a reação de oxidação do hidrogênio pelo oxigênio na presença de um catalisador. Esse processo converte a energia química da reação, em energia elétrica, por meio de um dispositivo altamente eficiente e de baixo impacto ambiental (SANTOS, 2018). Isso resulta em uma eficiência que pode chegar a até 83% (SANTOS, 2018), superando o limite imposto pelo ciclo de Carnot, mesmo em temperaturas baixas, como 80°C (NETO, 2005).

O grande marco para as células a combustível ocorreu em 1960, quando a

NASA anunciou, por meio de seu programa espacial, que o hidrogênio seria estudado como combustível para foguetes e que as células a combustível seriam usadas nas missões do programa Apollo (SILVA, 2017). A partir desse momento, diversas pesquisas foram conduzidas para identificar os melhores combustíveis, eletrodos e componentes para esse dispositivo. O.K. Davtyan, em seus estudos sobre células a combustível, descobriu que, em condições de temperatura ambiente e em solução alcalina, as células necessitam de hidrogênio e oxigênio de alta pureza (SILVA, 2017).

Individualmente, as células a combustível podem ser aplicadas em veículos elétricos, processos de geração e cogeração de energia, aplicações militares, espaciais e até hospitalares. Para obter tensões mais altas, elas são conectadas em série por meio de empilhamentos (VARGAS *et al.*, 2006). Essa configuração em série permite aumentar a tensão de saída e adequar a célula a combustível para diferentes demandas e aplicações específicas. Uma célula a combustível é constituída por 3 partes principais: catalisador, eletrólito e eletrodos.

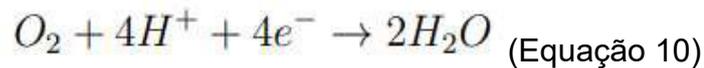
No processo de uma célula a combustível, o gás hidrogênio é pressurizado e direcionado para o eletrodo onde se encontra o catalisador. Dentro do catalisador, ocorre a separação dos íons de hidrogênio dos elétrons. Os elétrons são conduzidos pelo circuito externo, criando um fluxo de elétrons, ou seja, uma corrente elétrica no sentido positivo da célula (NETO, 2005). A reação química que ocorre nesse processo é representada pela Equação 9.



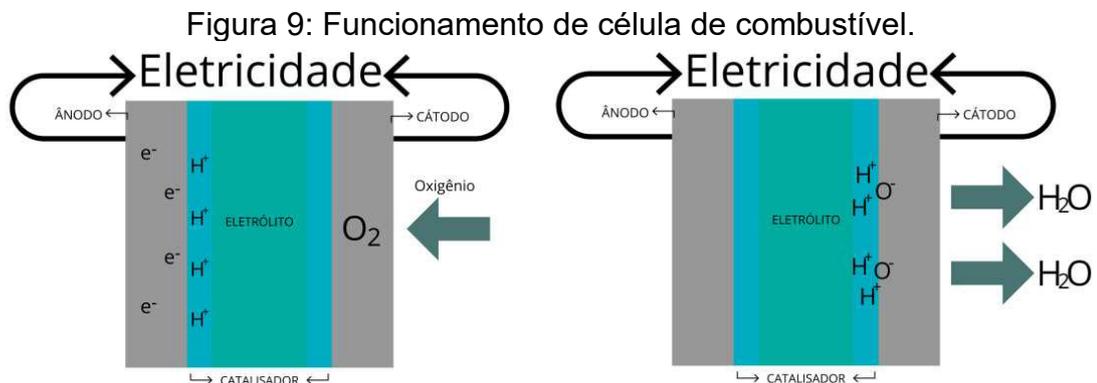
Durante a quebra das moléculas de hidrogênio pelos catalisadores, é possível que algumas moléculas não sejam totalmente decompostas. Essas moléculas não conseguem passar pelo eletrólito, mas podem ser recuperadas e reintroduzidas na célula para participar novamente do processo (NETO, 2005). Isso permite um aproveitamento mais eficiente do hidrogênio e contribui para a melhoria do desempenho da célula a combustível.

No funcionamento da célula a combustível, o oxigênio ou ar é direcionado para o terminal positivo e dispersa-se dentro do catalisador. Nesse processo, a molécula de oxigênio é separada em dois átomos, que atraem os íons de hidrogênio provenientes do eletrólito. Os íons de hidrogênio combinam-se com os átomos de

oxigênio para formar moléculas de água, conforme descrito na Equação 10. Durante essa reação, é liberada uma certa quantidade de calor, conhecida como vapor de água, que é um dos produtos resultantes do funcionamento da célula a combustível quando os gases  $H_2$  e  $O_2$  possuem um alto grau de pureza (VARGAS *et al.*, 2006).



É importante ressaltar que, teoricamente, combustíveis com alto teor de hidrocarbonetos não pode ser utilizados diretamente nas células a combustível sem a utilização de tecnologias de reforma. Por esse motivo, algumas pesquisas buscam explorar o uso direto de etanol ou metanol nas células a combustível, juntamente com o hidrogênio (MIRANDA, 2019). Na Figura 9 mostra o esquema de funcionamento de célula de combustível.



Fonte: Adaptado de Neto (2005).

No entanto, o uso de outros combustíveis além do hidrogênio pode acarretar um aumento nos custos dos catalisadores e da manutenção do dispositivo.

### 3.5. Ônibus com célula a combustível

Os primeiros veículos movidos a combustível, empregando células a combustível, datados da década de 1960. Os veículos baseados em células a combustível, ou FCVs (sigla em inglês para veículos com célula de combustível), geralmente apresentam uma arquitetura semelhante à de um veículo híbrido em série. Nessa configuração, a energia gerada pelo empilhamento (um conjunto de células de

combustível interconectadas em série para alcançar uma determinada tensão) de células de combustível é utilizada para alimentação do motor elétrico, enquanto uma parte é armazenada em um banco de baterias.

Existem duas distinções fundamentais entre uma célula de combustível e uma bateria: a bateria atua como um dispositivo de armazenamento de energia, enquanto a célula de combustível é um gerador que combina oxigênio e hidrogênio para produzir eletricidade. Enquanto as baterias são recarregáveis e independentes, as células de combustível (ou empilhamentos delas) são sistemas complexos que englobam o empilhamento propriamente dito aqui, trocadores de calor, compressores, entre outros. O desempenho inicial de um veículo alimentado por um empilhamento de células a combustível pode ser inferior ao de um veículo convencional, devido às dinâmicas associadas aos processos eletroquímicos e termodinâmicos envolvidos na geração de energia. Por esse motivo, é imperativo associar o empilhamento de células a combustível um elemento armazenador de energia que auxilia na aceleração. Este sistema deve ser dimensionado para fornecer os picos de potência necessários durante a tração do veículo e garantir a capacidade de resposta às diferentes demandas de regimes de uso (ciclos de acionamento).

Os motores elétricos usados nos FCVs são os mesmos usados em veículos híbridos ou elétricos. Atualmente, o motor sincronizado de motores permanentes é amplamente utilizado devido à sua alta densidade de potência, proporcionando uma vantagem significativa em termos de peso e espaço ocupado. No entanto, com o aumento dos custos dos materiais magnéticos usados em sua composição, há uma atenção crescente aos motores de indução, amplamente empregados na indústria, e aos motores de relutância.

Outra área de estudo dos veículos elétricos concentra-se na configuração dos conversores de potência utilizados para acionar o motor elétrico e alimentar as diversas cargas auxiliares. A escolha adequada do tipo de conversor nestes veículos melhora o desempenho, a eficiência de combustível e reduz o peso e o tamanho do veículo. As topologias de conversores aplicadas a veículos com células a combustível devem ser capazes de acoplar e gerenciar diversas fontes de energia de maneira eficiente.

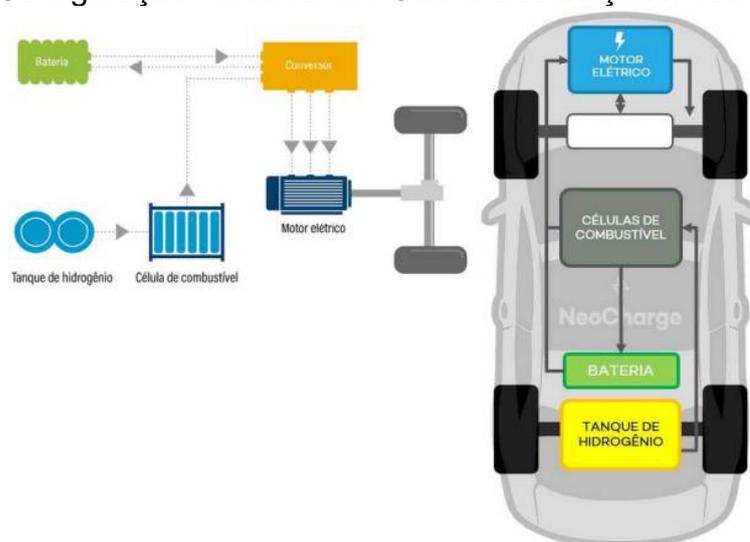
Um veículo elétrico a célula a combustível é um automóvel que utiliza células de combustível de hidrogênio como fonte de energia para movimentar o motor. As células de combustível geram energia elétrica por meio de reação eletroquímica,

não por combustão. Nela, hidrogênio e oxigênio são combinados para gerar eletricidade, calor e água. (MIRANDA, 2019).

Os ônibus com Célula de Combustível não emitem gases poluentes durante o processo de geração de energia. Existem diferentes tipos de células de combustível, a célula de combustível de membrana de eletrólito polimérico (PEMFCs, sigla em inglês para *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*), também conhecida em algumas literaturas como células de combustível de próton-troca de membrana. Essas células são consideradas mais adequadas para uso na propulsão de veículos (AJANOVIC *et al.*, 2012).

Inicialmente, os FCEBs eram projetados com a célula de combustível conectada diretamente ao motor elétrico. No entanto, atualmente é utilizada uma configuração híbrida em série, em que o motor de combustão interna (ICE, sigla em inglês para *Internal Combustion Engine*) é substituído por uma célula de combustível. Essa configuração atual resulta na redução do tamanho da pilha de células de combustível, proporcionando uma diminuição em seu custo (MRCAGNEY, 2017), na Figura 10 tem-se a configuração de mecanismo FCEB e a distribuição.

Figura 10: Configuração mecanismo FCEB e distribuição mecanismo FCEB.



Fonte: NEOCHARGE, 2022.

Para o funcionamento pleno desses veículos, são necessários alguns requisitos, conforme Goulart (2019):

- i. Empilhamento: É a conexão em série das células a combustível para atingir a tensão e potência necessárias para o funcionamento do veículo.

- ii. Preparação do combustível: É importante garantir a alta pureza do hidrogênio utilizado, pois isso influencia no desempenho da célula a combustível.
- iii. Controle térmico e de água: São sistemas necessários para monitorar e controlar a temperatura do empilhamento das células e garantir o equilíbrio na geração de água pela célula e a umidade da membrana.
- iv. Equipamento de condicionamento de energia elétrica: É necessário ter um sistema para tratar a tensão de saída das células a combustível, a fim de adequá-la às necessidades do veículo.

Os veículos elétricos a célula a combustível possui uma disposição semelhante aos veículos de combustão interna, com células e outros componentes. No caso de ônibus a célula a combustível, há uma configuração diferente, em que os cilindros de hidrogênio, que desempenham o papel de tanque, são empilhados na parte superior do veículo. Essas configurações visam a otimização do espaço e a melhor integração do sistema de células a combustível nos veículos.

Os veículos a célula a combustível possuem algumas características distintas, incluindo:

- I. Exaustão limpa: Durante o funcionamento da célula a combustível, o único subproduto é o vapor de água. Isso significa que não há emissões de CO<sub>2</sub> ou outros gases poluentes durante a operação do veículo, tornando-o ambientalmente amigável.
- II. Alta eficiência: Os veículos a célula a combustível combinados com motores elétricos apresentam uma eficiência duas vezes maior em comparação aos veículos a gasolina (MIRANDA, 2019). Isso significa que eles podem gerar mais potência com menos consumo de combustível.
- III. Abastecimento rápido e silencioso: O tanque de hidrogênio de um veículo a célula a combustível pode ser abastecido em cerca de 5 minutos. Um exemplo notável é o Toyota Mirai, que estabeleceu um recorde de distância percorrida com apenas um tanque de hidrogênio, sendo abastecido em menos de 5 minutos a uma pressão de 700 bar (TOYOTA, 2021). Além disso, como esses veículos são alimentados por motores elétricos, eles são praticamente silenciosos durante a operação.

A maior parte da frota de veículos a célula a combustível está concentrada

principalmente na Coreia, Estados Unidos e China (EA, 2021). Isso reflete os incentivos e programas implementados por esses países desde o início dos anos 2000 para promover o uso do hidrogênio como combustível.

No contexto brasileiro, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 prevê que a pandemia de Covid-19 pode acelerar determinadas tendências, notadamente a adoção do trabalho remoto. Contudo, mesmo diante desse cenário, estima-se que a atividade global no transporte de passageiros aumentou para uma taxa de 3,2% ao ano entre 2019 e 2030. Esse incremento decorre da demanda contínua da sociedade por mobilidade, em consonância com o Produto Interno Bruto (PIB) per capita e redução do desemprego.

É relevante destacar que o PIB per capita está projetado para ultrapassar seu valor máximo (atingido em 2014) apenas em meados da presente década. No curto prazo, antecipa-se uma maior preferência pelo uso de automóveis após uma crise sanitária provocada pela pandemia, evitando o transporte público de massa. Contudo, a longo prazo, as análises indicam que o licenciamento de veículos não acompanhará o crescimento da demanda por mobilidade da sociedade.

Considerando um crescimento de 3,6% ao ano no sistema metro-ferroviário, observa-se que, ainda assim, esta modalidade não ganha participação de forma expressiva. A maior parcela da demanda continua sendo atendida pelo transporte rodoviário coletivo. Em termos energéticos, projeta-se um aumento na demanda de passageiros em média de 1,6% ao ano. A discrepância em relação às taxas de atividade é justificada pelo aumento da participação do transporte rodoviário coletivo e pelo crescimento do modo metro-ferroviário acima do individual. A mudança modal, resulta em uma redução na intensidade energética da matriz de transporte de passageiros. Esse movimento também é acompanhado por avanços tecnológicos, refletidos em melhorias significativas na eficiência energética dos veículos de transporte de passageiros.

O aumento da importância do modo rodoviário coletivo, comparativamente ao individual, juntamente com a implementação de corredores de ônibus e a priorização do transporte coletivo em vias preferenciais, direcionados de maneira eficaz para aprimorar a eficiência energética do sistema.

### 3.5.1. Evolução dos FCEBS

Os FCEBs possuem vantagens em relação aos ônibus elétricos com baterias (BEBs, sigla em inglês para *Battery Electric Buses*), tais como menor peso, maior vida útil, maior autonomia e tempos de abastecimento mais curtos. Essas características tornam os FCEBs mais atrativos para a implantação regional de estratégias de descarbonização, especialmente considerando os investimentos em produção de Hidrogênio Verde no Estado do Ceará.

Embora, à primeira vista, o uso de hidrogênio em transporte possa parecer complexo e sofisticado, na realidade, essa aplicação é relativamente simples e oferece várias vantagens mecânicas, além da redução de emissões de gases de efeito estufa (DELOITTE CHINA, 2020).

O ônibus a célula de combustível tem uma participação menos expressiva no mercado devido ao seu alto custo. O preço de aquisição de um ônibus célula de combustível pode ser até sete vezes maior do que o de um ônibus a diesel. Além disso, essa tecnologia requer um sistema de gerenciamento extremamente sensível ao calor e a níveis de impurezas na água e no hidrogênio.

No entanto, o ônibus célula de combustível tem o potencial de solucionar alguns dos problemas comuns encontrados nos ônibus elétricos de bateria, como autonomia limitada e tamanho volumoso das baterias (LOWRY & LARMINIE, 2012).

#### 4. METODOLOGIA

Para quantificar os custos da tarifa de ônibus, assim como as emissões de GEE, no horizonte de 2030, tendo como base o ano de 2021, no caso da substituição integral da frota de ônibus atual da cidade de Fortaleza por uma nova movida a H2V, foi realizado o levantamento de informações relativo ao setor de mobilidade urbana da cidade de Fortaleza, CE. Para tanto, o cálculo do tamanho da frota para 2030, levou, em especial, mas não única consideração, os dados sobre a série histórica de 2012 até 2021. A partir desses dados, foi calculada a demanda de hidrogênio e de diesel necessária para o abastecimento da frota de 2030, levando em consideração as projeções de tamanho da frota, número de veículos, rodagem média diária (uniforme) e consumo médio por quilômetro.

A partir da base de dados estabelecida para essa pesquisa, e que será apresentada em mais detalhe nas próximas seções, dados obtidos, foram calculadas novas tarifas de valor do transporte até 2030 para os ônibus movidos a diesel versus ônibus movido a hidrogênio, usando o método NEC.

Metodologia desenvolvida pelo Núcleo de Estudos das Cidades (NEC), coordenado pelo professor colaborador Antônio Clovis Pinto Ferraz (Coca), do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP, para o cálculo do valor unitário da tarifa de transporte público. Adaptou-se o método NEC para levar em consideração o uso exclusivo de hidrogênio como combustível da frota de ônibus de Fortaleza até o horizonte de 2030, foi realizada a projeção do valor da tarifa no transporte coletivo urbano da capital cearense.

O método NEC, em suas linhas gerais, segue os princípios dos métodos GEIPOT e ANTP, incorporando alterações no processo de cálculo de alguns custos e ajustes nos intervalos de variação de taxas, índices e coeficientes. Estas modificações são fundamentadas em resultados de análises econômico-financeiras e consultas a empresas operadoras para obter informações atualizadas sobre coeficientes, índices e taxas. O método NEC é essencialmente semelhante ao método GEIPOT, uma vez que considera praticamente as mesmas fontes gerais de custos e calcula, de maneira agregada, os itens de menor valor por meio de coeficientes ou índices. Isso contrasta com o método ANTP, que determina separadamente a maioria dos itens, inclusive os de menor valor.

Para garantir maior precisão, a definição dos valores dos coeficientes, índices e taxas deve ser realizada com base em um levantamento dos custos reais associados a cada item específico da empresa ou cidade em questão. A utilização de valores provenientes de outras empresas ou cidades, ou a adoção de valores médios dos intervalos usuais de variação mencionados nos métodos, representa uma aproximação aceitável, mas deve ser feita com a devida cautela na ausência de informações específicas.

Este método, ao integrar práticas consagradas nos métodos GEIPOT e ANTP, proporciona uma abordagem refinada para o cálculo de custos no contexto analisado. A incorporação de ajustes baseados em análises econômicas e em feedback de empresas operadoras realça a adaptabilidade do método NEC às condições específicas de cada situação. A recomendação de realizar levantamentos locais para a determinação precisa de coeficientes e taxas demonstra a ênfase na busca pela exatidão e relevância dos dados, mesmo que a utilização de valores aproximados seja permitida como uma medida temporária em situações de carência de informações específicas.

Os cenários de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foram avaliados conforme os cálculos realizados por Paiva (2021). Nesse contexto, a valorização do CO<sub>2</sub> foi imposta em 108,21 US\$/tCO<sub>2</sub>. Paiva ressalta que a quantificação dos impactos econômicos, especialmente relacionados aos desafios ambientais e de saúde decorrentes da emissão de gases poluentes na atmosfera, é convencionalmente vinculada à valorização de cada gás. É incumbência do Poder Público suportar os custos resultantes dessas emissões.

No primeiro cenário, o único combustível utilizado para abastecer o transporte público coletivo de Fortaleza foi o óleo diesel (refino do petróleo), que é o que abastece o setor atualmente, enquanto no segundo cenário, o hidrogênio foi incorporado à matriz de combustível do transporte público coletivo de Fortaleza para o período de 2023 a 2030.

Para ambos os cenários, foram adotados os seguintes dados e indicadores para parametrizar os estudos a nível de comparação, são eles: número total de passageiros, valor do pneu, valor da reforma, número da frota de ônibus, salário do motorista, salário do fiscal, quantidade média de quilômetros percorridos pela frota e valor médio de subsídio.

Na Tabela 1, verificam-se as taxas adotadas para estimar os valores

propostos para o cálculo da tarifa do transporte público e a fonte bibliográfica respectiva de cada taxa assumida. Já a Tabela 2, apresenta as variáveis que não se alteram ao longo do período nem conforme a fonte de combustível.

Tabela 1: Valores adotados para as projeções

<b>Variáveis</b>	<b>Taxa de crescimento a.a adotada</b>	<b>Referência</b>
Frota de ônibus	1,60%	EPE, PDE 2030
Passageiros	3,20%	EPE, PDE 2030
Valor do Pneu	0,68%	IBGE - IPCA
Valor da reforma do pneu	0,68%	IBGE - IPCA
Salário dos motoristas	3,62%	Ministério da Economia
Salários do fiscal	3,62%	Ministério da Economia
Quilômetros percorridos	1,60%	EPE, PDE 2030
Subsídio	0,56%	IBGE - IPCA Transportes

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2: Variáveis fixas

<b>Abreviações</b>	<b>Descritivo</b>	<b>Taxas e fatores</b>	<b>Unidades</b>
FLU	FATOR LUBRIFICANTES	0,04	Adimensional
NRE	NÚMERO DE REFORMAS	2	reformas/pneu
NPN	NÚMERO DE PNEUS	6	pneus/ônibus
DPN	DURAÇÃO TOTAL DE PNEUS	85.000	Km/pneu
FPA	FATOR PEÇAS E ACESSÓRIOS	0,05	(0 a 2 anos)
VON	VALOR DO ÔNIBUS NOVO	342.171,00	R\$/ônibus
TDO	TIPO DE ÔNIBUS	4	Ônibus tipo Padron
IO	IDADE DO ÔNIBUS	0	anos
TRE	TAXA DE REMUNERAÇÃO	8	% ao ano
IMO	ÍNDICE DE MOTORISTAS POR ÔNIBUS EM OPERAÇÃO NO PICO	1,8	motoristas/ônibus
ICO	ÍNDICE DE COBRADORES POR ÔNIBUS EM OPERAÇÃO NO PICO	0	cobradores/ônibus
IFD	ÍNDICE DE FISCAIS/DESPACHANTES POR ÔNIBUS EM OPERAÇÃO NO PICO	0,1	fiscais/ônibus
ESO	ENCARGOS SOCIAIS	38	%
FMA	FATOR PESSOAL DE MANUTENÇÃO	0,15	Adimensional
FAD	FATOR PESSOAL DE ADMINISTRAÇÃO	0,2	Adimensional

FDA	FATOR DESPESAS ADMINISTRATIVAS	0,006	Adimensional
TTR	TAXA DE TRIBUTOS	7	%
PPI	% DE PASSAGEIROS QUE PAGAM A TARIFA INTEGRAL	87,53	%
PPA	% DE PASSAGEIROS QUE PAGAM 100% DA TARIFA	7,03	%
PPB	% DE PASSAGEIROS QUE PAGAM 50% DA TARIFA	6,71	%

Fonte: Valores de referência da planilha NEC e ETUFOR, 2021.

#### 4.1. O método NEC para cálculo do valor das tarifas no horizonte 2030

O modelo Urbino 12 *Hydrogen* (Figura 11), fabricado pela Solaris, será o veículo escolhido para a substituição completa da frota de ônibus movidos a diesel até o ano de 2030. Esse modelo é um ônibus de célula de combustível a hidrogênio (FCEB), que utilizará essa tecnologia como fonte de energia.

Figura 11: Modelo Urbino 12 *Hydrogen*.



Fonte: Solaris, 2018.

De acordo com informações fornecidas pelo fabricante, o veículo em questão tem capacidade para até 82 passageiros e é equipado com um motor elétrico integrado próximo às rodas, com potência máxima de 250 kW. Esse motor é alimentado por uma Célula a Combustível do tipo PEMEC, juntamente com um conjunto de baterias de íons de lítio, ambos com capacidade de 70 kW. Além disso, o

veículo possui um tanque de armazenamento de hidrogênio com capacidade total de 37,5 kg, operando a uma pressão de 350 bar, o que permite uma autonomia de até 340 km sem a necessidade de reabastecimento de hidrogênio.

Seguindo as informações apresentadas por Miranda (2018), o custo unitário de produção de um único ônibus de célula de combustível a hidrogênio (FCEB) no Brasil é de R\$ 2 milhões (equivalente a US\$ 350.877,72), enquanto o valor para um ônibus convencional é de R\$ 500 mil (equivalente a US\$ 87.719,30). Assim, o custo total para aquisição dos FCEBs é calculado multiplicando a frota projetada pelo valor unitário de aquisição do veículo.

A demanda diária de hidrogênio, em kg/dia, é determinada pela Equação 11, na qual  $N_v$  representa o número de veículos na frota ativa,  $C_m$  é o consumo médio típico de um FCEB com carroceria tipo padrão, levando em consideração um acréscimo de 2 kg de hidrogênio a cada 100 km percorridos devido às necessidades de climatização em Fortaleza. Em outras palavras, é considerado um consumo de 0,11 kg/km. Já  $D_d$  representa a distância média percorrida por dia por cada veículo, conforme apresentado por Pereira (2022).

$$D_{H_2} = (N_v \cdot C_m \cdot D_d) \text{ (Equação 11)}$$

#### **4.2. Custos no transporte coletivo urbano: cálculo do valor da tarifa**

A tarifa é o valor cobrado dos usuários pelo serviço de transporte, porém, nos sistemas de transporte coletivo urbano, nem sempre reflete o custo real do serviço. É comum que, visando beneficiar as camadas de menor renda e incentivar o uso do transporte coletivo, o valor da tarifa seja fixado abaixo do custo unitário, com parte do custo real sendo subsidiado pelo poder público (FERRAZ, 2022).

No contexto do transporte público urbano por ônibus, a tarifa é estabelecida como um preço público que tem como objetivo remunerar o ente público e/ou privado, cobrindo investimentos, lucro do serviço prestado, custos com mão de obra, insumos, peças e depreciação do capital investido em veículos e instalações (LIMA, 1992; BAROUCHE, 2015). A tarifa, portanto, é a principal fonte de receita para as empresas de ônibus e deve ser capaz de garantir o equilíbrio econômico-financeiro. Para isso, o valor da tarifa deve cobrir os custos de operação do serviço de transporte público e

também refletir a capacidade de contribuição dos usuários (VERRONI, 2006).

O custo unitário do serviço de transporte coletivo é calculado dividindo o custo total entre os passageiros que utilizam o sistema de transporte público. O custo total é composto pela soma dos custos fixos e variáveis (FERRAZ, 2022). Os custos fixos são aqueles necessários para a prestação do serviço, independentemente da quantidade de serviço realizado, incluindo o acompanhamento da frota e o pessoal envolvido. Por outro lado, os custos variáveis estão diretamente relacionados à quantidade de viagens realizadas no serviço, como a quilometragem percorrida. A Equação 12 apresenta matematicamente a composição dos custos.

$$CT = CV + CF \quad (\text{Equação 12})$$

Onde: CT é o custo total médio mensal do sistema; CV é o custo variável médio mensal do sistema; CF é o custo fixo médio mensal do sistema.

#### **4.2.1. Custos variáveis**

Custos variáveis são aqueles que variam com a quantidade de transporte realizada (quilometragem percorrida). Os principais custos variáveis adotados foram: combustível, rodagem e peças e acessórios.

##### **4.2.1.1. Combustível:**

No estudo de caso, foi adotado o uso de hidrogênio proveniente da eletrólise da água através de fontes renováveis, conhecido como hidrogênio verde. Ao adaptar o método NEC para considerar o uso de hidrogênio, o gasto médio mensal com combustível é determinado pela Equação 13.

$$COM = CON \times PCO \times QME \quad (\text{Equação 13})$$

Onde: COM: custo médio mensal com combustível (R\$/mês), CON: consumo unitário de combustível (Kg/km), PCO: preço do quilo de combustível (R\$/kg) e QME: quilometragem média mensal percorrida pela frota (km/mês).

#### 4.2.1.2. Rodagem

O gasto médio mensal com rodagem é dado pela Equação 14.

$$\text{ROD} = \left[ \frac{(\text{PPN} + \text{PRE} \times \text{NRE}) \times \text{NPN}}{\text{DPN}} \right] \times \text{QME} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde: PPN é o preço do pneu novo em reais por pneu; NPN é o número de pneus por ônibus; PRE é o preço da reforma do pneu em reais por reforma; NRE é o número de reformas por pneu; DPN é a duração total dos pneus em quilômetros por pneu; QME é a quilometragem média mensal percorrida pela frota em quilômetros por mês.

No caso do ônibus adotado como padrão, que possui 8 pneus do tipo 295/80 R22,5, os valores correspondentes a PPN, NPN, PRE, NRE e DPN devem ser inseridos na fórmula para calcular o custo mensal com rodagem.

#### 4.2.1.3. Peças e acessórios

O gasto mensal com peças e acessórios é calculado pela Equação 15.

$$\text{PEA} = \frac{\text{FPA}}{100.000} \times \text{VON} \times \text{QME} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde: FPA é o fator peças e acessórios, que representa a fração do valor do ônibus novo gasto com peças e acessórios a cada 100.000 quilômetros percorridos. No caso adotado, o FPA é de 0,05; VON é o valor do ônibus novo em reais por ônibus; QME é a quilometragem mensal percorrida pela frota em quilômetros por mês.

Ao multiplicar o fator FPA pelo valor do ônibus novo e pela proporção da quilometragem mensal em relação a 100.000 quilômetros, obtemos o custo mensal com peças e acessórios. Essa fórmula considera que a frota é completamente nova, o que implica em um maior gasto com peças e acessórios nos primeiros meses de operação.

## 4.2.2. Custos fixos

Custos fixos são aqueles que praticamente independem da quilometragem percorrida, estando mais associados ao tempo. Os principais custos fixos adotados foram: capital (depreciação e remuneração), pessoal (salários e encargos), administração e tributos.

### 4.2.2.1. Depreciação e remuneração (capital)

A depreciação se refere à diminuição do valor dos veículos, instalações, máquinas e equipamentos devido ao desgaste natural causado pelo uso e pelas condições climáticas, além da obsolescência tecnológica. Já a remuneração é o valor que compensa o retorno do capital investido em veículos, instalações, máquinas e equipamentos, levando em consideração que esse dinheiro poderia ter sido aplicado em outro negócio lucrativo, como no mercado financeiro, por exemplo.

Para realizar os cálculos, foram adotados os seguintes conceitos:

- Vida útil do ônibus (VUT): é o período em que um veículo novo pode operar em condições satisfatórias.
- Valor residual do ônibus (VRE): corresponde ao valor estimado do veículo ao final de sua vida útil, levando em consideração a depreciação ao longo do tempo. O valor residual é comumente expresso como uma porcentagem do valor do ônibus novo (VON), utilizando a fórmula:  $VRE (R\$) = VON (R\$) \times VRE (\%) / 100$ .
- Valor do ônibus usado quando colocado em serviço (VOU): é o valor do ônibus usado no momento em que é colocado em operação, expresso como uma porcentagem do valor do ônibus novo (VON) e dependente da idade do ônibus usado (IOU). A fórmula utilizada é:  $VOU (R\$) = VON (R\$) \times VOU (\%) / 100$ , sendo  $VOU (\%)$  uma função de IOU e calculada com base no método de depreciação de Cole (soma dos dígitos).
- Vida restante do ônibus usado (VRU): representa o tempo de uso restante do ônibus usado até que atinja sua vida útil total. Em outras palavras, é calculada como:  $VRU (anos) = VUT (anos) - IOU (anos)$ , em que VUT é a vida útil do ônibus e IOU é a idade do ônibus usado.

Para o modelo de ônibus Padron, os seguintes valores foram adotados:

- Vida útil do ônibus (VUT): 10 anos.
- Valor residual do ônibus (VRE): 10% do valor do ônibus novo (VON).
- Valor do ônibus usado quando colocado em serviço (VOU): VOU0: 100% do valor do ônibus novo (VON), ou seja, quando o ônibus é novo; VOU1: 83,6% do valor do ônibus novo (VON), para ônibus com 1 ano de uso; VOU10: 10,0% do valor do ônibus novo (VON), para ônibus com 10 anos de uso.

Esses valores representam a porcentagem do valor do ônibus novo que é atribuída ao ônibus usado em função de sua idade.

O custo médio mensal de capital, incluindo depreciação e remuneração, é determinado pela Equação 16.

$$\text{CAP} = [\text{VOU} \times (1 + \text{TRE}/100)^{\text{VRU}} - \text{VRE}] \times \left[ \frac{\text{TRE}/100}{(1 + \text{TRE}/100)^{\text{VRU}} - 1} \right] \times \text{NOF} \times \frac{1}{12} + \text{VONb} \times \text{NOF} \times \frac{1}{12} \times (0,0012 + 0,07 \times \frac{\text{TRE}}{100})$$

(Equação 16)

Onde, CAP: custo médio mensal de investimento (R\$/mês), VOU: valor do ônibus usado/novo (R\$), TRE: taxa de rentabilidade do investimento (% ao ano), VRU: vida restante do ônibus usado/novo, VRE: valor residual do ônibus no final da vida útil (R\$), NOF: número de ônibus na frota e VONb: valor do ônibus novo do tipo básico.

A primeira parte da equação do custo de investimento fornece o valor da depreciação e rentabilidade da frota de ônibus; a segunda parte fornece o valor da rentabilidade e depreciação dos ativos adicionais necessários à operação (instalações, máquinas, equipamentos, veículos de apoio, peças e acessórios em estoque, etc.). O intervalo de variação da TRE é de 8% (em situações especiais) a 20% ao ano (valor limite recomendado no método NEC).

#### 4.2.2.2. Pessoal

O aspecto individual engloba o custo mensal associado à folha de pagamento e à dedução dos impostos incidentes sobre os salários, que são de

responsabilidade da empresa. Portanto, abrange o custo relacionado ao pessoal de operações, manutenção e administração. Dentro do âmbito administrativo, está incluída a remuneração da diretoria da empresa. Além disso, os benefícios adicionais concedidos aos funcionários, como vale-refeição, cesta básica, assistência médica, uniformes, entre outros, também devem ser considerados no custo com o pessoal.

O gasto mensal com pessoal é obtido pela Equação 17.

$$PES = \left[ (SMO \times IMO + SCO \times ICO + SFD \times IFD) \times \left( 1 + \frac{ESO}{100} \right) \times (1 + FMA) \times (1 + FAD) \times NOP \right] + BEN \quad (\text{Equação 17})$$

Onde, PES: despesa mensal com pessoal (R\$/mês), SMO: salário mensal dos motoristas (R\$/mês), IMO: índice de motoristas por ônibus em relação à frota em operação no horário de pico, SCO: salário mensal dos cobradores (R\$/mês), ICO: índice de cobradores por ônibus em relação à frota em operação no horário de pico, SFD: salário mensal dos fiscais/despachantes (R\$/mês), IFD: índice de fiscais/despachantes por ônibus em relação à frota em operação no horário de pico, ESO: encargos sociais relativos ao pessoal (%), FMA: fator pessoal de manutenção (fração do gasto com pessoal de operação destinado à equipe de manutenção), FAD: fator pessoal de administração (fração do gasto com pessoal de operação destinado à equipe de administração), NOP: número de ônibus em operação no horário de pico, e BEN: valor total mensal dos benefícios adicionais concedidos aos funcionários (cesta básica, vale-alimentação, assistência médica, uniforme, etc.).

Os índices de motoristas, cobradores e fiscais/despachantes por ônibus em operação no horário de pico dependem do número diário de turnos de trabalho e do planejamento operacional, levando em consideração férias, descanso semanal, licenças, faltas, entre outros. Normalmente, os valores se encontram nos seguintes intervalos: motorista e cobrador = 1,80 - 2,80, fiscal e despachante = 0,10 - 0,40. Os intervalos de variação dos outros parâmetros costumam ser os seguintes: ESO = 38% - 42%, FMA = 0,12 - 0,15 e FAD = 0,12 - 0,20 (incluindo o gasto com remuneração da diretoria da empresa). É recomendado que esses índices sejam determinados em cada caso específico.

#### 4.2.2.3. Administração

O custo denominado administração, que corresponde ao gasto mensal com despesas administrativas, é dado pela Equação 18.

$$\mathbf{ADM = FDA \times VONb \times NOF}$$

(Equação 18)

Onde, ADM: custo mensal de administração/despesas administrativas (R\$/mês), FDA: fator de despesas administrativas (fração do preço do ônibus novo do tipo básico destinada às despesas administrativas por mês), VONb: valor do ônibus novo do tipo básico (R\$/ônibus) e NOF: número de ônibus na frota. O valor de FDA varia de acordo com o tamanho da frota, a estrutura organizacional da empresa e a presença ou ausência de despesas em atividades extras, como a administração e manutenção de terminais e pontos de ônibus, entre outros.

Como o custo de administração é fortemente influenciado pelo tamanho da frota, independentemente do tipo de ônibus, o preço do ônibus novo do tipo básico (VONb) é usado como referência na determinação do valor do fator de despesas administrativas (FDA). Normalmente, o valor de FDA está na faixa de 0,002 a 0,006.

#### 4.2.2.4. Tributos

O componente de tributos refere-se aos impostos e taxas que incidem diretamente sobre a receita operacional bruta da empresa, e atualmente são os seguintes: Contribuição Previdenciária sobre a Receita Bruta (contribuição ao Instituto Nacional de Seguro Social - INSS) = 2% - imposto federal, ISS (Imposto Sobre Serviços): valor variável determinado pelo município - imposto municipal, TGE (Taxa de Gerenciamento do Sistema de Transporte Coletivo): valor variável determinado pelo município - taxa municipal. O ISS geralmente varia de 0% (muitos municípios concedem isenção para o transporte coletivo urbano) a 3%. Alguns poucos municípios cobram a TGE, cujo valor varia normalmente entre 1% e 3%.

O gasto mensal com tributos é determinado pela Equação 19.

$$\mathbf{TRI = S_{1-7} \times \left( \frac{TTR/100}{1 - TTR/100} \right)}$$

(Equação 19)

Onde, TRI: custo mensal com tributos (R\$/mês), S1-7: soma dos custos

mensais de 1 a 7 (R\$/mês) e TTR: taxa de tributos incidentes sobre o faturamento bruto mensal (%). O valor de TTR é calculado somando os seguintes tributos: INSS = 2%, ISS = 0 - 3% (varia de acordo com o município) e TGE = 0 - 2% (varia de acordo com o município).

#### 4.2.3. Custo mensal a ser pago pelos passageiros

O custo mensal a ser cobrado dos passageiros é calculado deduzindo o valor do subsídio pago pelo poder público do custo mensal total, Equação 20.

$$\mathbf{CMP = CME - VSM} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde, CMP: custo mensal a ser pago pelos passageiros (R\$/mês), CME: custo mensal total (R\$/mês) e VSM: valor do subsídio mensal (R\$/mês).

#### 4.2.4. Valor do subsídio mensal

O valor adotado do subsídio será R\$ 90 milhões ao ano no sistema de transporte público da Cidade. Conforme apontado pela prefeitura de Fortaleza na página oficial em 07 de março de 2023.

#### 4.2.5. Determinação da tarifa

O valor da tarifa normal (integral) é obtido pela Equação 21

$$\mathbf{TAN = \frac{CMP}{PME}} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde, TAN: tarifa normal/integral (R\$/pass), CMP: custo mensal a ser pago pelos passageiros (R\$/mês) e PME: número mensal de passageiros equivalentes (pass/mês).

O número mensal de passageiros equivalentes é determinado pela

Equação 22.

$$PME = PPI + PPA \times \frac{A}{100} + PPB \times \frac{B}{100} + PPC \times \frac{C}{100} + \dots$$

(Equação 22)

Onde, PME: número mensal de passageiros equivalentes (pass/mês), PPI: número de passageiros que pagam a tarifa integral sem desconto, PPA: número de passageiros que pagam um percentual A% da tarifa integral (pass/mês), PPB: número de passageiros que pagam um percentual B% da tarifa integral (pass/mês), PPC: número de passageiros que pagam um percentual C% da tarifa integral (pass/mês), etc.

As categorias que geralmente possuem benefícios (gratuidade ou desconto na tarifa) são: idosos (gratuito por lei federal para aqueles com mais de 65 anos, em algumas cidades a partir de 60 anos mediante lei municipal), estudantes, desempregados, entre outros.

O valor da tarifa a ser paga por cada categoria que tem desconto é igual a Equação 23.

$$TAA = TAN \times \frac{A}{100} \quad TAB = TAN \times \frac{B}{100} \quad TAC = TAN \times \frac{C}{100} \dots$$

(Equação 23)

Onde, TAA, TAB, TAC, etc. representam as tarifas pagas pelas diferentes categorias, e A, B, C, etc. são as porcentagens da tarifa normal paga por cada categoria. A tarifa normal ou integral, determinada por essa metodologia, corresponde à tarifa pública, na qual foi subtraído do custo mensal total o valor do subsídio mensal. Para obter o valor da tarifa técnica, basta não considerar o subsídio mensal, ou seja, fazer SME = 0, o que resulta em CMP = CME.

#### 4.3. Análise ambiental: emissão de CO<sub>2</sub>

Para analisar as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao transporte público coletivo em Fortaleza no ano de 2030, considerando a introdução de ônibus com células a combustível de hidrogênio, são propostos dois cenários para fins de comparação:

- I. Cenário 1: Neste cenário, foram consideradas as condições vigentes de uso de energia para o transporte por ônibus na cidade de Fortaleza, que tem como único combustível o óleo diesel. As premissas adotadas incluem o total de quilômetros percorridos por ano na cidade, a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> por litro de diesel calculada com base no manual do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2,67 kg de CO<sub>2</sub>/l, utilizando dados de emissões de veículos pesados europeus que são semelhantes aos veículos brasileiros. Também são consideradas a previsão da quantidade de combustível necessário para 2030 e a média de quilômetros por litro de diesel.
- II. Cenário 2: Neste cenário, o hidrogênio produzido a partir de fontes eólicas e solares por meio da eletrólise da água é inserido na matriz de combustível do transporte público coletivo da cidade de Fortaleza.

Por meio da comparação desses dois cenários, é possível avaliar o impacto das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do uso de diferentes combustíveis no transporte público coletivo da capital cearense. Os dados e premissas adotados serão apresentados na próxima seção.

#### **4.4. Estudo de caso**

Fortaleza, está localizada na costa atlântica em uma região de clima tropical úmido, é a capital do estado do Ceará. A cidade tem suas raízes no Forte de Schoonenborch, construído pelos holandeses e posteriormente conquistado pelos portugueses, que estabeleceram seu domínio na área.

Oficialmente fundada em 13 de abril de 1726, Fortaleza tem uma população estimada de 2,6 milhões de habitantes de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2021. A formação populacional da cidade resultou da miscigenação entre colonizadores europeus, descendentes de indígenas e africanos, bem como migrantes internos vindos do território cearense.

A cidade de Fortaleza está organizada em 12 regiões administrativas conhecidas como Secretarias Executivas Regionais (SER), que estão subordinadas à Secretaria Municipal da Gestão Regional (SEGR). As SER são responsáveis pelo

planejamento e execução das políticas públicas municipais nos 121 bairros que compõem a capital cearense. Esses bairros, muitos dos quais surgiram a partir de antigas vilas ou municípios incorporados a Fortaleza ao longo de sua história, foram agrupados em 38 territórios com base em suas características socioeconômicas.

Segundo dados do IBGE de 2020, a renda média mensal dos trabalhadores de Fortaleza era cerca de 2,7 vezes o valor do salário-mínimo vigente. A taxa de ocupação, que indica a proporção da população economicamente ativa empregada, era de 30,5%.

Na Tabela 3, segundo dados do IBGE, são apresentados os principais dados de caracterização da capital cearense, ao que diz respeito a população, trabalho e rendimento, educação, economia, saúde e meio ambiente.

Tabela 3: Principais características da cidade de Fortaleza.

População estimada [2021]	2.703.391 pessoas
População no último censo [2010]	2.452.185 pessoas
Densidade demográfica [2010]	7.786,44 hab/km <sup>2</sup>
Salário médio mensal dos trabalhadores formais [2020]	2,7 salários-mínimos
Pessoal ocupado [2020]	818.765 pessoas
População ocupada [2020]	30,5 %
Percentual da população com rendimento nominal mensal per capita de até 1/2 salário mínimo [2010]	36,9 %
Taxa de escolarização de 6 a 14 anos de idade [2010]	96,1 %
Ideb – anos iniciais do ensino fundamental (rede pública) [2021]	5,9

Ideb – anos finais do ensino fundamental (rede pública) [2021]	5,2
Matrículas no ensino fundamental [2021]	294.251 matrículas
Matrículas no ensino médio [2021]	101.021 matrículas
Docentes no ensino fundamental [2021]	12.423 docentes
Docentes no ensino médio [2021]	5.620 docentes
Número de estabelecimentos de ensino fundamental [2021]	951 escolas
Número de estabelecimentos de ensino médio [2021]	301 escolas
Pib per capita [2020]	24.253,93 r\$
Percentual das receitas oriundas de fontes externas [2015]	54,4 %
Índice de desenvolvimento humano municipal (idhm) [2010]	0,754
Total de receitas realizadas [2017]	6.810.527,07 r\$ (×1000)
Total de despesas empenhadas [2017]	6.525.657,82 r\$ (×1000)
Mortalidade infantil [2020]	12,02 óbitos por mil nascidos vivos
Internações por diarreia [2016]	1,4 internações por mil habitantes
Estabelecimentos de saúde sus [2009]	187 estabelecimentos
Área urbanizada [2019]	253,69 km <sup>2</sup>

Esgotamento sanitário adequado [2010]	74 %
Arborização de vias públicas [2010]	74,8 %
Urbanização de vias públicas [2010]	13,2 %
População exposta ao risco [2010]	102.836 pessoas
Bioma [2019]	Caatinga
Sistema costeiro-marinho [2019]	Pertence

Fonte: IBGE, 2020.

O estado do Ceará tem se destacado como uma região com potencial para a produção e utilização de hidrogênio verde. A localidade possui uma significativa capacidade de geração de energia eólica e solar, o que a coloca em uma posição favorável para o avanço dessa tecnologia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

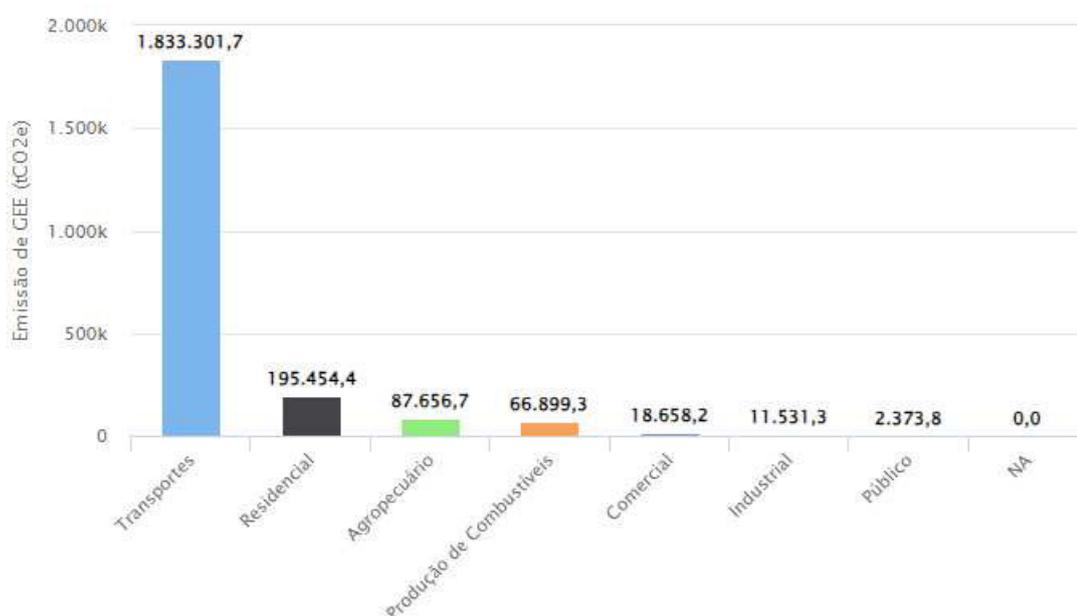
O governo estadual tem se empenhado em estimular a produção e o uso do hidrogênio verde, estabelecendo parcerias com empresas e instituições de pesquisa para impulsionar o desenvolvimento tecnológico nessa área (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2022).

Fortaleza, a capital do Ceará, está buscando implementar o Plano Fortaleza 2040. Esse plano foi elaborado pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR) e está sendo executado tecnicamente pela Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura da Universidade Federal do Ceará (FCPC/UFC). O Plano Fortaleza 2040 propõe sete eixos estratégicos de desenvolvimento, e o Eixo 4 concentra-se em ações para tornar a cidade ambientalmente sustentável. Para alcançar essa meta, três estratégias claras foram delineadas, sendo a Estratégia 2 especialmente relevante, com foco no aproveitamento do potencial energético da cidade (IPLANFOR, 2023).

Avaliando o perfil de emissões GEE pelos setores econômicos da cidade de Fortaleza, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções

de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2019, a capital cearense ocupava o 60º lugar no ranking nacional dos municípios que mais emitem GEE no país, representando emissão de 0,2% em relação ao total de emissões brasileiras, ou seja 4.116 Mil tCO<sub>2</sub> foram emitidas. O destaque cabe ao subsetor de transporte, encontrando-se como o principal emissor de GEE em Fortaleza no ano de análise, de acordo com SEEG, 2019, ver Gráfico 1.

Gráfico 1: Quantidade de Emissões de CO<sub>2</sub> do setor de Energia em Fortaleza-CE.

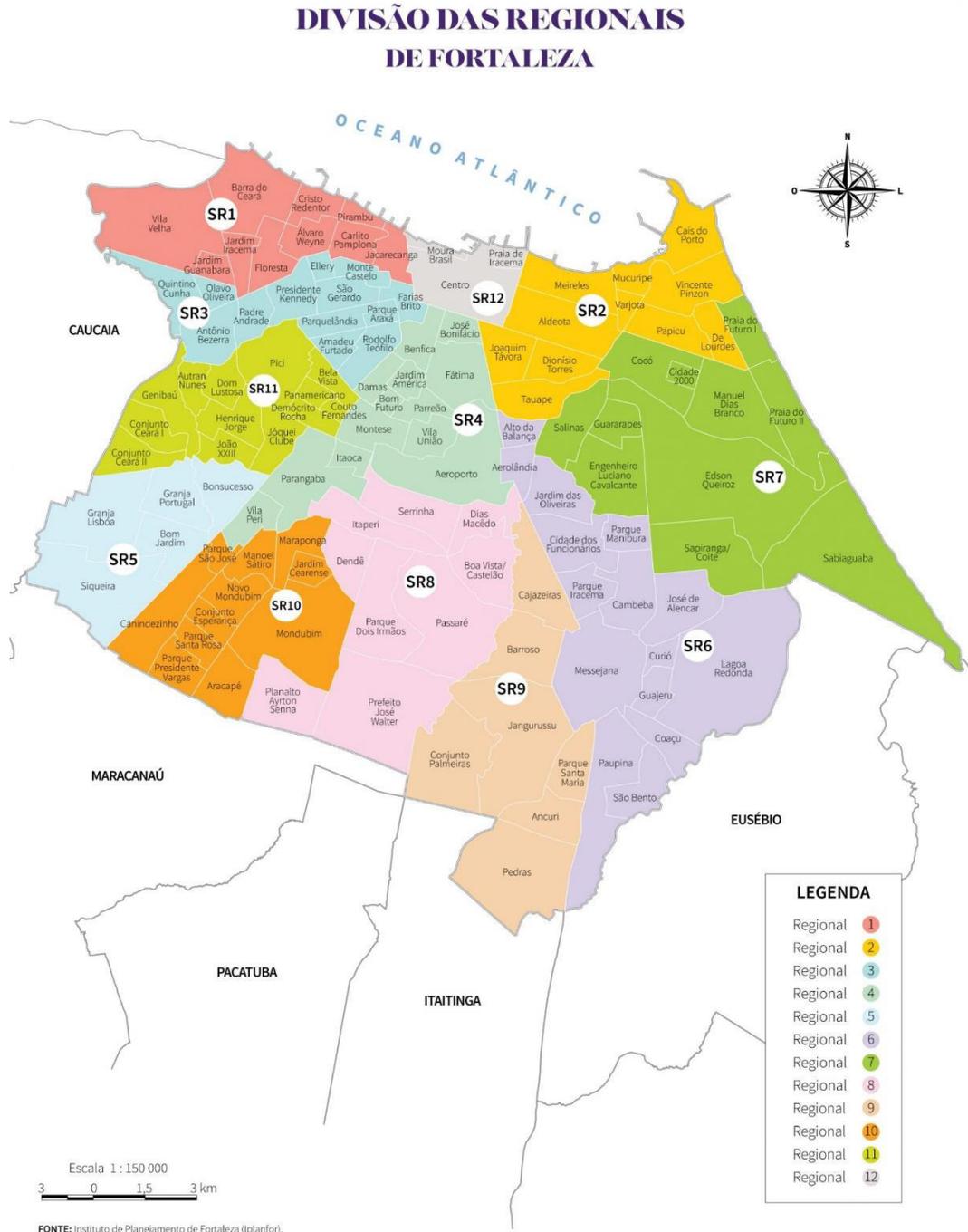


Fonte: SEEG, 2018.

De acordo com dados da Divisão de Planejamento (DIPLA) da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR), a população de Fortaleza em 2021, possuiu um total de 1680 veículos para transporte coletivo divididos em 296 linhas operadas por oito empresas. Em média, cada veículo tem a capacidade de transportar até 76 passageiros.

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, localizada no nordeste do Brasil, é dividida em 12 Regionais (Figura 12) e abrange 38 territórios administrativos, ocupando uma área de 312,353 km<sup>2</sup>, de acordo com dados fornecidos pelo IBGE em 2020.

Figura 12: Mapa das 12 Regionais de Fortaleza 2023.



Fonte: Instituto de Planejamento de Fortaleza – Planfor (2023).

A fim de facilitar a locomoção da população de Fortaleza, que é estimada em 2.703.391 pessoas de acordo com o IBGE em 2021, são disponibilizadas aproximadamente 296 linhas de ônibus distribuídas em uma frota de 1680 veículos.

Esses veículos percorrem uma média diária de 343.812 km na capital cearense, conforme dados atualizados do Mapa de Operalização da Linha (MOL) divulgados pela ETUFOR em 10/06/2021.

É importante ressaltar que todos os ônibus são abastecidos com óleo diesel, que é o combustível principal comercializado no Brasil, de acordo com a Petrobras. No país, as distribuidoras de combustível são obrigadas por lei a adicionar uma concentração de biodiesel ao óleo diesel, o que resulta nas categorias de óleo diesel A e óleo diesel B (com adição de biodiesel). A mistura obrigatória de biodiesel é de 10%, conforme estabelecido pela Resolução N°16 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em 6 de setembro de 2021.

Segundo informações do Gerenciador Integrado do Sistema de Transportes - ETUFOR, aproximadamente 574 mil pessoas utilizam o transporte público urbano diariamente em Fortaleza, o que corresponde a cerca de 21% da população total da capital cearense.

#### **4.5. A modelagem dos cenários**

O horizonte temporal deste trabalho vai de 2021 (ano base) até 2030 (ano final). Assumiu-se dois cenários para analisar o comportamento do setor de transporte de passageiros na capital cearense, levando em consideração dois critérios de análise, sendo eles: **o valor da tarifa** e as **emissões de GEE**, em especial o **CO<sub>2</sub>**.

O **cenário 1** projeta diferentes indicadores considerando o uso do **óleo diesel** oriundo do refino do petróleo, sendo o único combustível utilizado para abastecer o transporte público coletivo da capital cearense. O **cenário 2** o combustível utilizado é o **hidrogênio** produzido a partir das fontes eólica e solar por meio da eletrólise da água sendo inserido na matriz energética do transporte público coletivo da cidade de Fortaleza.

##### **4.5.1. Autonomia dos veículos**

A autonomia para veículos a diesel adotada foi segundo a planilha NEC que estima uma autonomia de 0,42 Km/L que é equivalente ao veículo adotado pelo estudo, tipo Padron.

Segundo Pereira 2022, em seu estudo *PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO*

*HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA*, considerando um gasto de 2kg de Hidrogênio a mais para cada 100km rodados em virtude da climatização necessária na cidade de Fortaleza, um típico de um FCEB carroceria tipo padrão terá como autonomia 0,11 kg/km.

#### 4.5.2. Número total de passageiros

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, estima-se que a pandemia de Covid-19 pode acelerar algumas tendências como a adoção do trabalho remoto. Apesar disso, a atividade total do transporte de passageiros deve aumentar 3,2% ao ano entre 2019 e 2030.

Na Tabela 4 segue os valores médio mensais por ano previstos segundo a taxa enunciada pelo PDE 2030 sobre crescimento de 3,2% ao ano. Assim, o valor previsto para 2030 é de **13.933.253,59** passageiros.

Tabela 4: Média mensal de passageiros por ano (crescimento de 3,2% ano).

Período	Passageiros
2021	10.493.860,00
2022	10.829.663,52
2023	11.176.212,75
2024	11.533.851,56
2025	11.902.934,81
2026	12.283.828,72
2027	12.676.911,24
2028	13.082.572,40
2029	13.501.214,72
2030	13.933.253,59

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.3. Valor do Pneu e da Reforma

Para o cálculo de previsão dos valores dos pneus e reforma utilizou-se o valor médio anual do IPCA na cidade de Fortaleza para o subitem Pneu que foi calculado no intervalo de 10 anos, 2012 – 2021.

Segundo os dados compilados das séries histórias do IPCA para o subitem pneu, o valor da taxa de crescimento média ano a ano é de **0,68%**, sendo assim

calculou-se os valores projetados a partir desse incremento, ver Tabela 5

Tabela 5: Valores do Pneu e da reforma

Período	R\$ Pneu novo	R\$ Reforma do pneu
2021	R\$ 2.200,00	R\$ 607,00
2022	R\$ 2.214,96	R\$ 611,13
2023	R\$ 2.230,02	R\$ 615,28
2024	R\$ 2.245,19	R\$ 619,47
2025	R\$ 2.260,45	R\$ 623,68
2026	R\$ 2.275,82	R\$ 627,92
2027	R\$ 2.291,30	R\$ 632,19
2028	R\$ 2.306,88	R\$ 636,49
2029	R\$ 2.322,57	R\$ 640,82
2030	R\$ 2.338,36	R\$ 645,18

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.4. Frota de ônibus

Segundo o PDE - 2030 a demanda total de energia do setor de transportes aumentará, em média, 1,9% ao ano entre 2019 e 2030. Assim, adotou-se que o crescimento da frota de ônibus acompanhará o crescimento de demanda energética.

Na Tabela 6 seguem os valores médios mensais por ano previstos segundo a taxa enunciada pelo PDE 2030 sobre crescimento de **1,9% ao ano**. Assim, o valor previsto para 2030 é de **1.990** veículos em operação.

Tabela 6: Frota de ônibus

Período	Veículos
2021	1.680
2022	1.712
2023	1.744
2024	1.778
2025	1.811
2026	1.846
2027	1.881
2028	1.917
2029	1.953
2030	1.990

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.5. Salário do motorista e do fiscal

Segundo o Anuário NTU [2021–2022], no Desempenho operacional do

transporte público por ônibus (1994-2021), a evolução do salário médio mensal dos motoristas dos sistemas de ônibus urbano (1994-2021) /Capitais Brasileiras foi na ordem de um aumento de 2,7% do salário médio dos motoristas após a correção para valores constantes, portanto, acima da inflação do período.

Para o cálculo das projeções subsequentes até o ano de 2030, a taxa de crescimento de 2,7% ano a ano foi adotada, por mais que a taxa de reajuste salarial foi superior, ver Tabela 7, sendo assim, preferiu-se adotar a taxa própria do setor.

Tabela 7: Evolução do salário-mínimo

Períodos	Salário-mínimo (R\$)	Aumento real
2004	R\$ 260,00	-
2005	R\$ 300,00	8,23%
2006	R\$ 350,00	13,04%
2007	R\$ 380,00	5,10%
2008	R\$ 415,00	4,03%
2009	R\$ 465,00	5,79%
2010	R\$ 510,00	6,02%
2011	R\$ 545,00	0,37%
2012	R\$ 622,00	7,59%
2013	R\$ 678,00	2,64%
2014	R\$ 724,00	1,16%
2015	R\$ 788,00	2,46%
2016	R\$ 880,00	0,36%
2017	R\$ 937,00	-0,10%
2018	R\$ 954,00	-0,25%
2019	R\$ 998,00	1,14%
2020	R\$ 1.045,00	0,00%
2021	R\$ 1.100,00	0,00%
2022	R\$ 1.212,00	0,00%
		<b>3,62%</b>

Fonte: Ministério da Economia, 2022

Para o cálculo da previsão dos salários, a taxa de crescimento anual de 2,7%, foi aplicada para cada ano subsequente. Os resultados são vislumbrados da Tabela 8.

Tabela 8: Previsão de salários (2022 - 2030).

Período	Salário do motorista	Salário do Fiscal
2021	R\$ 2.724,00	R\$ 1.795,41
2022	R\$ 2.797,55	R\$ 1.843,89
2023	R\$ 2.873,08	R\$ 1.893,67
2024	R\$ 2.950,66	R\$ 1.944,80
2025	R\$ 3.030,32	R\$ 1.997,31
2026	R\$ 3.112,14	R\$ 2.051,24

2027	R\$ 3.196,17	R\$ 2.106,62
2028	R\$ 3.282,47	R\$ 2.163,50
2029	R\$ 3.371,09	R\$ 2.221,91
2030	R\$ 3.462,11	R\$ 2.281,91

Fonte: Próprio autor.

#### 4.5.6. Quilômetro percorridos

Segundo o PDE - 2030, em termos energéticos, projeta-se um crescimento da demanda de passageiros em média de 1,6% ao ano. Assim, adotou-se que o crescimento de quilometragem percorrida acompanhará o crescimento de demanda energética.

Na Tabela 9 seguem os valores médios mensais por ano previstos segundo a taxa enunciada pelo PDE 2030 sobre crescimento de **1,6% ao ano**. Assim, o valor previsto para 2030 é de **4.721,56** quilômetros por veículo.

Tabela 9: Média mensal por ano de Km/Vei

Período	Média mensal de Km/Vei
2021	4.093,00
2022	4.158,49
2023	4.225,02
2024	4.292,62
2025	4.361,31
2026	4.431,09
2027	4.501,98
2028	4.574,02
2029	4.647,20
2030	4.721,56

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.7. Valor médio do subsídio

Para o cálculo de previsão dos valores aplicados ao subsídio, utilizou-se o valor médio anual do IPCA na cidade de Fortaleza para o item **Transporte Público** que foi calculado no intervalo de 10 anos, 2012 – 2021.

Segundo os dados compilados das séries históricas do IPCA para o item mencionado, o valor da taxa de crescimento média ano a ano é de **0,56%**, sendo

assim calculou-se os valores projetados a partir desse incremento. Vale ressaltar a escassez de informações sobre a série histórica real aplicada na capital cearense, sendo assim, adotou-se os valores do IPCA, ver Tabela 10.

Tabela 10: Previsão de subsídios (2021 - 2030).

<b>Período</b>	<b>Subsídio</b>	
2021	R\$	7.500.000,00
2022	R\$	7.542.000,00
2023	R\$	7.584.235,20
2024	R\$	7.626.706,92
2025	R\$	7.669.416,48
2026	R\$	7.712.365,21
2027	R\$	7.755.554,45
2028	R\$	7.798.985,56
2029	R\$	7.842.659,88
2030	R\$	7.886.578,77

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.8. Valor do combustível

Segundo o Anuário NTU [2021–2022], tendo como cidades analisadas: Belo Horizonte-MG, Curitiba-PR, Fortaleza-CE, Goiânia-GO, Porto Alegre-RS, Recife-PE, Rio de Janeiro-RJ, Salvador-BA e São Paulo-SP, o desempenho operacional do transporte público por ônibus (1994-2021), a evolução do preço médio do óleo diesel para grandes consumidores dos sistemas de ônibus urbano (1993-2021) em Valores em R\$ constantes pelo IGP-DI foi na ordem de 3,4%, ver Tabela 11.

Tabela 11: Evolução do preço médio do óleo diesel para grandes

<b>Período</b>	<b>Abril</b>	<b>Outubro</b>	<b>Média anual</b>	<b>% Em relação ao ano anterior</b>
1993	R\$ 1,98	R\$ 2,00	R\$ 1,99	-
1994	R\$ 2,00	R\$ 2,70	R\$ 2,35	18,1%
1995	R\$ 2,44	R\$ 2,39	R\$ 2,42	2,8%
1996	R\$ 2,28	R\$ 2,21	R\$ 2,25	-7,0%
1997	R\$ 2,33	R\$ 2,21	R\$ 2,27	1,1%
1998	R\$ 2,28	R\$ 2,25	R\$ 2,27	-0,2%
1999	R\$ 2,57	R\$ 3,01	R\$ 2,79	23,2%
2000	R\$ 3,05	R\$ 3,37	R\$ 3,21	15,1%
2001	R\$ 3,53	R\$ 3,48	R\$ 3,51	9,2%
2002	R\$ 3,42	R\$ 3,81	R\$ 3,62	3,1%

2003	R\$ 4,29	R\$ 4,28	R\$ 4,29	18,5%
2004	R\$ 3,87	R\$ 3,99	R\$ 3,93	-8,3%
2005	R\$ 4,15	R\$ 4,62	R\$ 4,39	11,6%
2006	R\$ 4,58	R\$ 4,48	R\$ 4,53	3,3%
2007	R\$ 4,49	R\$ 4,32	R\$ 4,41	-2,8%
2008	R\$ 4,12	R\$ 4,23	R\$ 4,18	-5,2%
2009	R\$ 4,36	R\$ 4,03	R\$ 4,20	0,5%
2010	R\$ 3,86	R\$ 3,69	R\$ 3,78	-10,0%
2011	R\$ 3,54	R\$ 3,53	R\$ 3,54	-6,4%
2012	R\$ 3,51	R\$ 3,47	R\$ 3,49	-1,3%
2013	R\$ 3,68	R\$ 3,59	R\$ 3,64	4,2%
2014	R\$ 3,73	R\$ 3,75	R\$ 3,74	2,9%
2015	R\$ 4,16	R\$ 4,09	R\$ 4,13	10,3%
2016	R\$ 4,10	R\$ 3,94	R\$ 4,02	-2,5%
2017	R\$ 3,87	R\$ 4,23	R\$ 4,05	0,7%
2018	R\$ 4,35	R\$ 4,47	R\$ 4,41	8,9%
2019	R\$ 4,22	R\$ 4,31	R\$ 4,27	-3,3%
2020	R\$ 3,58	R\$ 3,14	R\$ 3,36	-21,2%
2021	R\$ 4,03	R\$ 4,69	R\$ 4,36	29,8%
<b>Taxa de crescimento médio ano a ano</b>				<b>3,4%</b>

Fonte: Próprio autor

Para o cálculo das projeções subsequentes até o ano de 2030, a taxa de crescimento de **3,4%** ano a ano foi adotada, onde segundo dados da ANP em 2021, o valor médio do diesel para a capital cearense foi de R\$ 4,80. A Tabela 12 apresenta os dados das projeções do diesel.

Tabela 12: Projeções para o diesel.

<b>Período</b>	<b>Diesel (R\$/litro)</b>
2021	R\$ 4,80
2022	R\$ 4,96
2023	R\$ 5,13
2024	R\$ 5,31
2025	R\$ 5,48
2026	R\$ 5,67
2027	R\$ 5,86
2028	R\$ 6,06
2029	R\$ 6,27
2030	R\$ 6,48

Fonte: Próprio autor

#### 4.5.9. Ano de referência, 2021

Os valores de referência para o ano base foram retirados do **Mapa de Operacionalização de Linha (MOL) da DIPLA/ETUFOR** e utilizados para a elaboração do cálculo da tarifa de ônibus, tais valores utilizados como referência estão da Tabela 13.

Tabela 13: Dados compilados do Mapa de Operacionalização de Linha (MOL) da DIPLA/ETUFOR.

<b>Variáveis</b>	<b>Valor diário</b>	<b>Valor mensal (considerando 20 dias o mês)</b>
Qnt Frota	1.680,00	1.680,00
Via.Pro	15.215,71	304.314,20
Via.Tot	15.215,71	304.314,20
Km.Tot	343.807,39	6.876.147,80
kmmta	29.153,90	583.078,00
Inteiras	36.887,00	737.740,00
Meias	35.213,00	704.260,00
Vales	363.059,00	7.261.180,00
Gravidas	17.215,00	344.300,00
Deficientes	12.982,00	259.640,00
Integrações	59.337,00	1.186.740,00
Tot.Pas	524.693,00	10.493.860,00
Pas.Pag	435.159,00	8.703.180,00
%Mei	6,71	6,71
Arrec.	R\$ 1.459.980,32	R\$ 29.199.606,40
P/Vei	312,32	312,32
Km/Vei	204,65	4.093,00
IPKr	1,27	1,27
IPKe	1,21	1,21
P/Via	34,48	34,48
R\$/Km	4,25	85,00

Fonte: DIPLA/ETUFOR (2021).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

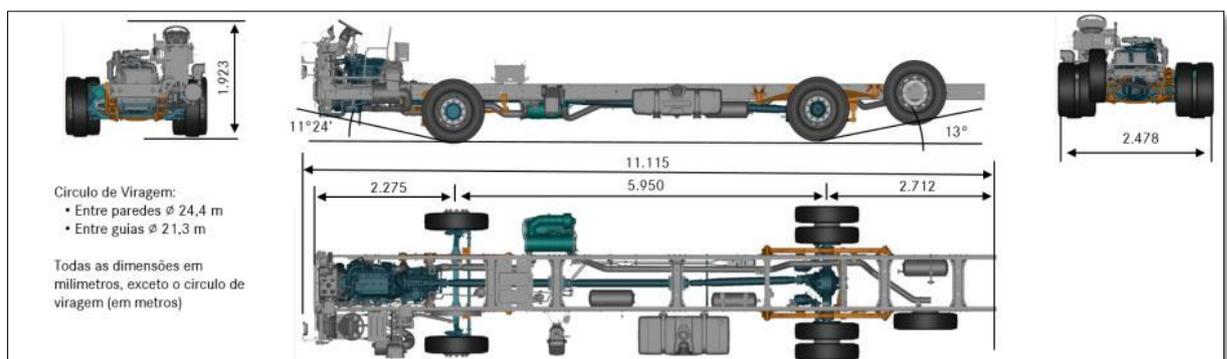
Inserindo os valores da Tabela 13 no método NEC, e adotando que toda a frota foi renovada por veículos com motor OF 1721/59 Euro 6 da Mercedes Benz de tipo *Padron* que comporta até 85 passageiros, conforme pode-se ver na Figura 13 e na Figura 14. Assim, encontrou-se um valor base para a tarifa no ano de 2021, **R\$ 3,88**, onde o valor do diesel adotado foi de **R\$ 4,80 por litro**, segundo a ANP no ano de 2021.

Figura 13: Ônibus tipo Padron - Mercedes Bens.



Fonte: <https://jrs.digital/mercedes-benz-lanca-linha-de-onibus-2023-com-motores-euro-6/>

Figura 14: Carroceria OF 1721/59 Euro 6 da Mercedes Benz



Fonte: <https://m.mercedesbenz.com.br/resources/files/documentos/onibus/onibus-urbano/dados-tecnicos/OF%201721.pdf>

## 5.1. Cenário 1: adoção do diesel

O óleo diesel, de acordo com a Petrobras, é o principal combustível comercializado no Brasil. Um dos seus principais usos é destinado ao transporte de passageiros. Segundo a Resolução N°16 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em 6 de setembro de 2021, deve-se adicionar ao diesel concentrações de biodiesel, dessa forma podem ser encontrados óleo diesel A e óleo diesel B (com adição de biodiesel).

Tabela 14: Valores projetados para o cenário 1.

Ano	Passageiros	R\$ Pneu novo	R\$ Reforma do pneu	Frota	Salário do motorista (R\$)	Salário do Fiscal (R\$)	Média mensal de Km/Wei	Subsídio (R\$)	Diesel (R\$/litro)
2021	10.493.860	2.200,00	607,00	1.680	2.724,00	1.795,41	4.093,00	7.500.000,00	4,80
2022	10.829.664	2.214,96	611,13	1.712	2.797,55	1.843,89	4.158,49	7.542.000,00	4,96
2023	11.176.213	2.230,02	615,28	1.744	2.873,08	1.893,67	4.225,02	7.584.235,20	5,13
2024	11.533.852	2.245,19	619,47	1.778	2.950,66	1.944,80	4.292,62	7.626.706,92	5,31
2025	11.902.935	2.260,45	623,68	1.811	3.030,32	1.997,31	4.361,31	7.669.416,48	5,48
2026	12.283.829	2.275,82	627,92	1.846	3.112,14	2.051,24	4.431,09	7.712.365,21	5,67
2027	12.676.911	2.291,30	632,19	1.881	3.196,17	2.106,62	4.501,98	7.755.554,45	5,86
2028	13.082.572	2.306,88	636,49	1.917	3.282,47	2.163,50	4.574,02	7.798.985,56	6,06
2029	13.501.215	2.322,57	640,82	1.953	3.371,09	2.221,91	4.647,20	7.842.659,88	6,27
2030	13.933.254	2.338,36	645,18	1.990	3.462,11	2.281,91	4.721,56	7.886.578,77	6,48

Fonte: Próprio autor.

### 5.1.1. Evolução da tarifa

Aos de tarifa valores projetados até o ano de 2030 (Tabela 15) foi acrescido a taxa de crescimento da tarifa pela média histórica, que é de 9,25%, ver Tabela 16. Sendo assim, para validar os valores encontrados, uma nova projeção foi realizada, agora tendo como fator de incremento anual o valor de 6,91% que é a diferença entre a taxa encontrada e a taxa de média histórica, ver Tabela 17.

Tabela 15: Valores da tarifa com o uso do Diesel

Período	Valores simulados
2021	R\$ 3,88

2022	R\$	3,97
2023	R\$	4,07
2024	R\$	4,16
2025	R\$	4,26
2026	R\$	4,36
2027	R\$	4,46
2028	R\$	4,56
2029	R\$	4,67
2030	R\$	4,78
<hr/>		
<b>Taxa de crescimento anual</b>		<b>2,34%</b>
<hr/>		

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16: Crescimento da tarifa pela média histórica.

<b>Período</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Aumento real</b>
1994	R\$ 0,40	
1995	R\$ 0,54	35,00%
1996	R\$ 0,70	29,63%
1997	R\$ 0,70	0,00%
1998	R\$ 0,76	8,57%
1999	R\$ 0,80	5,26%
2000	R\$ 0,90	12,50%
2001	R\$ 1,00	11,11%
2002	R\$ 1,00	0,00%
2003	R\$ 1,50	50,00%
2004	R\$ 1,60	6,67%
2005	R\$ 1,60	0,00%
2006	R\$ 1,60	0,00%
2007	R\$ 1,60	0,00%
2008	R\$ 1,60	0,00%
2009	R\$ 1,80	12,50%
2010	R\$ 1,80	0,00%
2011	R\$ 2,00	11,11%
2012	R\$ 2,20	10,00%
2013	R\$ 2,20	0,00%
2014	R\$ 2,20	0,00%
2015	R\$ 2,40	9,09%
2016	R\$ 2,75	14,58%
2017	R\$ 3,20	16,36%
2018	R\$ 3,40	6,25%
2019	R\$ 3,60	5,88%
2020	R\$ 3,60	0,00%
2021	R\$ 3,90	8,33%
2022	R\$ 3,90	0,00%

2023	R\$ 4,50	15,38%
<b>Taxa de crescimento anual</b>		<b>9,25%</b>

Fonte: Próprio autor.

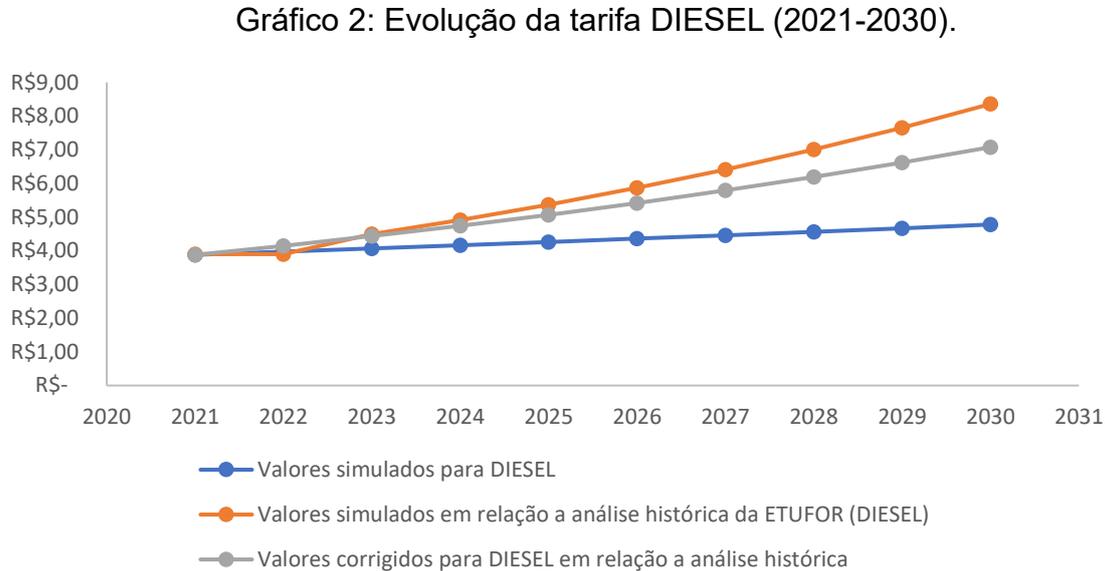
Ao considerar diferentes cenários de projeção de crescimento da tarifa, notou-se que os “valores simulados” possuem uma taxa anual de aumento da tarifa de 2,34%. Entretanto, valores de acordo com a série histórica apresentada pela ETUFOR a média de crescimento anual é de 9,25%. Sendo assim, para que os valores simulados possam convergir com a série histórica para a tarifa, foi realizada um incremento de 6,21% nos valores simulados para que eles possam exprimir melhor a realidade de acordo com o crescimento histórico. Com isso, optou-se por seguir com os **Valores corrigidos para DIESEL em relação a análise histórica**, resultante dessa opção de correção dos valores simulados, (resultando em um valor da tarifa de 7,08 reais em 2030) porque assim os valores encontrados convergem para os valores mais reais da base de referência (**Valores simulados em relação a análise histórica da ETUFOR (DIESEL)**). Para os detalhes descritos, ver Tabela 17.

Tabela 17: Valores da tarifa com o uso do diesel

Período	Valores simulados		Valores simulados em relação a análise histórica da ETUFOR (DIESEL)		Valores corrigidos para DIESEL em relação a análise histórica	
	R\$		R\$		R\$	
2021	R\$	3,88	R\$	3,90	R\$	3,88
2022	R\$	3,97	R\$	3,90	R\$	4,15
2023	R\$	4,07	R\$	4,50	R\$	4,43
2024	R\$	4,16	R\$	4,92	R\$	4,74
2025	R\$	4,26	R\$	5,37	R\$	5,07
2026	R\$	4,36	R\$	5,87	R\$	5,42
2027	R\$	4,46	R\$	6,41	R\$	5,79
2028	R\$	4,56	R\$	7,00	R\$	6,19
2029	R\$	4,67	R\$	7,65	R\$	6,62
2030	R\$	4,78	R\$	8,36	R\$	7,08
<b>Taxa de crescimento anual</b>		<b>2,34%</b>		<b>9,25%</b>		

Fonte: Próprio autor.

Na Gráfico 2 verifica-se em cinza os valores adotados para as projeções da tarifa do transporte público da capital cearense utilizando o diesel como único combustível.



Fonte: Próprio autor.

### 5.1.2. Emissão de CO<sub>2</sub>

Os veículos movidos a diesel emitem mais CO<sub>2</sub> por unidade de volume ou peso de combustível em relação aos demais modais motorizados. Utilizou-se neste trabalho um fator de emissão médio de 2,7 kg de CO<sub>2</sub> para cada litro de diesel queimado na combustão, de acordo com o manual do IPCC, que somado com o valor médio de 0,5 kg de CO<sub>2</sub> emitidos para produzir e distribuir o combustível, chegou-se a uma taxa de emissão em torno de **3,2 kg de CO<sub>2</sub> /l** de diesel. Adotou-se o consumo de **0,42 l/km** para cada ônibus da frota, sendo assim, as taxas de emissões de CO<sub>2</sub> podem ser observadas na Tabela 18 e na Gráfico 3.

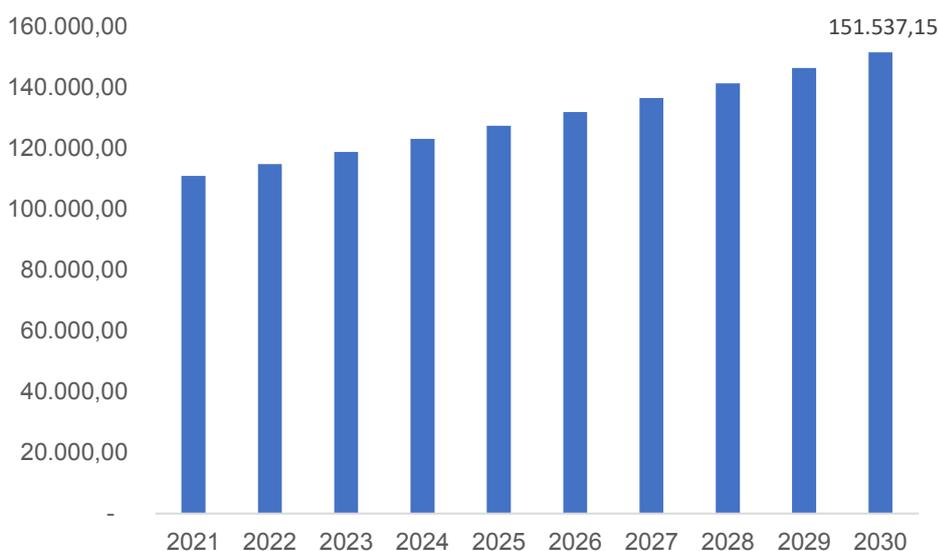
Tabela 18: Quantitativo para as emissões de CO<sub>2</sub>

Período	Média mensal de Km/Wei	Veículos	KM por ano	Litros anuais de Diesel	Toneladas de CO <sub>2</sub> emitidas por ano
2021	4.093,00	1.680	82.514.880,00	34.656.249,60	110.900,00
2022	4.158,49	1.712	85.432.018,56	35.881.447,80	114.820,63
2023	4.225,02	1.744	88.421.218,56	37.136.911,80	118.838,12
2024	4.292,62	1.778	91.587.340,32	38.466.682,93	123.093,39

2025	4.361,31	1.811	94.779.988,92	39.807.595,35	127.384,31
2026	4.431,09	1.846	98.157.505,68	41.226.152,39	131.923,69
2027	4.501,98	1.881	101.618.692,56	42.679.850,88	136.575,52
2028	4.574,02	1.917	105.220.756,08	44.192.717,55	141.416,70
2029	4.647,20	1.953	108.911.779,20	45.742.947,26	146.377,43
2030	4.721,56	1.990	112.750.852,80	47.355.358,18	151.537,15

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 3: Toneladas de CO2 emitidas por ano.



Fonte: Próprio autor.

Este cenário foge do ideal quando relacionado as metas obrigatórias de redução de gases de efeito estufa que foram assumidas pelo Brasil junto a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) de 2009, e junto a atualização de 2023 da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) que se compromete com a redução de 1,32 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO<sub>2e</sub>) em 2025, representando uma redução de 48,4% em relação às emissões de 2005 e mitigação de cerca de 1,24 GtCO<sub>2e</sub>; e 1,20 GtCO<sub>2e</sub> em 2030, representando uma redução de 53,1% e mitigação de cerca de 1,36 GtCO<sub>2e</sub> em relação às emissões de 2005, como aborda o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). É importante salientar que fora do cenário 1, as reduções de emissões registradas no setor de transporte não estão necessariamente ligadas as soluções sustentáveis para o transporte e mobilidade, mas sim a recessão econômica e menos distâncias percorridas por falta de produção e relacionados (CLIMA, 2020).

## 5.2. Cenário 2: Adoção do Hidrogênio Verde

Os dados utilizados para a projeção da tarifa utilizando o hidrogênio como único combustível são encontrados na Tabela 19.

Tabela 19: Dados para a obtenção da tarifa tendo como combustível o hidrogênio.

Ano	Passageiros (10 <sup>6</sup> )	R\$ Pneu novo	R\$ Reforma pneu	Frota	Salário motorista (R\$)	Salário Fiscal (R\$)	Média mensal de Km/Wei	Subsídio (10 <sup>6</sup> R\$)	QME (10 <sup>6</sup> Km/mês)
2021	10,49	2.200,00	607,00	1.680	2.724,00	1.795,41	4.093,00	7,50	6,88
2022	10,83	2.214,96	611,13	1.712	2.797,55	1.843,89	4.158,49	7,54	7,12
2023	11,18	2.230,02	615,28	1.744	2.873,08	1.893,67	4.225,02	7,58	7,37
2024	11,53	2.245,19	619,47	1.778	2.950,66	1.944,80	4.292,62	7,63	7,63
2025	11,90	2.260,45	623,68	1.811	3.030,32	1.997,31	4.361,31	7,67	7,90
2026	12,28	2.275,82	627,92	1.846	3.112,14	2.051,24	4.431,09	7,71	8,18
2027	12,68	2.291,30	632,19	1.881	3.196,17	2.106,62	4.501,98	7,76	8,47
2028	13,08	2.306,88	636,49	1.917	3.282,47	2.163,50	4.574,02	7,80	8,77
2029	13,50	2.322,57	640,82	1.953	3.371,09	2.221,91	4.647,20	7,84	9,08
2030	13,93	2.338,36	645,18	1.990	3.462,11	2.281,91	4.721,56	7,89	9,40

Fonte: Próprio autor.

### 5.2.1. Valor do combustível

Ao contrário do cenário apresentado com o emprego exclusivo de diesel como combustível para a frota de ônibus, a frota movida a hidrogênio experimenta uma redução de 7,9% ao ano. Essa redução é atribuída ao avanço tecnológico relacionado ao desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono.

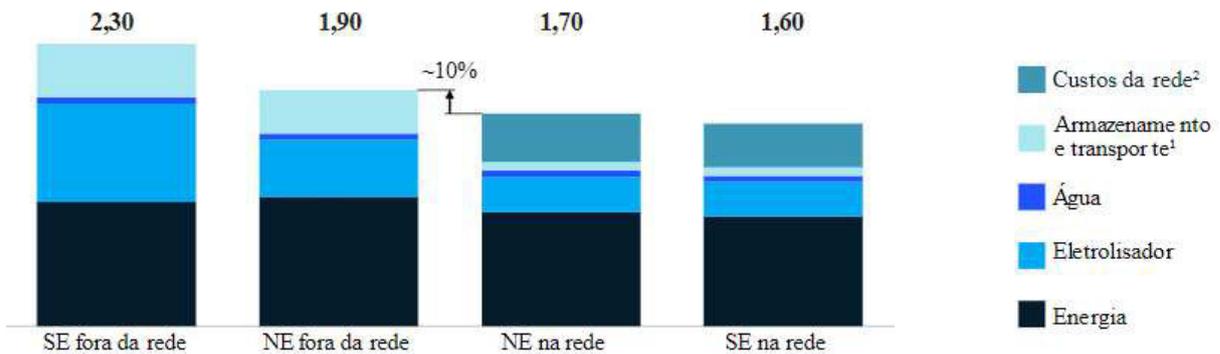
Segundo os dados divulgados em agosto de 2023 pela Clean Energy Latin America (Cela), o custo nivelado do hidrogênio verde produzido no Brasil (LCOH Brasil) está em torno de US\$ 2,87/kg e US\$ 3,56 atualmente, em algumas localidades estratégicas como é o caso do nordeste brasileiro. O próprio estudo destaca que com a otimizações e incentivos, os valores podem chegar em torno de 1,69 – 1,86 USD/kg.

Segundo o artigo Hidrogênio Verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo, publicado em 25 de novembro de 2021, pela McKinsey, mostra que O Brasil está entre os países mais competitivos para produção de hidrogênio verde no mundo: segundo nosso estudo, o custo nivelado do hidrogênio (LCOH) verde brasileiro ficaria ao redor de aproximadamente

1,50 USD/kg de H<sub>2</sub>V em 2030.

Para o estudo o valor do hidrogênio adotado para 2030 foi de 1,70 USD/kg adotando a localização para o nordeste brasileiro e a conexão ao SIN, conforme pode-se observar na Figura 15.

Figura 15: LCOH em 2030 no Brasil.



Fonte: McKinsey, 2021.

Para o cálculo da tarifa com o uso do hidrogênio como solução de combustível, adotou-se que os valores unitários do ônibus decaem na mesma proporção do valor do combustível tendo em vista a evolução da tecnologia e os incentivos previsto no PNE 2050. Sendo assim, a taxa de decaimento ano a ano ficou de 7,9%. Os dados projetados encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20: Valores para H<sub>2</sub>V e FCEBs 2021-2030.

Ano	H <sub>2</sub> V (US\$/Kg)	US\$ Ônibus novo
2021	3,56	350.877,72
2022	3,28	323.158,38
2023	3,02	297.628,87
2024	2,78	274.116,19
2025	2,56	252.461,01
2026	2,36	232.516,59
2027	2,17	214.147,78
2028	2,00	197.230,10
2029	1,84	181.648,93
2030	1,70	167.298,66

Fonte: Próprio autor.

Para a equalização dos valores entre dólar americano comercial e o real, foram datados os dados de cotação de 1995 a 2023 da Secretaria da Receita Federal e do Banco Central, assim, através de uma proposta de interpolação pelo software

Excel, encontrou-se os seguintes valores de cotação previsto até o horizonte 2030. Os valores estatísticos para os cálculos da cotação são apresentados na Tabela 21, e os valores do ônibus novo e no valor do hidrogênio são apresentados na Tabela 22.

Tabela 21: Valores estatístico para cotação R\$/US\$

<b>Estatística</b>	<b>Valor</b>
Alpha	0,75
Beta	0,00
Gamma	0,00
MASE	2,56
SMAPE	0,15
MAE	0,62
RMSE	0,70

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22: Valores corrigidos para o real (R\$).

<b>Ano</b>	<b>Valor da cotação em reais (R\$/US\$)</b>	<b>Valores simulados (R\$/US4)</b>	<b>H2V (R\$/Kg)</b>	<b>FCEBs novo (R\$)</b>
2021	5,32	5,32	18,94	1.866.555,44
2022	5,23	5,23	17,16	1.691.222,45
2023	4,19	4,19	12,65	1.247.042,64
2024	-	4,31	11,98	1.180.742,58
2025	-	4,42	11,33	1.117.135,14
2026	-	4,54	10,72	1.056.208,66
2027	-	4,66	10,13	997.936,52
2028	-	4,78	9,56	942.279,59
2029	-	4,90	9,02	889.188,32
2030	-	5,01	8,51	838.604,71

Fonte: Próprio autor.

### 5.2.2. Evolução da tarifa

Para o segundo cenário, o hidrogênio foi colocado o único combustível para o transporte rodoviário urbano de Fortaleza em 2030. Para este cenário, mantendo os dados apresentados na Tabela 19, considerando que obrigatoriamente que toda a frota será de ônibus movidos a célula a combustível de hidrogênio, para o cálculo da tarifa, tendo em vista os valores projetados, foram encontradas as seguintes taxas do transporte público, segundo a Tabela 23. Vale ressaltar que como não constam dados sobre os valores de H2V para 2021 e 2022, estes não foram considerados nas

projeções.

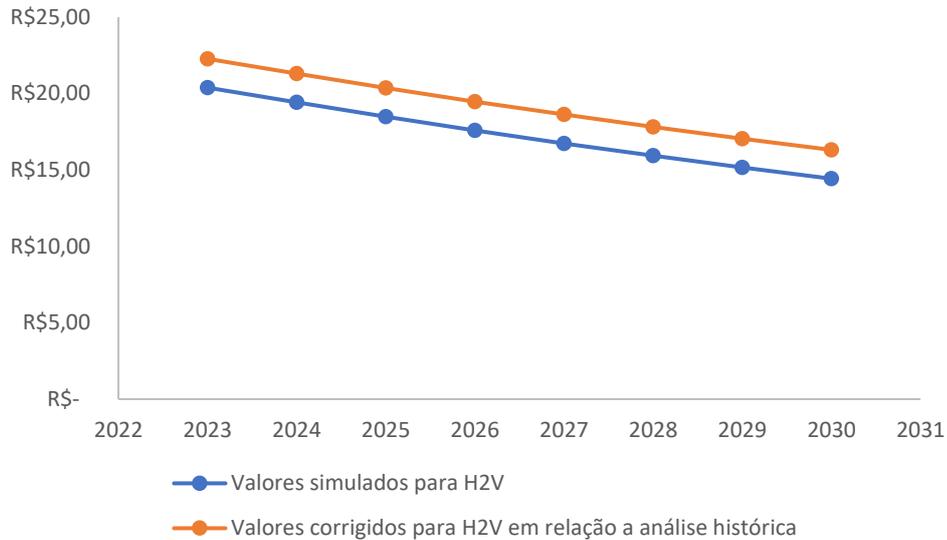
Tabela 23: Tarifa com o uso de hidrogênio

<b>Período</b>	<b>Valores simulados para H2V (R\$)</b>
2023	20,39
2024	19,42
2025	18,48
2026	17,59
2027	16,74
2028	15,94
2029	15,16
2030	14,43

Fonte: Próprio autor

Ao considerar diferentes cenários de projeção de crescimento da tarifa, notou-se que os **Valores simulados para H2V** possuem uma taxa anual decrescente da tarifa de – 4,82%, isto por conta de investimentos tecnológicos, econômicos e legais previstos para o H2V PNE 2050. Entretanto, valores de acordo com a série histórica apresentada pela ETUFOR a média de crescimento anual é de 9,25%. Sendo assim, para que os valores simulados possam convergir com a série histórica para a tarifa, foi realizada um incremento de 9,25% em cada um dos valores simulados para que eles possam exprimir melhor a realidade de acordo com o crescimento histórico. Com isso, optou-se por seguir com os **Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica**, resultante dessa opção de correção dos valores simulados, (resultando em um valor da tarifa de 16,32 reais em 2030), ver Gráfico 4.

Gráfico 4: Tarifa com o uso de H2V ao longo dos anos.



Fonte: Próprio autor

### 5.2.3. Emissões de CO<sub>2</sub>

No âmbito das emissões de GEE em especial o CO<sub>2</sub>, a concretização no cenário 2 para o ano de 2030 faria com que mais de **151 mil toneladas de CO<sub>2</sub>** em fossem evitadas pelo transporte público coletivo da cidade de Fortaleza. Dessa forma, segundo PAIVA, 2021 onde a valoração do CO<sub>2</sub> é de 108,21 US\$/t, têm-se que para 2030 as toneladas de CO<sub>2</sub> não emitidas representam uma economia de mais de 82 milhões de reais ver Tabela 24.

Tabela 24: R\$ evitados com a doção do Cenário 2.

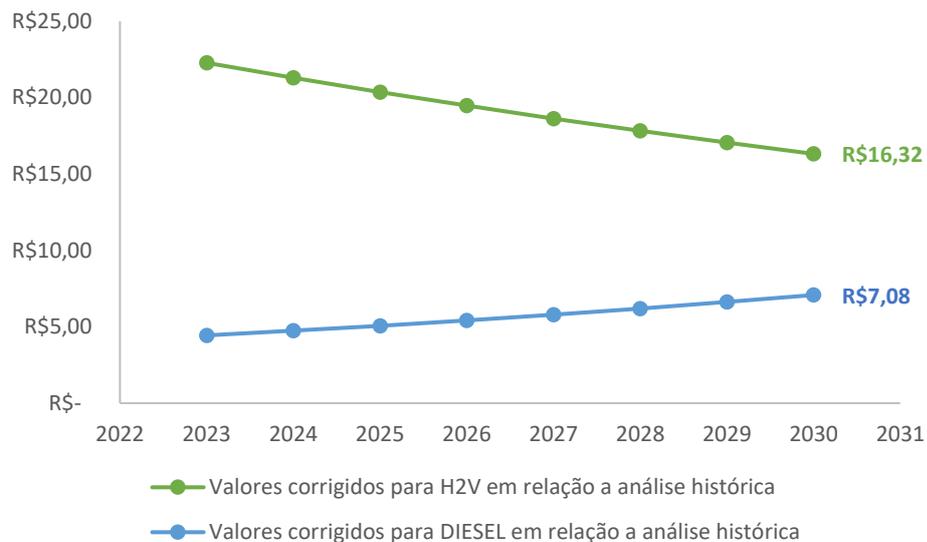
Ano	Toneladas de CO <sub>2</sub> emitidas por ano (Cenário 1)	Valores economizados (cenário 2)
2021	110.900,00	R\$ 63.838.700,58
2022	114.820,63	R\$ 65.023.845,01
2023	118.838,12	R\$ 53.880.226,24
2024	123.093,39	R\$ 57.374.994,22
2025	127.384,31	R\$ 60.995.067,80
2026	131.923,69	R\$ 64.846.413,26
2027	136.575,52	R\$ 68.869.925,37
2028	141.416,70	R\$ 73.109.642,87
2029	146.377,43	R\$ 77.535.829,13
2030	151.537,15	R\$ 82.196.123,45

Fonte: Próprio autor

## 6. Comparação entre os cenários

Em relação aos valores de tarifa adotados, tanto para Diesel quanto para H2V, para o horizonte de 2030, os valores para diesel encontram-se mais baixos que para hidrogênio verde, conforme apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5: Comparação entre as tarifas para H2V e DIESEL.



Fonte: Próprio autor

Como forma de correlacionar os dados das tarifas com o conceito de pegada de carbono sendo introduzido no mercado brasileiro, foram realizadas novas simulações para verificar a interferência da valoração dos GEE (apenas o dióxido de carbono foi avaliado) na tarifa final dos passageiros. Assim, calculou-se o valor que as emissões do CO<sub>2</sub> acarretariam na tarifação do transporte público, ver Tabela 25. O cálculo levou em consideração o total anual emitido dividido pelo número total de passageiros no ano correspondente.

Tabela 25: Valor em reais da emissão de CO<sub>2</sub> por passageiros

Período	Valoração da emissão de CO <sub>2</sub> por passageiros
2023	R\$ 4,82
2024	R\$ 4,97

2025	R\$ 5,12
2026	R\$ 5,28
2027	R\$ 5,43
2028	R\$ 5,59
2029	R\$ 5,74
2030	R\$ 5,90

Fonte: Próprio autor

Logo, para aferir sobre o impacto da pegada de carbono na comparação dos cenários, o valor em reais da emissão de CO<sub>2</sub> por passageiros relativa a cada ano foi debitada do valor da tarifa de H2V, obtendo-se assim o **Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica com a pegada de carbono** (resultando em um valor da tarifa de 10,42 reais em 2030), conforme pode ser observado na Tabela 26.

Tabela 26: Valores corrigidos com a pegada de carbono

Período	Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica	Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica com a pegada de carbono	Valoração da emissão de CO <sub>2</sub> por passageiros
2023	R\$ 22,28	R\$ 17,46	R\$ 4,82
2024	R\$ 21,31	R\$ 16,33	R\$ 4,97
2025	R\$ 20,37	R\$ 15,24	R\$ 5,12
2026	R\$ 19,48	R\$ 14,20	R\$ 5,28
2027	R\$ 18,63	R\$ 13,19	R\$ 5,43
2028	R\$ 17,83	R\$ 12,24	R\$ 5,59
2029	R\$ 17,05	R\$ 11,30	R\$ 5,74
2030	R\$ 16,32	R\$ 10,42	R\$ 5,90

Fonte: Próprio autor

Entretanto, apesar da tarifa H2V ficar mais atrativa com o uso da pegada de carbono, ainda se apresenta mais cara que a tarifa utilizando o diesel para o horizonte de 2030. A Tabela 27 demonstra de forma mais didática a importância da utilização do mercado de carbono para o valor da tarifa de transporte público urbano de Fortaleza.

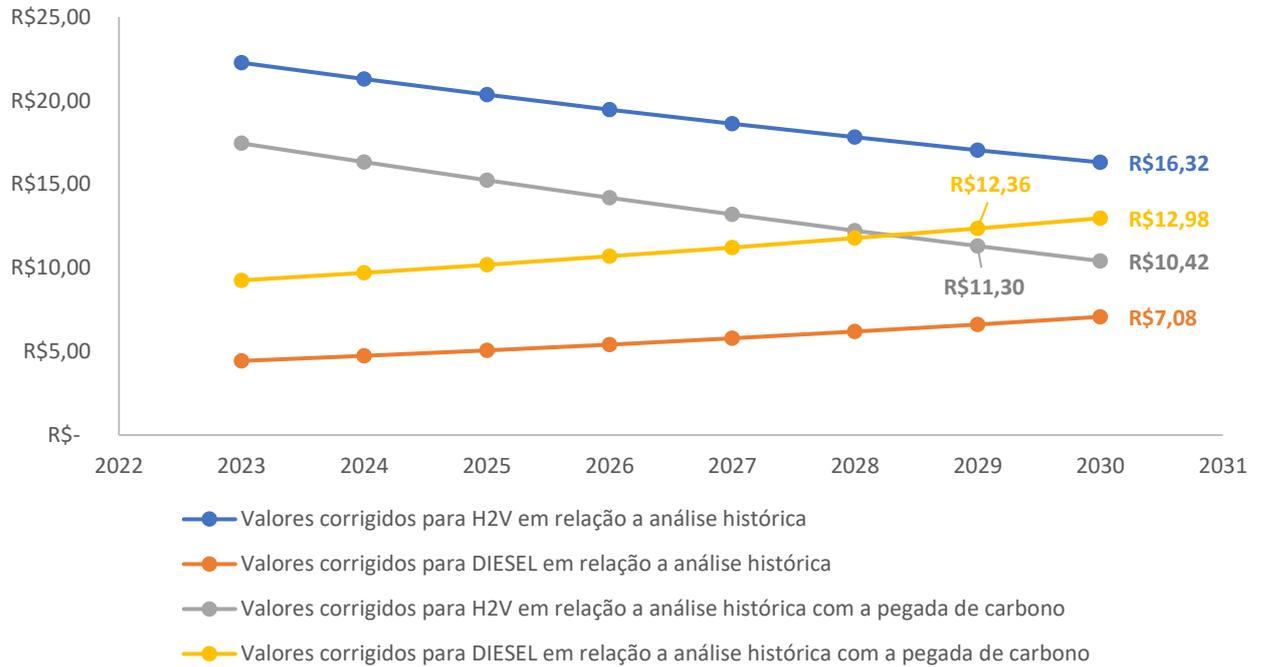
Tabela 27: Valores das tarifas com a pegada de carbono

<b>Período</b>	<b>Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica</b>	<b>Valores corrigidos para DIESEL em relação a análise histórica</b>	<b>Valores corrigidos para H2V em relação a análise histórica com a pegada de carbono</b>	<b>Valores corrigidos para DIESEL em relação a análise histórica com a pegada de carbono</b>
2023	R\$ 22,28	R\$ 4,43	R\$ 17,46	R\$ 9,26
2024	R\$ 21,31	R\$ 4,74	R\$ 16,33	R\$ 9,72
2025	R\$ 20,37	R\$ 5,07	R\$ 15,24	R\$ 10,19
2026	R\$ 19,48	R\$ 5,42	R\$ 14,20	R\$ 10,70
2027	R\$ 18,63	R\$ 5,79	R\$ 13,19	R\$ 11,22
2028	R\$ 17,83	R\$ 6,19	R\$ 12,24	R\$ 11,78
2029	R\$ 17,05	R\$ 6,62	R\$ 11,30	R\$ 12,36
2030	R\$ 16,32	R\$ 7,08	R\$ 10,42	R\$ 12,98

Fonte: Próprio autor

Admitindo o cenário onde apenas o hidrogênio serve-se do desconto da pegada de carbono e o diesel não seja penalizado, na mesma projeção para anos vindouros, pode-se inferir que em 2030 a taxa da tarifa para o hidrogênio não bate a do diesel, entretanto em poucos anos após 2030 o valor da tarifa a H2V será mais competitivo que a diesel, conforme pode-se observar no Gráfico 6.

Gráfico 6: Evolução das tarifas com a pegada de carbono.



Fonte: Próprio autor

Agora, admitindo o cenário onde o hidrogênio serve-se do desconto da pegada de carbono e o diesel é penalizado, pode-se inferir que em 2029 a taxa da tarifa para o hidrogênio já se torna mais econômica que a do diesel, com o valor de R\$ 11,30 para o H2V e de R\$ 12,36 para o diesel. Para o horizonte de 2030, tem-se a tarifa com H2V de 10,42 reais e para o diesel de 12,98 reais, significativa diferença de R\$ 2,56 para o cidadão de Fortaleza.

## 7. CONCLUSÃO

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.

Este estudo teve como objetivo a quantificação dos custos da tarifa de ônibus e de redução de emissões de GEE, no horizonte de 2030, tendo como base o ano de 2021, considerando dois cenários, o *Business as Usual*, que considera a manutenção da frota movida a diesel, e o cenário de Descarbonização, que considera a substituição integral da frota de ônibus atual da cidade de Fortaleza por uma nova movida a H2V.

Ao avaliar os valores primeiramente simulados com a planilha do método NEC, constatou-se a necessidade de corrigir os valores das tarifas projetadas para que mais se aproximassem da tendência real de aumento das passagens de transporte público urbano. Essa escolha, derivada da correção dos valores simulados, conduz a uma tarifa projetada de 7,08 reais em 2030, convergindo assim para os padrões mais realistas com base na análise histórica da ETUFOR.

No tocante às propostas de projeção para a tarifa do H2V, os valores simulados indicam uma taxa anual decrescente impulsionada por investimentos tecnológicos, econômicos e legais previstos para o H2V no Plano Nacional de Energia 2050. Contudo, também se considerou a correção tarifária ocorrida no cenário 1 para refletir de maneira mais precisa a realidade do crescimento histórico. Isso foi resolvido em valores corrigidos para o H2V, culminando em uma tarifa projetada de 16,32 reais em 2030.

No contexto das emissões de GEEs, especialmente o CO<sub>2</sub>, a implementação do cenário 2 até 2030 resultaria na mitigação de mais de 151 mil toneladas de CO<sub>2</sub> no transporte público coletivo de Fortaleza. As toneladas de CO<sub>2</sub> não emitidas representariam uma economia de mais de 82 milhões de reais em 2030.

Para correlacionar os dados das tarifas com o conceito de pegada de carbono, introduzido no mercado brasileiro, foram realizadas novas simulações para verificar a influência da valorização dos GEEs (apenas o dióxido de carbono foi avaliado) na tarifa final dos passageiros. O cálculo levou em consideração o total anual emitido, dividido pelo número total de passageiros no ano correspondente.

Este trabalho se ateve a quantificar os custos da tarifa de ônibus, assim como a redução de emissões de GEE, no horizonte de 2030, tendo como base o ano de 2021, no caso da substituição integral da frota de ônibus atual da cidade de Fortaleza por uma nova movida a H2V. Entretanto, diante da ausência de dados públicos e de literatura relaciona ao tema da inserção do hidrogênio no âmbito do transporte público urbano, muitas premissas foram adotadas e dados foram aproximados, o que é uma limitação do trabalho podendo gerar sub ou superdimensionamento das variáveis.

Entretanto, mesmo com a tarifa H2V se tornando mais atrativa com a inclusão da pegada de carbono, ainda se apresenta mais onerosa em comparação com a tarifa utilizando diesel para o horizonte de 2030. O horizonte sugerido para 2030 é de curto prazo, mas já apresenta que a utilização do hidrogênio é promissora e competitiva a longo prazo.

Agora, ao considerar o cenário em que o hidrogênio se beneficia de incentivos associados à redução da pegada de carbono, enquanto o diesel é submetido a penalidades, é possível deduzir que, até o ano de 2029, a tarifa para o hidrogênio torna-se mais econômica que a do diesel. Os valores estimados indicam uma taxa de R\$ 11,30 para o H2V e R\$ 12,36 para o diesel nesse ano. Projetando para o horizonte de 2030, observa-se uma tarifa de R\$ 10,42 para o H2V, em comparação com os R\$ 12,98 do diesel, resultando em uma diferença significativa de R\$ 2,56 para os cidadãos de Fortaleza.

Este contexto destaca não apenas a viabilidade econômica do hidrogênio como combustível, mas também o potencial para influenciar positivamente a dinâmica tarifária, apresentando uma alternativa mais acessível para o transporte público.

A expressão de tais resultados reforça a importância da integração de tecnologias inovadoras, como o H2V, no setor de transportes, não apenas como uma solução ambientalmente sustentável, mas também como uma opção economicamente vantajosa para os cidadãos. Este estudo não apenas aponta para a eficiência do hidrogênio como uma alternativa de energia, mas também sublinha a necessidade contínua de políticas públicas e investimentos no desenvolvimento tecnológico, visando promover uma transição sustentável no transporte público, alinhada com os imperativos ambientais e econômicos da atualidade.

Sendo assim outros assuntos são importantes para serem abordados, no panorama do hidrogênio, são: os impactos socioeconômicos na população adotando

o hidrogênio de baixo carbono como o combustível da frota de ônibus como o Índice de Qualidade de Vida; os Impactos ambientais com a utilização da água para o processo de eletrolise em grande escala. Por fim, a comparação da eficiência energética entre o hidrogênio e o etanol, no quesito de combustível para a frota de ônibus para verificar a viabilidade da implementação massiva do hidrogênio como combustível.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/atlas>. Acesso em: 13 jun. 2023.

AJANOVIC, A.; GLATT, A.; HAAS, R.. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. *Energy*, [S.L.], v. 235, p. 121340, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>.

Bonan, G. B. (2019). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 363(6434), eaau8231.

Bony, S., Stevens, B., Ament, F., Bigorre, S., Chazette, P., Crewell, S., Delanoë, J., Emanuel, K., Farrell, D., Flamant, C., Gross, S., Hirsch, L., Karstensen, J., Mayer, B., Nuijens, L., Ruppert Jr., J. H. M., Sandu, I., Siebesma, P., Speich, S., Szczap, F., Totems, J., Vogel, R., Wendisch, M., & Wirth, M. (2021). A Better Understanding of Clouds and Precipitation in the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). *Nature*, 583(7818), 379-385.

BOUCKAERT, S. et al. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. 2021.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2010. Disponível em: [https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio\\_energetico\\_completo\\_22102010\\_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5](https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5). Acesso em: 18 jun. 2023.

Chaffin, C., Howarth, R., Ziegler, C., & Allwood, J. (2020). Green hydrogen: A guide to its production and use. Carbon Trust. Disponível em: <https://www.carbontrust.com/media/46748/ctc846-the-green-hydrogen-primer.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2023.

DELOITTE CHINA. Fueling the Future of Mobility. Hydrogen and fuel cell solutions for

transportation. Vol. 1, 2020.

Department of Energy. Hydrogen Posture Plan: An Integrated Research, Development and Demonstration Plan. Disponível em: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/30306posture\\_plan.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/30306posture_plan.pdf). Acesso em: 13 jun. 2023.

Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Duffy, J. E., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N. N., Sydeman, W. J., & Talley, L. D. (2020). Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 12, 251-284.

Ecoinvent. (2019). Database Documentation for Ecoinvent Database Version 3.7. Acessado em 13 de jun. de 2023, disponível: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (2020). Plano Nacional de Energia 2050: Horizontes Energéticos. Acessado em 13 de jun. de 2023, disponível: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/planos-nacionais-de-energia/planos-nacionais-de-energia-2050-horizontes-energeticos>.

ETUFOR. Dados estatísticos - frota operante por tipo de serviço. Disponível em: <https://www.fortalbus.com/2016/05/dados-estatisticos-frota-operante-por.html>. Acesso em: 13 jun. 2023.

European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Disponível em: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans/hydrogen-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans/hydrogen-strategy_en). Acesso em: 13 jun. 2023.

GAMBETTA, F. Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu. 2010. 163 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

García-Alonso, M., et al. (2021). Green hydrogen: Production, storage, and applications. *Energies*, 14(13), 3903.

Governo do Estado do Ceará. Política de Inovação Tecnológica do Estado do Ceará. Disponível em: [https://www.gestao.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2022/09/politica\\_de\\_inovacao\\_tecnologica\\_governo\\_do\\_estado\\_do\\_ceara.pdf](https://www.gestao.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2022/09/politica_de_inovacao_tecnologica_governo_do_estado_do_ceara.pdf). Acesso em: 13 jun. 2023.

Green Hydrogen: a guide to its production and use. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2019. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_Green_hydrogen_2019.pdf). Acesso em: 14 jun. 2023.

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: 18 jun. 2023.

IEA (International Energy Agency). (2021). The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. Acessado em 13 de jun. de 2023, disponível: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

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

IPLANFOR. Plano Fortaleza 2040. Disponível em: <https://planofortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 13 jun. 2023.

LOWRY, J., LARMINIE, J. Electric vehicle technology explained. Hoboken, N.J.: Wiley. 2012.

Lu, Y., et al. (2020). Advances in hydrogen storage technologies for sustainable energy

systems: A review. *Applied Energy*, 278, 115604.

Ministério de Minas e Energia. Estratégia Nacional de Combustíveis Renováveis (ENCR). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/energias-renovaveis/encr-estrategia-nacional-de-combustiveis-renovaveis>. Acesso em: 13 jun. 2023.

Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). Basic Hydrogen Strategy. Disponível em: [https://www.meti.go.jp/english/press/2018/pdf/0625\\_002b.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2018/pdf/0625_002b.pdf)

MIRANDA, P. E. V. de. *Science and engineering of hydrogen-based energy technologies*. [S.l.]: Elsevier, 2019.

MIRANDA, P. E. V. de. *Science and engineering of hydrogen-based energy technologies*. [S.l.]: Elsevier, 2019.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2022). Global Temperature. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>. Acessado em 13 de jun. de 2023.

NEOCHARGE. Tipos de veículos elétricos. 2022. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 18 Jun 2023.

NETO, E. H. G. *Hidrogênio: evoluir sem poluir; a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível*. [S.l.]: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

NETO, R. L.; MOREIRA, J. R. S. *Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água*. Portal de química. *Leis da Eletrólise*, 2007.

Nogueira, E. M., Latawiec, A. E., de Araújo Barbosa, C. C., do Nascimento, N. C., de Abreu, M. C., de Castro, V. L., & Figueiredo, R. O. (2020). The Impacts of Fertilizer Use on Climate Change: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 1-17.

PALHARES, D. D. et al. *Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e*

energia solar. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

SANTOS, L. O. Propriedades estruturais e texturais de catalisadores anódicos alternativos para célula a combustível de óxido sólido (sofc). 2018.

Santos, R. M. et al. (2022). Economic and environmental analysis of large-scale green hydrogen production in Brazil for exportation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112954.

SILVA, P. d. M. A história, desenvolvimento e trajetória das células a combustível. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.

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.

TARHAN, E.; KARAPINAR, G.; DINÇER, İ. Hydrogen Economy in Germany: Current Status and Future Perspectives. *Energy Reports*, v. 6, p. 1931-1938, 2020.

TOYOTA. Toyota mirai breaks world record for distance driven with one fill of hydrogen. 2021.

United Nations. Paris Agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 13 jun. 2023.

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012.

VARGAS, R. A. et al. Uma visão da tecnologia de células a combustível. 2006.

VIDAS, L.; CASTRO, R. Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 11363, v. 11, n. 23, p. 11363, 1 dez. 2021.

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

ETUFOR, 2023. <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/etufor-divulga-novos-valores-da-tarifa-de-onibus-para-2023-em-fortaleza>.

Luz, Gelson. Densidade Hidrogênio (e meu Infográfico!). *Materiais por Gelson Luz*, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/densidade-hidrogenio.html>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.