

## **A TECNOLOGIA FULL CELL ELECTRIC BUS (FCEB) NA ELETROMOBILIDADE: UMA COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS E SEUS IMPACTOS NA OPERAÇÃO**

**Gabriel Santos Rodrigues - UNIP**  
biel.rodrigues@outlook.com

**João Gilberto Mendes dos Reis - UNIP / UPM**  
joao.reis@docente.unip.br

**Sivanilza Teixeira Machado - IFSP-Campus Suzano**  
sivanilzamachado@ifsp.edu.br

**Fabrcio Henrique do Nascimento da Silva - UNIP**  
fhns1410@gmail.com

**Daniele dos Santos Ramos Xavier - UNIP**  
daniele.xavier4@aluno.unip.br

### **Resumo**

A energia elétrica é atualmente a principal alternativa aos combustíveis fósseis para redução das emissões das frotas veiculares. Nas frotas de ônibus, os veículos elétricos já são utilizados há um certo tempo. Atualmente Trólebus e Ônibus Elétricos a Bateria (BEBs) estão em operação no Brasil, porém possuem limitações operacionais, os trólebus precisam de rede aérea para operar, pelo menos em parte de seu caminho e os BEBs dependem da autonomia de energia disponível em suas baterias. Uma alternativa a essas limitações são os ônibus elétricos com célula de combustível, em inglês Full Cell Electric Bus (FCEB), uma tecnologia híbrida, que utiliza célula de combustível de hidrogênio para dar autonomia ao motor elétrico. Desse modo, esse estudo propõe comparar os modelos existentes de Zero Emission Buses (ZEBs), em especial o FCEB, com o Trólebus e o BEB verificando suas vantagens e desvantagens e melhor desempenho operacional para cada um desses modelos. Os resultados indicaram que os FCEBs são promissores para médias e longas distâncias, mas ainda não são competitivos com os BEBs para curtas e médias distâncias e os Trólebus são importantes e ideais para linhas de alta demanda e corredores exclusivos devido ao custo da infraestrutura necessária

Palavras-chave: Ônibus sem emissões; Trólebus; Ônibus Elétrico a Bateria; Ônibus a hidrogênio; Ônibus Elétrico.

## **Abstract**

Electricity is currently the main alternative to fossil fuels for reducing emissions from vehicle fleets. Electric vehicles have been used in bus fleets for some time. Trolleybuses and Battery Electric Buses (BEBs) are currently in operation in Brazil, but they have operational limitations: trolleybuses need an aerial network to operate, at least on part of their route, and BEBs depend on the autonomy of the energy available in their batteries. An alternative to these limitations is the Full Cell Electric Bus (FCEB), a hybrid technology that uses a hydrogen fuel cell to power the electric motor. This study therefore sets out to compare the existing Zero Emission Bus (ZEB) models, especially the FCEB, with the Trolleybus and BEB, checking their advantages and disadvantages and the best operational performance for each of these models. Finally, it was found that FCEBs are promising for medium and long distances, but are not yet competitive with BEBs for short and medium distances, and that trolleybuses are important and ideal for high-demand lines and exclusive corridors due to the cost of the necessary infrastructure

Keywords: Zero Emission Buses; Trolleybuses; Battery Electric Buses; Full Cell Electric Buses; Electric Buses.

## **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de energia elétrica é atualmente a principal alternativa aos combustíveis fósseis para redução das emissões das frotas veiculares. Nas frotas de ônibus, os veículos elétricos já são utilizados há um certo tempo. No Brasil, os trólebus, modelos elétricos que operam conectados a uma rede aérea estão em operação desde 1949, e diferente do que se pensa os veículos a bateria os Ônibus Elétricos a

Bateria, também foram comuns no início do século XX, antes da maturação do motor a combustão (NTU, 2019).

Em comum, esses dois modelos de ônibus possuem limitações operacionais, os trólebus precisam de rede aérea para operar, pelo menos em parte de seu caminho e os Ônibus Elétricos a Bateria ou (*Battery Electric Buses –BEBs*) dependem da autonomia de energia disponível em suas baterias, indispensável para esse tipo de veículo se movimentar.

Uma alternativa a essas limitações são os ônibus elétricos com célula de combustível, em inglês *Full Cell Electric Bus (FCEB)*. Esse modelo utiliza tecnologia híbrida, diferentemente dos modelos híbridos, que utilizam um motor a combustão para dar autonomia ao motor elétrico, ele possui uma célula de combustível de hidrogênio que fornece a energia para tracionar o veículo. Para Ajanovic; Glatt; Haas (2021) esse modelo de ônibus pode economizar cerca de 93% das emissões de CO<sub>2</sub> em comparação aos ônibus diesel.

Para Wagner e Walther (2024) os ônibus movidos a célula de hidrogênio podem atender a mais requisitos operacionais em termos de alcance e carregamento, do que os ônibus elétricos a bateria, e podem aumentar a eficiência de um sistema de transportes sem emissões de gases. Para Dong et al. (2023) esses modelos de ônibus são promissores para a descarbonização do transporte público.

Para neutralizar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a prefeitura de São Paulo aposta nos BEBs e estuda suprimir a tradicional frota de trólebus da cidade (SANT'ANNA, 2023). Já na Região Metropolitana, o corredor São Mateus – Jabaquara, que liga a Região do ABC à capital, receberá novos trólebus ainda esse ano. Dessa forma os ônibus a célula de combustível podem complementar uma frota de BEBs que possuem autonomia limitada, criando uma alternativa para determinadas rotas (BLADES et al., 2022).

Desde 2006, a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos), vem desenvolvendo um projeto de ônibus movido a célula de hidrogênio. Entre 2009 e 2010 houve testes com uma frota de protótipos no corredor São Mateus - Jabaquara com um custo de U\$\$ 16 milhões na época, já em 2023 esse projeto foi retomado

com participação de pesquisadores da USP (Universidade de São Paulo) que irão monitorar as operações (EMTU, 2023).

Já na Europa, em janeiro de 2023, estavam em operação 370 ônibus com célula de combustível em operação e planos de chegar a mais de 1200 em 2025. Além das linhas de ônibus urbanos, esse modelo também é indicado para rotas de média e longa distância, porém os custos ainda são uma barreira, pois um ônibus Full Cell é 2,3 vezes mais caro do que um ônibus a bateria (SUSTAINABLE BUS, 2024).

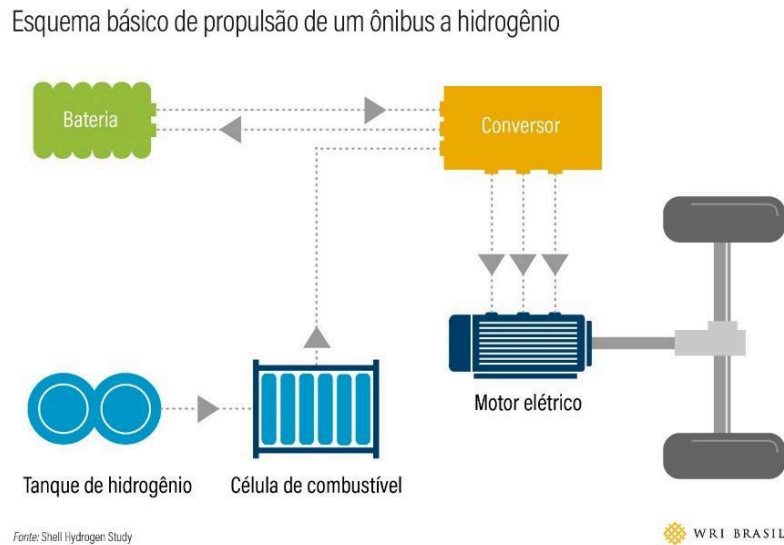
Desse modo esse estudo propõe comparar os modelos existentes de *Zero Emission Buses (ZEBs)*, em especial o FCEB, com o Trólebus e o BEB verificando suas vantagens e desvantagens e melhor desempenho operacional e qual a melhor aplicabilidade para cada um desses modelos.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Full Cell Electric Bus (FCEB) – Ônibus Movido a Célula De Combustível de Hidrogênio**

Um ônibus movido a célula de combustível de hidrogênio ou Full Cell Electric Bus (FCEB) é um ônibus elétrico que inclui uma célula de combustível e uma bateria (ou, em alguns casos, um supercapacitor) para se locomover. Essa é uma tecnologia híbrida que usa a célula de combustível de hidrogênio para fornecer a maior parte da energia para operação do veículo, enquanto a bateria auxilia o veículo quando é necessário aumentar o consumo de energia, como no caso, de uma aceleração rápida ou alguma subida (STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020). Esse processo pode ser visualizado de maneira simplificada na Figura 1.

**Figura 1:** Esquema básico de propulsão de um ônibus a hidrogênio



Fonte: Souza; Petzhold; Albuquerque (2021).

Assim quando o motorista dá partida no ônibus, o hidrogênio armazenado nos tanques internos do ônibus, é fornecido para a bateria, as moléculas de hidrogênio são separadas em íons de hidrogênio com carga positiva e elétrons que possuem carga negativa no ânodo, após esse processo os íons de hidrogênio passam pela membrana de troca de prótons e os elétrons passam por um circuito externo onde geram eletricidade (KARSAN, 2023).

Após esse processo os íons de hidrogênio e os elétrons se recombinam no cátodo da célula de combustível com o oxigênio do ar, produzindo calor e água. A energia é gerada a partir de uma reação eletroquímica, onde o hidrogênio é consumido e os subprodutos resultantes são apenas calor e água (KARSAN, 2023; STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020). As células de combustível são consideradas uma solução para ônibus elétricos urbanos quando são necessárias uma autonomia elevada (MERCEDES-BENZ BUSES, 2024).

O uso de células de combustível, não é recente, é um trabalho que vem sendo pesquisado e desenvolvido por quase dois séculos. Há uma controvérsia sobre autoria da invenção da célula de combustível de hidrogênio, mas várias fontes de literatura apontam que foi Sir. William Robert Grove, desenvolveu esse processo,

influenciado pelos estudos de Sir. William Nicholson e Anthony Carlisle sobre eletrólise da água (ANDÚJAR; SEGURA, 2009).

Mesmo com o petróleo abundante e barato e quando a poluição ambiental não era discutida, provavelmente outros campos da ciência e tecnologia, aplicações militares e espaciais mantiveram interesse no desenvolvimento das células de combustível para atender às suas necessidades (ANDÚJAR; SEGURA, 2009).

A tecnologia de célula de combustível, pode fornecer uma autonomia, entre 300 e 500 km, para um ônibus, aliados a uma bateria de tração relativamente pequena eles são capazes de recuperar energia na frenagem, aumentando a autonomia. Um tanque de hidrogênio tem capacidade entre 30 e 50 kg de hidrogênio comprimido, geralmente armazenado em tanques de pressão a 350 bar (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024).

O consumo médio de combustível é de 8 Kg por 100 km (com uma variação entre 6 e 11 kg), dando uma vantagem energética de cerca de 40% em comparação ao ônibus diesel. O uso de células de combustível de hidrogênio contribui para o desenvolvimento técnico e econômico dessa tecnologia no transporte rodoviário, podendo também ser transferido para outros modelos de veículos comerciais (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024).

## **2.2 Trólebus e Ônibus Elétrico a Bateria – BEB**

Trólebus (Figura 2) e Ônibus elétricos a Bateria (Figura 3) são as tecnologias de ônibus zero emissões utilizadas no Brasil. Os trólebus estão em operação no Brasil desde 1949, e são carregados dinamicamente através de uma rede aérea. A estrutura dos bondes facilitou a sua implantação e os pneus faziam com eles fossem mais flexíveis podendo desviar de algo que estivesse pelo caminho e facilitava o embarque de passageiros se aproximando da calçada (GRIGORIEVA; NIKULSHIN, 2023).

Os trólebus são importantes para a substituição dos combustíveis fósseis no transporte público, e com a tecnologia In Motion Charging (IMC) que permite que esses veículos operem por trechos desconectados da rede aérea utilizando packs

de baterias menores do que os BEBs e que recarrega quando se conectam novamente a rede, estão se tornando uma alternativa interessante nos países europeus que pretendem zerar emissões e possuem estrutura de rede aérea disponível (BARTŁOMIEJCZYK; POŁOM, 2021).

Na América Latina, México e Brasil possuem as duas maiores frotas de trólebus disponíveis em operação. No México em julho de 2024, a frota era de 694 veículos desse modelo, no Brasil a frota é de 302 trólebus, concentrados na Região Metropolitana de São Paulo (E-BUS RADAR, 2023).

A Cidade de São Paulo conta com 201 trólebus em operação, em 10 linhas e atendendo 8 milhões de passageiros por mês (SANT'ANNA, 2023), na Região Metropolitana existem mais 96 veículos que estão em operação no corredor São Mateus – Jabaquara, que liga a Zona Leste e a Zona Sul, da cidade de São Paulo passando pelas cidades de Diadema, Mauá, Santo André e São Bernardo do Campo (E-BUS RADAR, 2023).

**Figura 2: Trólebus**



Fonte: Zanon (2013).

Já os veículos elétricos a bateria, eram bem comuns antes da consolidação dos modelos de motor a combustão, naquela época um dos seus problemas era a baixa

autonomia desses veículos, com a necessidade de se reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa, eles se tornaram uma alternativa atraente para e estão sendo desenvolvidos cada vez mais rápido nos últimos anos com a China investindo pesadamente para atender os mercados local e mundial (NTU, 2019).

**Figura 3:** Ônibus Elétrico a Bateria



Fonte: Volvo (2024).

Os testes com ônibus elétricos a bateria na cidade de São Paulo se iniciaram no final de 2013, produzido pela BYD, o veículo possuía uma autonomia nominal de 250 km (PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO, 2013).

A EMTU, que também faz a gestão do corredor São Mateus - Jabaquara, em 2014, testou um ônibus articulado a bateria de 18 metros, entre Diadema e o Brooklin, esse veículo apresentava uma autonomia de bateria nominal de 220 km, com recargas longas na garagem e recargas curtas de oportunidade de 4 minutos durante as viagens (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Em dezembro de 2018, os ônibus elétricos a bateria, passaram a operar comercialmente na Zona Sul da Cidade de São Paulo na linha 6030/10 UNISA - CAMPUS 1 - Term. Sto. Amaro.

No final de 2022, a Prefeitura de São Paulo proibiu a inclusão de novos ônibus movidos a diesel no sistema de transporte da cidade, o que expandiu a frota e fez com que mais fabricantes disponibilizaram ônibus elétricos a bateria em território brasileiro.

Em julho de 2024, existiam em 19 cidades pelo menos um BEB em operação sendo que em São Paulo, a maior cidade do país, também possui a maior frota 180 BEBs em operação (E-BUS RADAR, 2023)

Esse número poderia ser maior se não fossem as dificuldades como: a capacidade energética da rede elétrica que não é capaz de suportar a quantidade de ônibus da cidade de São Paulo, as adequações necessárias para que as garagens possam oferecer suporte para esse modelo de ônibus (mudança de layout, coberturas para instalação dos carregadores e isolamento do piso, além da necessidade de novos funcionários especializados nesse tipo de veículo (NESPOLI ET. AL., 2023; PETROCILO; PESCARINI, 2024).

### **2.3 Vantagens e Desvantagens entre os modelos de Ônibus Elétricos existentes – Trólebus, BEB E FCEB**

Para Di Vece et al. (2022), os fabricantes precisam tomar decisões estratégicas hoje em relação aos conjuntos de força e das opções de combustível para desenvolver soluções de mobilidade inteligente e verde no futuro, e que com o tempo os veículos elétricos serão mais competitivos em relação aos veículos a combustão.

Outro problema dos veículos elétricos é o descarte de baterias que estão no fim da vida útil, pois atualmente as tecnologias de reciclagem de baterias ainda atendem uma demanda muito baixa. Uma alternativa é a utilização dessas baterias como acumuladores de carga para prolongar sua vida útil (NAZARÉ, 2022).

Além da autonomia e da vantagem energética em relação aos BEBs, os FCEBs possuem uma variação menor de consumo em diferentes épocas do ano, já os BEBs perdem performance em dias mais quentes, porém em uma comparação direta os BEBs possuem uma maior eficiência energética que os FCEBs (ESTRADA POGGIO et al., 2023).

O FCEB, possui um tempo de carregamento menor em relação aos BEB. Os FCEBs são recarregados em um tempo semelhante ao de um ônibus diesel (HENSHER; MULLEY, 2015). Já os BEBs, para operarem precisam de carregamento noturno e, em alguns casos, recarregamento de oportunidade nas paradas (Figura 4) para completar suas operações (MOMCILOVIC; DIMITRIJEVIC; STOKIC, 2023).

**Figura 4:** Estação de Recarga



Fonte: Volvo (2024).

O custo de fabricação de um ônibus com tecnologia FCEB é alto, mas espera-se que ele seja reduzido com o aumento do volume de produção, além disso, estações de reabastecimento de hidrogênio (Figura 5) ainda não estão amplamente disponíveis, o que contribui, para um crescimento de frota mais lento que os BEBs (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024). Essa estrutura de estações de carregamento é necessária para que a implantação de uma frota de ônibus a hidrogênio seja bem-sucedida (WANG et al., 2021).

**Figura 5:** Estação de Recarga de Hidrogênio



Fonte: Bera (2024).

Outra questão levantada por Burke et al. (2023), é em quanto tempo o custo do hidrogênio se reduzirá no futuro, mas que a amortização do investimento com a eletrificação de frota de ônibus é mais rápida do que uma frota de caminhões por exemplo. Outro custo que ainda deve ser avaliado é o custo da infraestrutura de recarga que pode ser determinante para os projetos de se eletrificar com baterias ou com hidrogênio.

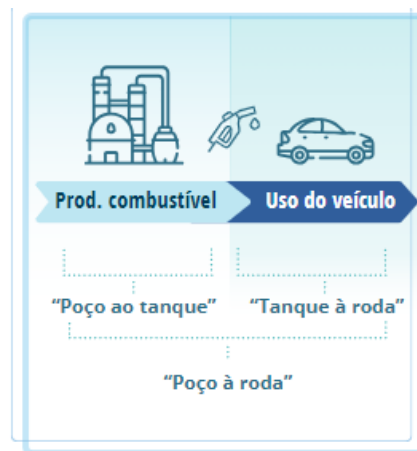
Já os trólebus, possuem a necessidade de rede área, mesmo os mais modernos e equipados com a tecnologia In Motion Charging (IMC), que permite que andem desconectados, ainda utilizam da rede, para recarregar suas baterias, pelo menos em parte de sua operação (GUNTER et al., 2019).

## **2.4 Well To Wheel (WTW) - A Eficiência Energética de um Veículo Elétrico**

As emissões de um veículo durante sua circulação é apenas uma parte da mensuração de sua eficiência. O processo completo é chamado do poço a roda (Well to Wheel – WTW ou W2W), ele analisa desde a obtenção do combustível na fonte primária o “poço” passando por toda a cadeia de energia até o consumo final nas rodas (SHEPARD, 2024).

Em muitas análises esse processo é dividido em dois seguimentos o do poço ao tanque (Well to Tank - WTT) e o do Tanque a Roda (Tank to Wheel - TTW). Na abordagem WTT é discutida a eficiência da produção do combustível utilizado até a operação dos veículos já na TTW é avaliada a eficiência do combustível na operação do veículo (Figura 6) (RODRIGUES et al., 2022).

**Figura 6:** Poço a Roda – Well to Tank -TTW



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Abreu (2023).

Li et al. (2016), verificaram que na China, quando as matrizes energéticas são renováveis, as eficiências entre veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio e movidos a bateria são próximas.

No Brasil, em agosto de 2024, considerando a região central onde se localiza a cidade de São Paulo, os dados de eficiência energética apontam para uma intensidade de emissão de carbono de 131g CO<sub>2</sub>eq/ kWh, sendo que 84% da energia consumida é de baixo carbono e 80% é renovável, predominantemente hidroelétrica. Esses números são menores que os da Alemanha que no mesmo período apresentou 306 CO<sub>2</sub>eq/ kWh sendo que 71% da energia consumida é de baixo carbono e 64% é renovável, porém com destaque que 21% do consumo da energia alemã foi proveniente de energia solar (ELECTRICITYMAP, 2024).

Rodrigues et al. (2022), verificaram que se a matriz energética de um veículo elétrico a bateria for baseada em energias renováveis como hidroelétrica ou solar e eólica elas apresentam valores de eficiência de 45,53 - 72,2% e 53,5 - 71,4% respectivamente.

Já para os FCEB o caminho passa pela forma de como o hidrogênio é obtido. Existem modos diferentes para a obtenção de hidrogênio e cada forma, também pode ser chamada de rota de produção, é representada por uma cor (Figura 7).

**Figura 7: Cores do Hidrogênio**



Fonte: Futuretransport (2023).

O Governo Federal através do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), utiliza o termo “hidrogênio de baixa emissão” que considera os hidrogênios produzidos de fontes renováveis, energia nuclear e fontes fósseis com captura de carbono. Nos Estados Unidos é utilizada a expressão hidrogênio limpo com uma meta de 4,0 kgCO<sub>2</sub>e/kgH<sub>2</sub> para as emissões de GEE associadas à produção de hidrogênio. Por outro lado, a Alemanha, optou pela nomenclatura de cor privilegiando incentivos e

subsídios ao hidrogênio verde e abrindo espaço para os hidrogênios laranja (produzido através de resíduos), azul e rosa (CHIAPPINI, 2023).

A China atualmente o maior produtor de hidrogênio do mundo produzindo cerca de 33 milhões de toneladas por ano, quase em sua totalidade produzida através de combustíveis fósseis, porém a pressão por novas matrizes energéticas para substituir os combustíveis fósseis e carvão faz com que a necessidade de um mercado de hidrogênio de baixo carbono (OLIVEIRA, 2022).

O Brasil, também possui uma produção de hidrogênio com alta emissão de CO<sub>2</sub>, nos setores de refino e de fertilizantes e produção de hidrogênio cinza através de gás natural, mas o país tem potencial para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono através de fontes eólicas, solar e hídricas (OLIVEIRA, 2022).

### 3. Metodologia

Esse estudo se propõe a comparar o potencial de aplicação dos principais tipos de ônibus Zero Emissões (ZEBs), Trólebus, BEB e FCEB.

Os modelos de ônibus elétricos, de acordo com a literatura, possuem diferentes características que podem atender diferentes modos de operação. Na Tabela 1 estão sintetizadas características operacionais de cada um dos três modelos.

**Tabela 1:** Síntese Geral de características de ZEBs

	<b>FCEB</b>	<b>BEB</b>	<b>Trólebus</b>
<b>Autonomia</b>	Entre 300 e 500 km	250 km	Em contato com a Rede
<b>Tempo de Recarga</b>	Minutos	De 3 a 4 horas	Instantâneo

Fonte: Elaborado pelos autores

É possível verificar que os três modelos possuem características distintas de autonomia e recarregamento. Dos três modelos o que possui maior autonomia é o FCEB, que possui autonomia de acordo com os tanques de hidrogênio disponíveis no veículo, mas abrange um intervalo de 300 e 500 km.

Já o BEB possui a autonomia das baterias como limitador, geralmente eles são recarregados durante algumas horas no período noturno, ou no intervalo de suas operações, a capacidade de bateria dos modelos BEB atualmente também varia com a quantidade packs de bateria disponíveis no veículo, porém em sua maioria, essa autonomia gira em torno de 250 km.

Nos trólebus a autonomia basicamente é a dependência de rede aérea, já que ele necessita do contato instantâneo com a rede para ser alimentado, ou no caso do modelo de trólebus com tecnologia IMC ser alimentado e recarregar seu banco de baterias, que lhe permite operar desconectado da rede aérea.

Depois de analisar as características operacionais é necessário verificar a viabilidade de custo de aquisição e de operação. Para isso, analisou-se os custos operacionais disponíveis dos modelos existentes, que podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Síntese Geral de custos operacionais de ZEBs

	<b>FCEB</b>	<b>BEB</b>	<b>Trólebus</b>
<b>Custo de Aquisição</b>	R\$ 7.064.070,00	R\$ 2.590.000,00	R\$ 972,151,00
<b>Custo de operação (R\$/km)</b>	R\$ 7,71	R\$ 3,34	R\$ 3,73

Fonte: Elaborado pelos autores

O primeiro critério que deve ser avaliado em um ônibus é seu custo de aquisição, normalmente um custo de um FCEB, no exterior, pois essa tecnologia ainda está em testes no Brasil é de aproximadamente USD 1.300.000,00 ou R\$ 7.064.070,00 (considerando USD 1,00 = R\$ 5,43 cotação do dólar em 29/09/2024 e sem

considerar taxas de importação e nacionalização). Esse valor é maior que um ônibus elétrico a bateria (12m) no Brasil. Considerando dados obtidos como valor de referência da Prefeitura do Município de São Paulo (2024) um BEB possui um valor de R\$2.590.000,00, com disponibilidade em território nacional esse veículo não necessita de importação.

Já o custo de um trólebus de 12m, no Brasil, é de R\$ 972,151,00 (SILVA, 2022), descontando-se o custo de implementação de infraestrutura de rede aérea. Dessa forma, comparando-se os custos, o ônibus movido a hidrogênio tem um custo, aproximadamente 2,7 vezes maior que um BEB e 7,3 vezes maior que um trólebus.

Por fim, os custos operacionais, por quilômetro, verificados para cada modelo de veículo são de: R\$ 7,71 para o FCEB, de R\$ 3,34 para o BEB e R\$ 3,73 para os trólebus, considerando também o custo de manutenção da rede aérea por quilômetro.

#### **4. Resultados e discussões**

Estrada Poggio et al., (2023) afirmam que a eficiência Tank to Wheel (TTW) de um FCEB é menor do que em um BEB, porém há uma variação menor no consumo do FCEB quando comparado BEBs, pois a variação de clima afeta mais os BEBs do que os FCEBs.

Já o custo operacional por quilômetro encontrado para um FCEV foi de 1,27 EUR ou R\$ 7,71 ou já o de um BEB foi 0,55 EUR ou R\$ 3,34 (considerando EUR 1,00 = R\$ 6,07 cotação do Euro em 29/09/2024). Já o custo de operação de um trólebus é de R\$1,85 por quilômetro somados ao custo de manutenção da rede de trólebus, que é de R\$1,88/km (SILVA, 2022).

Para Néspoli et al. (2023) os veículos devem ser escolhidos de acordo com os seguintes critérios: Veículos carregados por rede aérea ou ultracapacitores (Trólebus e BEBs que necessitam de recarga de oportunidade em paradas), por possuírem uma flexibilidade menor, do que os BEBs e os FCEBs, sua aplicação é mais indicada em corredores ou em linhas segregadas como BRTs, para que os

custos de infraestrutura sejam reduzidos devido a economia de escala, assim se tornando mais vantajosos economicamente.

Para Correa, Muñoz e Rodriguez, (2019) os ônibus elétricos são superiores em uma avaliação TTW, pois não emitem gases poluentes, mas para serem veículos sustentáveis devem utilizar energia elétrica obtida de forma mais sustentável, para melhorar seu desempenho energético e ambiental.

Para que para um FCEB seja competitivo, e ambientalmente sustentável a participação de hidrogênio verde na sua célula de combustível deve ser maior do que 50% (CORREA; MUÑOZ; RODRIGUEZ, 2019).

Os BEBs atualmente é a escolha mais comum para eletrificação porém as capacidades de longo prazo ainda são desconhecidas para esse tipo de veículo enquanto o FCEB tem o potencial de complementar uma frota de BEBs, em atividades mais complexas para o sistema de baterias (BLADES et al., 2022).

A tecnologia BEB será ideal no futuro, para distâncias mais curtas e o FCEB para distâncias mais longas, mas é que o Brasil é um local ideal para a aplicação de ônibus totalmente elétricos pela sua matriz energética renovável (CORREA; MUÑOZ; RODRIGUEZ, 2019).

Para Néspoli et al. (2023), os trólebus possuem um custo fixo elevado (rede aérea e custo energético), itinerários rígidos devido a necessidade de rede aérea. Porém se considerarmos esses dados e que a cidade de São Paulo possui uma rede de trólebus desde 1949, as dificuldades desse modelo já possuem um conhecimento adquirido e os valores já estão equacionados no sistema ele tem também suas vantagens.

## **5. Conclusões**

Os ZEBs são o futuro da mobilidade sustentável, o que é bom na eletromobilidade são os diversos modelos disponíveis que podem ser aplicados para cada necessidade operacional. A média de quilometragem da frota da Cidade de São Paulo é de 196km/dia. Sendo os BEBs a alternativa mais adequada para essas distâncias.

Os FCEB ainda não possuem fabricação em território nacional e as formas de obtenção de hidrogênio ainda não permitem que eles sejam utilizados em grande escala, mas no futuro com o barateamento da tecnologia e do potencial de produção de hidrogênio verde (ou de baixo carbono) esse modelo de veículo será importante para deslocamentos de médias e longas distâncias, podendo ser até competitivo com os BEBs nas pequenas e médias.

Os trólebus são indicados para linhas de alta demanda ou para corredores exclusivos, pois o custo de sua rede é considerável. A rede de trólebus disponível na Cidade de São Paulo ainda é importante, a rede possui um custo elevado de implantação e sua desativação, é prejuízo ao erário público, pois está no meio de sua vida útil e contribui de modo eficiente para descarbonização da frota de ônibus.

Estudos futuros podem abordar custos de redes de trólebus atuais e novas sugestões para redes de trólebus ou estudar novos modelos de ônibus elétricos que podem ser aplicados na Cidade de São Paulo.

## 6. Agradecimentos

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

## Referências bibliográficas

AJANOVIC, A.; GLATT, A.; HAAS, R. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. **Energy**, v. 235, 2021.

ANDÚJAR, J. M.; SEGURA, F. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2309–2322, 1 dez. 2009.

BARTŁOMIEJCZYK, M.; POŁOM, M. Sustainable Use of the Catenary by Trolleybuses with Auxiliary Power Sources on the Example of Gdynia. **Infrastructures**, v. 6, n. 4, p. 61, abr. 2021.

BERA, L. **Fotografia reklamowa Wrocław | Produktowa, biznesowa, wnętrz i architektury**. Disponível em: <<https://www.lukaszbera.com>>. Acesso em: 2 out. 2024.

BLADES, L. A. W. et al. **Determining the Distribution of Battery Electric and Fuel Cell Electric Buses in a Metropolitan Public Transport Network**. . Em: WCX SAE WORLD CONGRESS EXPERIENCE. SAE International, 29 mar. 2022. Disponível em: <<https://saemobilus.sae.org/papers/determining-distribution-battery-electric-fuel-cell-electric-buses-a-metropolitan-public-transport-network-2022-01-0675>>. Acesso em: 30 set. 2024

BRAVO DIAZ, L.; BOILLOT, L. **Historical analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects: evaluation of contribution towards the state of the art**. [s.l.] Publications Office of the European Union, 2024.

BURKE, A. F. et al. Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues. **Energy for Sustainable Development**, v. 77, p. 101343, 1 dez. 2023.

CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento**. , 2023. Disponível em: <<https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>>. Acesso em: 1 out. 2024

CORREA, G.; MUÑOZ, P. M.; RODRIGUEZ, C. R. A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen and electric urban bus. **Energy**, v. 187, p. 115906, 15 nov. 2019.

DI VECE, G. et al. **Development of a Total Cost of Ownership Model to Compare BEVs, FCEVs and Diesel Powertrains on Bus Applications**. . Em: CO2 REDUCTION FOR TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE. 14 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2022-37-0030/>>. Acesso em: 30 set. 2024

DONG, Y. et al. Co-planning of hydrogen-based microgrids and fuel-cell bus operation centers under low-carbon and resilience considerations. **Applied Energy**, v. 336, p. 120849, 15 abr. 2023.

E-BUS RADAR. **E-Bus Radar. E-BUS RADAR**, 2023. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>. Acesso em: 30 ago. 2023

ELECTRICITYMAP. **Live 24/7 CO<sub>2</sub> emissions of electricity consumption**. Disponível em: <<http://electricitymap.tmrow.co>>. Acesso em: 1 out. 2024.

EMTU. **Ônibus movido a hidrogênio**. Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/inovacao/cases-emtu/onibus-movido-a-hidrogenio.fss>>. Acesso em: 30 set. 2024.

ESTRADA POGGIO, A. et al. Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas. **Journal of Energy Storage**, v. 72, p. 108411, 2023.

FUTURETRANSPORT. **Hidrogênio: um problema e uma solução verde -** , 5 dez. 2023. Disponível em: <<https://futuretransport.com.br/hidrogenio-um-problema-e-uma-solucao/>>. Acesso em: 2 out. 2024

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **SP inicia testes com primeiro ônibus articulado do mundo movido a baterias**. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/sp-inicia-testes-com-primeiro-onibus-articulado-do-mundo-movido-a-baterias/>>. Acesso em: 16 out. 2021.

GRIGORIEVA, O.; NIKULSHIN, A. Trolleybuses and trams in the urban public transport network of Russian regions: problems and prospects. **E3S Web of Conferences**, v. 371, p. 04019, 2023.

GUNTER, M. et al. **In Motion Charging Innovative Trolleybus**. [s.l.] UITP, 2019.

HENSHER, D. A.; MULLEY, C. Modal image: candidate drivers of preference differences for BRT and LRT. **Transportation**, v. 42, n. 1, p. 7–23, jan. 2015.

KARSAN. **What is Hydrogen Fuel Cell Bus?** Disponível em:

<<https://www.karsan.com/en/blog/hydrogen-blog/what-is-hydrogen-fuel-cell-bus#how-does-a-hydrogen-fuel-cell-bus-work->>. Acesso em: 30 set. 2024.

LI, M.; ZHANG, X.; LI, G. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. **Energy**, v. 94, p. 693–704, 1 jan. 2016.

MERCEDES-BENZ BUSES. **The new eCitaro fuel cell.** Disponível em:

<[https://www.mercedes-benz-bus.com/en\\_DE/models/ecitaro-fuel-cell.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/models/ecitaro-fuel-cell.html)>. Acesso em: 30 set. 2024.

MOMCILOVIC, V.; DIMITRIJEVIC, B.; STOKIC, M. Supercapacitor electric bus modeling and simulation framework. **Energy**, v. 282, p. 129020, 1 nov. 2023.

NAZARÉ, E. **Sustentabilidade: descarte de baterias dos carros elétricos ainda precisa ser aperfeiçoado –.** Disponível em:

<<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/sustentabilidade-descarte-de-baterias-dos-carros-eletricos-ainda-precisa-ser-aperfeicoado/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

NESPOLI, L. C.; ET. AL. **Custos Dos Serviços De Transporte Público Por Ônibus Elétrico: Metodologia De Cálculo E Parâmetros.** São Paulo, SP: ANTP, 2023.

NTU. **Centro de Documentação e Memória Eurico Divon Galhardi.** 1. ed.

Brasília: Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos - NTU, 2019.

OLIVEIRA, R. C. D. Panorama do hidrogênio no Brasil. 2022.

PETROCILO, C.; PESCARINI, F. **Briga entre prefeitura e Enel trava ônibus elétrico em SP.** Disponível em:

<<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/03/briga-entre-prefeitura-enel-e-empr-esas-trava-onibus-eletricos-em-sp.shtml>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Prefeitura testa ônibus a bateria que percorre 250 km com apenas uma recarga.** Disponível em:

<<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/comunicacao/noticias/?p=162604>>. Acesso em: 16 out. 2021.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Chamada Pública SF/OPCRED Nº 01/2024**. Disponível em: <<https://capital.sp.gov.br/web/fazenda/w/opcred/34653>>. Acesso em: 1 out. 2024.

RODRIGUES, J. P. D. S. et al. **Comparison of Well-to-Wheel energy efficiency between combustion vehicles and electric vehicles**. 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). **Anais...** Em: 2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER AND ENERGY TECHNOLOGIES (ICECET). jul. 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9872658>>. Acesso em: 30 set. 2024

RODRIGUES, L.; ABREU, R. O papel da bioenergia na Mobilidade sustentável De baixo carbono. **Agroanalysis**, v. 43, n. 6, 2023.

SANT'ANNA, E. **Prefeito quer acabar com trólebus em SP: vale a pena abandonar ônibus ligados à rede elétrica?** Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/prefeito-quer-acabar-com-trolebus-em-sp-vale-a-pena-colocar-fim-nos-onibus-ligados-a-rede-eletrica/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

SHEPARD, J. **What is well-to-wheel efficiency in an EV?** Disponível em: <<https://www.evengineeringonline.com/what-is-well-to-wheel-efficiency-in-an-ev/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

SILVA, T. **Um diagnóstico atual do sistema trólebus paulistano**. , 2022. Disponível em: <<https://plamurblog.wordpress.com/2022/04/07/um-diagnostico-atual-do-sistema-tr-olebus-paulistano/>>. Acesso em: 15 set. 2023

SOUZA, H.; PETZHOLD, G.; ALBUQUERQUE, C. **Ônibus a hidrogênio pode complementar veículos a bateria em transição para transporte limpo**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/onibus-hidrogenio-pode-complementar-veiculos-bateria-em-transicao-para-transporte-limpo>>. Acesso em: 30 set. 2024.

STOLZENBURG, K.; WHITEHOUSE, N.; WHITEHOUSE, S. **Ônibus Movidos A Hidrogênio: Melhores Práticas E Comercialização**. Bélgica: UITP, 2020.

SUSTAINABLE BUS. **Fuel cell bus projects in the world: what's going on?**

Disponível em:

<<https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/fuel-cell-bus-hydrogen/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

VOLVO BUSES. **Volvo Buses**. Disponível em: <<https://www.volvobuses.com/en/>>. Acesso em: 2 out. 2024.

WAGNER, D.; WALTHER, G. Techno-economic analysis of mixed battery and fuel cell electric bus fleets: A case study. **Applied Energy**, v. 376, p. 124285, 2024.

WANG, Y. et al. Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives. **Advances in Applied Energy**, v. 2, p. 100011, 26 maio 2021.

ZANON, M. **Trólebus**. Disponível em: <<https://monicazanon.com.br/>>. Acesso em: 22 set. 2023.