

ANÁLISE ECONÔMICA DA ELETRIFICAÇÃO EM ÔNIBUS INTERMUNICIPAL

Pedro Henrick Ávila Silva, pedro.silva8@estudante.ufla.br¹

Carlos Eduardo Castilla Alvarez, carlos.alvarez@ufla.br¹

¹Universidade Federal de Lavras, 37.200-000, Lavras, MG, Brasil

Resumo: A eletrificação dos veículos é algo que vem se tornando pauta, onde os ônibus elétricos exercem um papel fundamental na transformação dos sistemas de transporte público, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos. A transição para essa tecnologia representa um passo significativo em direção a cidades mais sustentáveis e resilientes. Entretanto a viabilidade econômica das propostas de eletrificação ainda é algo a ser identificado, onde se visa entender em quais cenários ela é vantajosa. Visando identificar a viabilidade de possíveis substituições de veículos a combustão interna por veículos elétricos, esse trabalho objetiva realizar um estudo no transporte intermunicipal que opera entre as cidades de São João del Rei-MG e Lavras-MG. Inicialmente foram coletados dados referentes às várias propostas de substituição, junto aos dados do veículo em uso na cidade, posteriormente foi realizada a identificação dos custos de cada plataforma, onde os mesmos são realizados com o auxílio da ferramenta para análises veiculares, PAMVEC. Por fim, foram utilizados métodos consolidados visando a identificação dos aspectos econômicos de cada powertrain. Os resultados mostram que a eletrificação baseada no cenário atual do transporte intermunicipal é viável, onde os veículos totalmente elétricos apresentaram valores mais satisfatórios nas análises econômicas em relação aos híbridos, isso se deve ao fato de que os custos com o “combustível” dos ônibus elétricos, no caso energia, foram significativamente menores.

Palavras-chave: substituição, veículo de transporte coletivo, viabilidade, veículos elétricos

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LISTA DE ABREVIATURA

PAMVEC	Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption
ADVISOR	Advanced Vehicle Simulator
EQ	Equação
CAPEX	Capital Expenditure
OPEX	Operational Expenditure
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
TCO	Total Coast of Ownership
CARB	California Air Resources Board
ANTP	Associação Nacional Dos Transportes Públicos

LISTA DE SIGLAS

V _{méd}	Velocidade média [km/h]
T _{ciclo}	Tempo total do ciclo [horas]
V	Velocidade instantânea [km/h]
V _{méd}	Velocidade cúbica média [km/h]
R _v	Razão de velocidades
A _c	Aceleração característica [m/s ²]
V _n	Velocidade instantânea no tempo n [km/h]
v _{n+1}	Velocidade instantânea no ponto seguinte [km/h]
E _{km}	Energia total consumida por km [Wh/km]
CL	Preço do combustível por litro [R\$/L]
DE	Densidade de energia do combustível [Wh/L]
C _{kw}	Preço do KWh [R\$]
FC _j	Fluxo líquido de caixa no instante j
K	Taxa de desconto aplicável aos fluxos de caixa no período j
N	Número de períodos
F _k	Fator de inércia
K _{estr}	Fator estrutural de massa do veículo
C _{rr}	Coefficiente de atrito com o solo
C _d	Coefficiente de arrasto

1. INTRODUÇÃO

O mundo globalizado é altamente dependente do setor de transportes. O desenvolvimento social e econômico necessita de uma circulação de veículos contínua, sendo no transporte de pessoas ou cargas. O crescimento do setor ocorreu de forma rápida, sendo altamente dependente de combustíveis fósseis.

Entretanto, os níveis de emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos cresceram também de forma rápida, o que alarmou a população global. Segundo Malaquias *et al.* (2019), os veículos vêm sendo apontados como os grandes vilões, onde os motores de combustão interna são responsáveis pela crise energética e pela poluição do ar que atualmente assolam o mundo. As críticas se devem a esse tipo de motorização utilizar em sua maioria, recursos não renováveis e à emissão de poluentes.

Apontado por Girardi *et al.* (2015), a transição da frota de veículos atuais para alternativas elétricas, é dita como uma possível solução para as questões ambientais problemáticas presentes nessas frotas. O mundo altamente dependente do petróleo, já enfrentou crises financeiras, conflitos sociais e instabilidades econômicas, encontrar uma solução para tal aspecto é crucial.

Os veículos híbridos representam uma solução intermediária entre os veículos a diesel e os elétricos, ou seja, o custo de aquisição é menor em comparação aos veículos totalmente elétricos, entretanto, maior quando em comparação aos custos de aquisição dos veículos diesel. Além disso, os híbridos oferecem a vantagem adicional da economia de combustível, quando em comparação aos veículos diesel, mas oferecem um maior custo com combustível que os veículos elétricos.

Todos os aspectos levantados já representam grandes motivações a respeito de uma possível substituição para frotas elétricas. No entanto, aspectos econômicos também representam um fator contribuinte nesta dita substituição. Utilizar eletricidade como fonte energética para um veículo pode representar uma economia monetária, visto que segundo Serasa (2023), a eletricidade é mais barata que um combustível fóssil.

Baseado em todos os aspectos e considerações discutidas e observadas, ressaltando a importância da eletrificação no atual panorama, este trabalho tem como objetivo avaliar aspectos operacionais e econômicos em um cenário micro, onde será avaliada a troca de um veículo de combustão interna convencional, utilizado no transporte intermunicipal que liga as cidades de Lavras (MG) e São João del Rei (MG), por um veículo elétrico.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

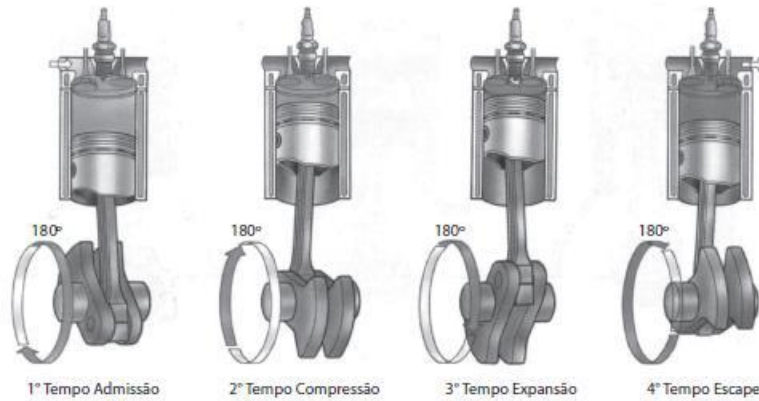
2.1. Motores convencionais (MCI)

Motores, são máquinas térmicas capazes que convertem a energia química, presente em combustíveis, em energia mecânica, onde a mesma, nada mais é do que a capacidade de um corpo gerar trabalho (Çengel e Boles, 2013). Existem algumas configurações distintas no que se diz respeito aos motores de combustão interna, podendo ser classificados essencialmente em Ciclo Otto e Ciclo Diesel. Os motores de combustão interna possuem uma vasta listagem de componentes, alguns desses componentes são fundamentais quando ao funcionamento do motor, alguns outros são complementares, auxiliando o funcionamento em boas condições.

2.1.1. Motores de Ciclo Otto

Segundo Brunetti (2012), uma das principais características de motores desse tipo, é a admissão de uma mistura ar combustível, onde em geral é ignizada por uma centelha. Para a apresentação dessa configuração de motorização se faz necessária algumas considerações. Os pistões realizam movimentos ascendentes e descendentes no interior dos cilindros, onde em cada posição determinada, ocorre um ciclo de operação ou tempo do motor. Se o pistão estiver na parte superior, na qual o mesmo se encontra na parte mais próxima possível ao cabeçote, a posição recebe o nome de ponto morto superior (PMS). Na posição inferior, o mais afastado possível do cabeçote, recebe o nome de ponto morto inferior (Brunetti, 2012). A configuração Otto, é dividida em número de tempos do ciclo de operação. Assim então, os motores com essa configuração, possuem quatro tempos, sendo eles, admissão, compressão, expansão e escape. Cada ciclo completo, corresponde a duas voltas da árvore de manivelas.

Figura 1- Os quatro tempos do motor de ciclo Otto



Fonte: Brunetti, 2012.

Os tempos podem ser explicados como:

- Admissão: a válvula de admissão é aberta, e com deslocamento do pistão do PMS para o PMI, é gerada uma região com diferença de pressão, onde uma mistura ar-combustível entra no cilindro.
- Compressão: o pistão realiza o movimento ascendente do PMI para o PMS, realizando a compressão da mistura, ocorrendo com as válvulas fechadas.
- Expansão: ao final do processo anterior, é gerado uma fagulha, onde ocorre a ignição da mistura, provocando então um grande aumento de pressão, causado pela expansão dos gases. Nessa etapa o pistão é impulsionado para o PMI e também ocorre o processo de geração de trabalho útil do motor.
- Escape: nesse processo, o pistão realiza o movimento do PMS para o PMI, entretanto, com a válvula de escape aberta, fazendo com que os gases queimados na combustão sejam expelidos para fora do motor. Após todo esse processo, o ciclo se reinicia na etapa da admissão.

2.1.2. Motores de ciclo diesel

A grande diferença nesse tipo de motorização, se dá na etapa de admissão, onde agora é admitido apenas ar e o mesmo é comprimido a altas temperaturas. Quando o pistão atinge o PMS após a compressão, o combustível é injetado, devido as altas pressões e temperaturas do ar comprimido, o combustível sofre o processo de autoignição, sem a necessidade de uma centelha. Existem ainda outras diferenças como sistema de alimentação, e outros parâmetros discutidos posteriormente (Brunetti, 2012).

2.2. Combustíveis

Os principais tipos de combustíveis para o ciclo Otto, são aqueles mais voláteis, ou seja, aqueles que na temperatura ambiente apresentam uma boa capacidade de inflamabilidade. Alguns exemplos são a gasolina, etanol e GNV (BRUNETTI, 2012). O que mede a capacidade que um combustível fornecer energia quando queimado, tem o nome poder calorífico. Onde os valores para gasolina, etanol e GNV são respectivamente, 47.3 MJ/Kg, 29.67 MJ/Kg e 34.6 MJ/m³. Para o ciclo diesel, como o próprio nome já enuncia, o combustível é o óleo diesel, com um poder calorífico de 46,1 MJ/Kg (Çengel e Boles, 2013).

2.3. Taxa de compressão

Taxa de compressão pode ser definida como o quociente entre o volume quando o pistão atinge o ponto morto inferior, pelo volume no ponto morto superior. Esse é um parâmetro importante nos motores, pois com ele está atrelado a eficiência dos motores, ou seja, com maiores taxas de compressão, os motores operam com maior rendimento (Çengel e Boles, 2013). Os motores de ciclo Otto, possuem taxas de compressão relativamente baixas. Tal aspecto se deve aos combustíveis possuírem características de autoignição em pressões mais baixa, onde a ignição deve ser controlada de modo que ocorra no momento correto. De tal modo, as relações de compressão para essa configuração, é 8,5 a 13 para a gasolina e de 10 à 14 para o etanol (Brunetti, 2012). Os motores diesel, possui uma taxa de compressão mais alta, pois assim, atingirá a autoignição do combustível, que é uma premissa do modelo. A taxa de compressão dessa configuração é da ordem de 15 à 24 (Brunetti, 2012).

2.4. Eficiência MCI

O conceito de eficiência energética, pode ser explicado como a quantidade de energia, que realmente é convertido em energia mecânica. Motores movidos a gasolina possuem eficiência da ordem de 26% a 30% e para motores a Diesel, com valores de 34% a 40% (Çengel e Boles, 2013).

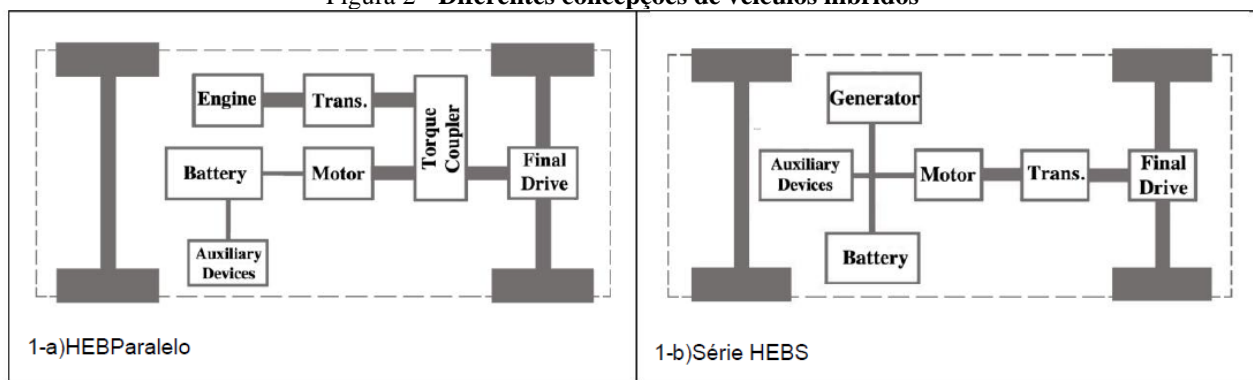
2.5. Tecnologias de motorização elétrica

Segundo Mahmoud *et al.* (2016), os veículos elétricos possuem diferentes tipos de eletrificação, podendo serem híbridos, movidos a célula de combustível e elétricos a bateria.

2.5.1. Híbridos

Os veículos híbridos possuem um motor de combustão interna atrelado a um motor elétrico, para fornecer potência de tração às rodas. Sendo ainda subdivididos em híbridos em serie e em paralelo. Onde no primeiro caso, o motor de combustão interna é utilizado como gerador de energia, onde a mesma é armazenada em um banco de baterias, que por sua vez fornecem energia para o motor elétrico. A configuração em paralelo, possui como característica, a ligação de ambas as motorizações, elétrica e a combustão, de forma que as mesmas impulsionam o veículo (Mahmoud *et al.*, 2016).

Figura 2 - Diferentes concepções de veículos híbridos

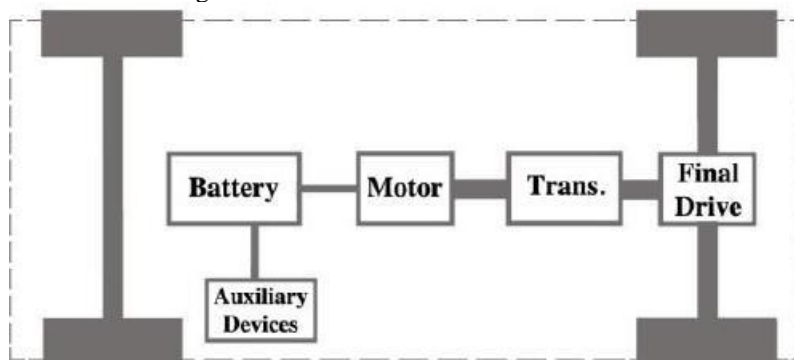


Fonte: Mahmoud *et al.*, 2016.

2.5.2. Veículos elétricos à bateria

A configuração elétrica a bateria, se baseia em um veículo ligado à rede de eletricidade, onde a mesma é armazenada em um banco de baterias, dos quais alimentam o motor elétrico (Mahmoud *et al.*, 2016).

Figura 3 - Modelo veículo elétrico a bateria



Fonte: Mahmoud *et al.*, 2016.

2.6. Frenagem regenerativa

Segundo Ahamed e Mehmet (2022), o sistema de frenagem regenerativa é de suma importância para os veículos puramente elétricos. O sistema funciona quando em uma desaceleração, sensores identificam a mesma, e enviam sinais

para um módulo, onde o mesmo converte o motor elétrico responsável pela tração dos veículos, em um gerador, recuperando energia.

Aplicar essa tecnologia melhora a autonomia e economia de consumo de energia de veículos elétricos. Outra vantagem dessa tecnologia, é a economia dos freios. Pelos veículos apresentarem grande capacidade de desaceleração, o uso dos freios se torna reduzido (Ahamed e Mehmet, 2022).

2.7. Dispositivos de armazenamento de energia

Existem alguns dispositivos capazes de armazenar energia, as categorias incluem as baterias, células de combustíveis e ultra capacitores (Mahmoud *et al.*, 2016).

2.7.1. Baterias

As baterias são dispositivos que acumulam energia química da qual pode ser convertida em energia elétrica. A eficiência de um veículo elétrico está intimamente ligada as características dos sistemas de armazenamento de energia. A avaliação da eficiência de energia por sua vez é relacionada com três parâmetros: densidade de energia, densidade de potência e custo (Mahmoud *et al.*, 2016).

O termo densidade de energia compete-se à quantidade de energia armazenada em uma unidade de volume. Densidade de potência é à quantidade de potência para uma unidade de volume que uma bateria fornece. Baterias com altas densidades de energia conseguem armazenar mais carga. Baterias com altas densidades de potência, conseguem alta eficiência, com um longo ciclo de vida e rápida carga e descarga (Khaligh e Li, 2010).

As Baterias conseguem ser abrangentes, possuindo variações das propriedades de densidade de energia e potência das quais são aplicadas quando se deseja mais relevância em determinada característica. Pode-se citar alguns tipos de bateria, sendo eles: Chumbo-ácido, níquel-metal, íon-lítio, níquel-zinco, níquel-cádmio (Khaligh e Li, 2010).

a) Chumbo-ácido

Baterias Chumbo-ácido, possuem um custo baixo e amplo uso. No entanto possuem baixa densidade energética e de potência, além da redução do ciclo de vida quando operada 20% abaixo de sua capacidade total de carga (Khaligh e Li, 2010).

b) Níquel-metal

Segundo Mahmoud *et al.* (2016), baterias níquel metal são recomendadas para veículos híbridos. Essa variação possui o dobro da densidade de energia quando comparada com baterias do tipo chumbo-acido. Possui longa vida útil, amplas faixas de temperatura de operação e resistência a sobrecarga. Entretanto se descarregadas de maneira repentina com altas correntes, tem a vida útil reduzida drasticamente, além de possuir um efeito memória, que reduz a potência utilizável.

c) Íon-lítio

A configuração íon-lítio, tem como característica a capacidade de serem recicláveis, além da alta densidade energética e bom desempenho a altas temperaturas. Possuem baixo efeito de memória, longa vida útil, e altas potências específicas (Khaligh e Li, 2010). Fornecendo um bom equilíbrio na densidade de energia e potência, baterias íon lítio são as mais recomendadas para veículos elétricos a bateria (Mahmoud *et al.*, 2016).

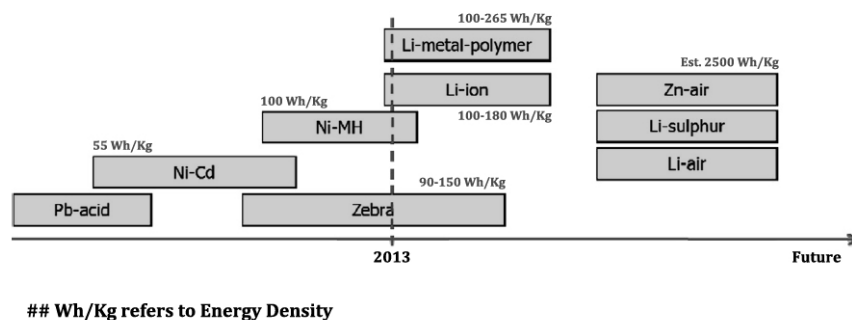
d) Níquel-zinco

As baterias de níquel-zinco, possuem alta densidade de energia e potência, baixo custo e ecologicamente corretas. Entretanto tem ciclos de vida baixos prejudicando seu uso em aplicações veiculares (Khaligh e Li, 2010).

e) Níquel-cádmio

As propriedades referentes as baterias do tipo níquel-cádmio, são a longa vida útil e que elas podem ser totalmente descarregadas. A grande desvantagem dessa configuração é o alto custo (Khaligh e Li, 2010).

Segundo Mahmoud *et al.* (2016), existem pesquisas referentes a novas tecnologias de baterias, que prometem atingir o dobro da densidade de energia, um exemplo são as do tipo lítio-ar e lítio-enxofre, que estão expressas na figura 5, junto a outras configurações de baterias e suas respectivas densidades energéticas.



Fonte: Mahmoud *et al.*, 2016.

2.7.2. Utracapitores

Os ultracapitores armazenam energia separando fisicamente as cargas negativas das positivas por meio de um material isolante. Desse modo, não há variação química nos eletrodos (Khaligh e Li, 2010). As principais vantagens dessa configuração é o longo ciclo de vida e a alta densidade de potência, porém baixa densidades de energia.

Os ultracapitores são mais recomendados em veículos elétricos de curto alcance, veículos híbridos, além de serem apropriados para os sistemas de frenagem regenerativa, pois podem ser utilizados como dispositivos auxiliares de armazenamento de energia devido as características já mencionadas. (Mahmoud *et al.*, 2016).

2.7.3. Célula de combustível

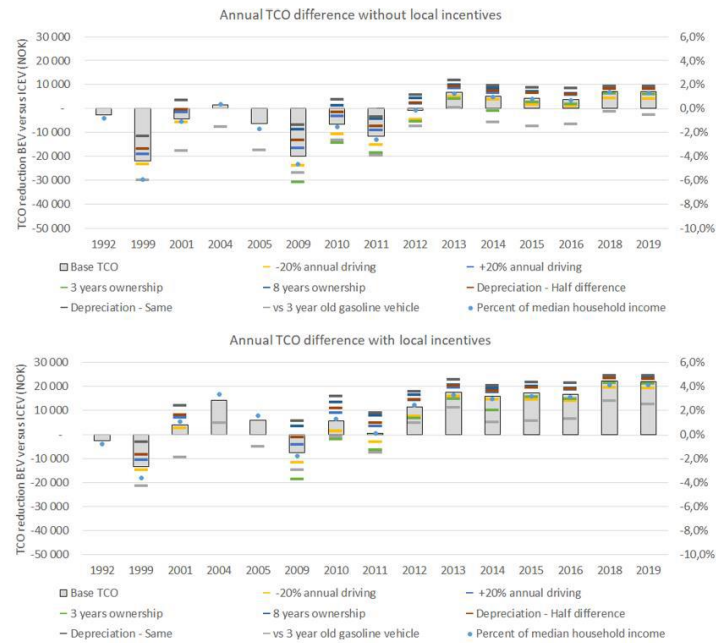
O princípio de funcionamento de uma célula de combustível é semelhante ao de uma bateria, entretanto a eletricidade é gerada a partir da conversão da energia química utilizando um combustível como um anodo e um oxidante como cátodo. O hidrogênio é um ótimo tipo de combustível para ser utilizado, pois possui grande densidade de energia, além do subproduto gerado na reação ser a água. As vantagens das células de combustível são a alta durabilidade e confiabilidade, alta eficiência na conversão do combustível em energia elétrica e baixa emissões. Entretanto possuem baixa densidade energética, o que se faz necessário um grande armazenamento de combustível (Khaligh e Li, 2010).

2.8. Análises econômicas

A análise TCO, *Total Coast of Ownership*, é uma técnica utilizada para identificação dos custos atuais e futuros de uma possível aquisição de propriedade. A realização da mesma permite analisar a viabilidade comercial, comparando a eficiência econômica dos bens (Muñoz *et al.*, 2022)

Para realização do TCO, devem ser levantados uma série de dados. Um exemplo é realizado segundo Mahmoud et al. (2016), onde a análise TCO é a respeito das viabilidades de um ônibus elétrico, onde os dados utilizados são referentes aos custos de compra, operação, manutenção e substituição da bateria do veículo elétrico, além dos custos de infraestrutura. Em outros casos, são utilizados também dados referentes aos valores em cenários de desvalorização e incentivos governamentais (Figenbaum, 2022). Utilizando análises TCO's presentes na literatura, do ano de 1992 até 2019, Figenbaum (2022), comparou os resultados desses estudos, identificando em que os mesmos seriam vantajosos, frente a novos dados de entrada, como os incentivos governamentais já mencionados.

Figura 5 – TCO de comparação em cenários sem e com incentivos locais

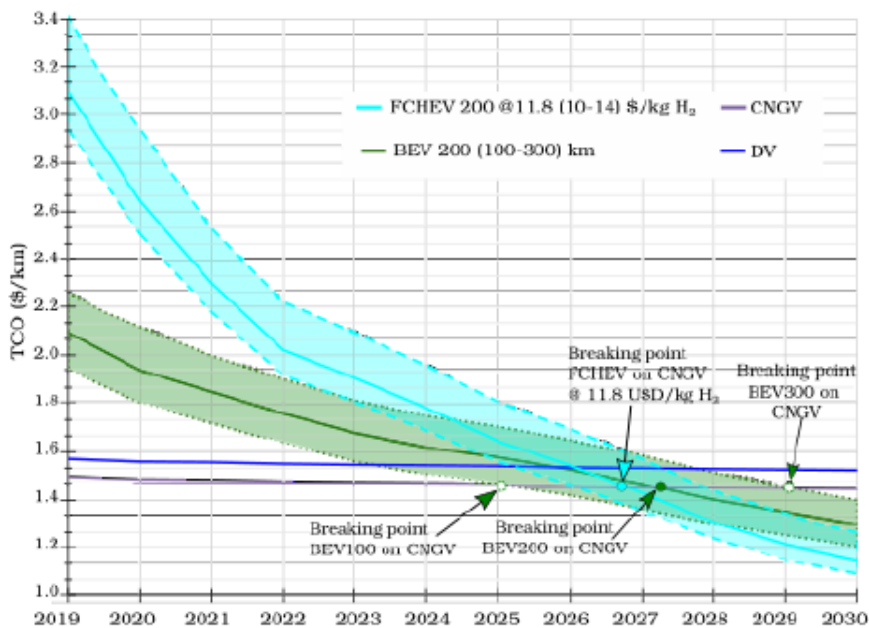


Fonte: Figenbaum, 2022.

No cenário da substituição veicular, após a identificação de todos os aspectos necessários para o desenvolvimento da análise TCO, cruza-se os dados do TCO, com a quantidade de km rodado, gerando dados em R\$/KM, avaliando melhor os custos de operação (Basma, *et al.*, 2022).

As análises podem ser feitas ano a ano como em Muñoz *et al.* (2022), onde em determinado momento, os custos iniciais do veículo elétrico, que geram o maior impacto sob a análise TCO, após uma quantidade de tempo em virtude da quantidade de quilômetros será menor, em contraponto, os gastos com combustíveis, manutenção* e impostos tentem a ser menores em veículos elétricos. Partindo disso, em determinado momento dessa análise ano-a-ano, ocorrerá um *breaking point*, representando o ano, onde os veículos elétricos realizaram seu *payback*.

Figura 6 - Projeções futuras para análises TCO's



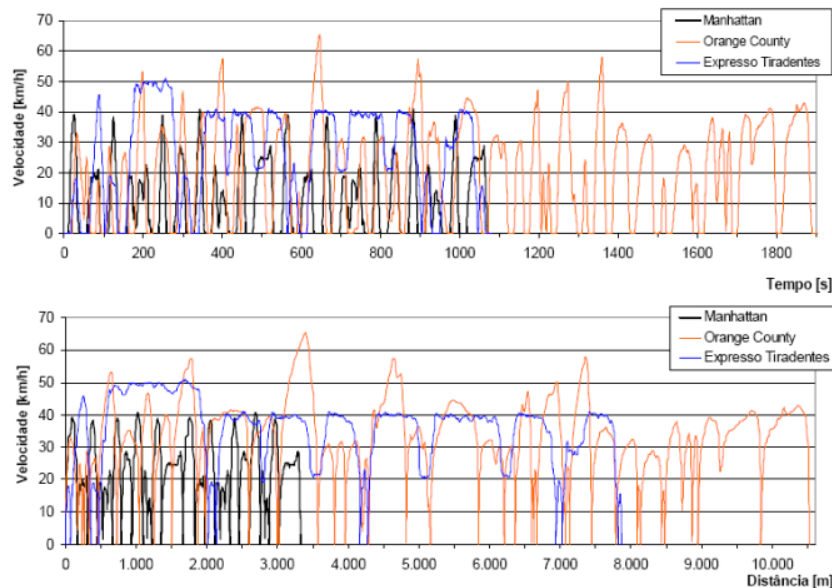
Fonte: Muñoz *et al.*, 2022

2.9. Ciclo de condução

O ciclo de condução é um importante parâmetro a ser discutido, onde a utilização do mesmo reflete dados, nos quais podem ser estimados o consumo de combustível e emissões. Para a realização do ciclo de condução, são utilizados dados referentes a uma série de pontos que representam velocidade versus tempo (Nutramon e Supachart,2009).

Já existem uma série de ciclos de condução na literatura, onde são realizados em grandes polos mundiais, nos quais é interessante os estudos quanto aos parâmetros já levantados. Alguns exemplos são, o ciclo Manhattan e Orange County. Para efeitos de comparação, Castro (2008), utilizou esses ciclos de condução mencionados, para visualizar as diferenças com um ciclo de condução na cidade de São Paulo, mais precisamente na linha de ônibus “expresso Tiradentes”.

Figura 7 – Representação dos ciclos de condução



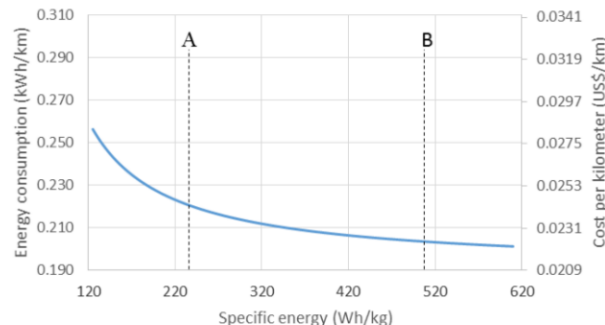
Fonte: Castro,2008

2.10. Avaliação dos sistemas de propulsão

Para a realização dos cálculos da quantidade de energia utilizada nas motorizações elétrica e a combustão interna, se faz necessário a utilização de uma ferramenta para tal análise. A quantidade de energia utilizada possui grande valia nas avaliações econômicas, pois com ela se consegue cálculos mais fideis junto aos custos de combustível.

Almeida e Vieira (2018), desenvolveu um estudo buscando identificar o consumo de energia, junto ao custo por quilometro e a influência de tais parâmetros devido a energia especifica na massa das baterias, de um veículo Tesla Model S, em um ciclo de condução já preestabelecido utilizando uma ferramenta para simular o consumo energético.

Figura 8 - Influência da energia específica no consumo de energia e custo por quilômetro



Fonte: Almeida e Vieira, 2018

Segundo Almeida e Vieira (2018), a energia especifica influencia significativamente no consumo de energia e o custo por quilômetros, onde quanto maior a energia específica, menor a massa e por consequência menores valores de custo por quilometro e consumo de energia.

3. METODOLOGIA

Diversas ferramentas foram utilizadas para identificar e analisar a viabilidade financeira da substituição de veículos diesel para alternativas elétricas, pois entender todos os custos atrelados durante o ciclo de vida de um veículo é de suma importância para identificar sua viabilidade comercial.

Para as análises se fez necessário a utilização de plataformas e ferramentas como a PAMVEC (Simpson,2005), *Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption*, que gerou um *output* do gasto energético de cada veículo. Entretanto, para utilização da mesma foi necessário utilizar parâmetros de *inputs* que serão apresentados no decorrer do trabalho

Posteriormente, foram realizadas análises financeiras levando em consideração o gasto energético de cada veículo e os custos atrelados, identificando cenários onde as alternativas para substituição dos veículos seriam vantajosas.

3.1. Simulação e aquisição dos dados

Segundo Simpson (2005), existem inúmeras de ferramentas que podem ser utilizadas para realizar análises tecno-econômicas para comparação de diferentes arquiteturas veiculares. Os simuladores dinâmicos são plataformas de modelagem que oferecem alta precisão e exatidão para realização de análises relacionadas a veículos elétricos, veículos a células de combustível e veículos convencionais, isso os torna ideais para simulação detalhada. No entanto, eles podem ser prejudicados pela sua complexidade pois para que essa ferramenta funcione de maneira adequada, é preciso fornecer a ela muitos parâmetros que muitas das vezes não são disponibilizados pelas montadoras de veículos. Neste sentido, a ferramenta PAMVEC é um modelo que incorpora uma série de recursos exclusivos projetados para reduzir sua complexidade e também fornecer maior precisão e exatidão.

Desenvolvida por Andrew G. Simpson na Universidade de Queensland, Austrália em 2005, a PAMVEC (Simpson,2005), é uma espécie de planilha eletrônica que permite fácil edição. Segundo Simpson (2005), a validação da ferramenta PAMVEC (Simpson,2005), ocorreu quando o autor comparou sua plataforma com o software de modelagem já consolidado ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*), embora tenha ocorrido divergências entre os resultados, Simpson defendeu que a ferramenta desenvolvida por ele é suficientemente precisa para analisar diferentes *powertrains*.

A PAMVEC (Simpson,2005), foi a plataforma utilizada para a realização da simulação, o seu funcionamento básico consiste na inserção de variáveis de entrada (*inputs*), que são frequentemente encontradas na literatura ou fornecidas pelas montadoras, obtendo como resultado as variáveis de saída (*outputs*). Por meio dos *inputs* inseridos, como o ciclo de condução e características das plataformas veiculares (enunciadas no tópico 2.1.2), a ferramenta realiza uma modelagem matemática.

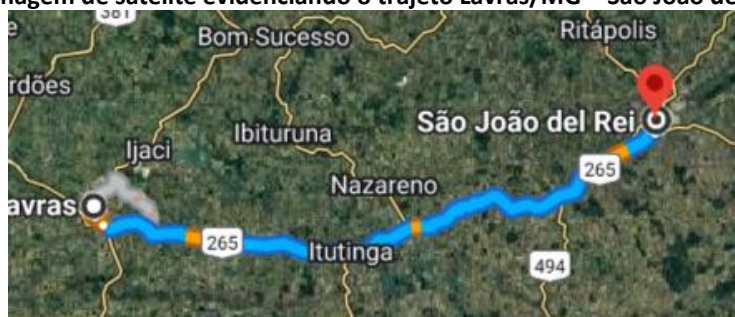
Por meio de diversos cálculos iterativos, a ferramenta consegue encontrar as massas e potências de diversos componentes do veículo. Após a obtenção desses parâmetros, por meio de substituições dos valores encontrados em diferentes equações, a PAMVEC (Simpson,2005), é capaz de estimar o consumo de energia por quilômetro para o veículo elétrico. Para as outras plataformas veiculares, a plataforma realiza uma conversão, a fim de obter resultados específicos para cada tipo de veículo analisado.

3.1.1. Ciclo de condução

A realização do ciclo de condução é feita, baseado no trajeto do veículo de transporte intermunicipal, que é ilustrado na Figura 9. Tal parâmetro é de suma importância, visto a utilização do mesmo nos cálculos presentes na ferramenta PAMVEC (Simpson,2005). Para a realização do ciclo, é utilizada uma série de ferramentas que vão auxiliar na elaboração do mesmo.

Para realização do ciclo de condução, foi realizada a viagem no transporte intermunicipal que liga as cidades de Lavras-MG a São João del Rei-MG, efetuando a medição dos parâmetros durante todo o trajeto. A viagem foi realizada no ônibus de uma empresa que realiza o transporte de passageiros entre as duas cidades, com o intuito de adquirir parâmetros da velocidade em função do tempo para as simulações necessárias.

Figura 9. Imagem de satélite evidenciando o trajeto Lavras/MG – São João del Rei/MG



Fonte: Google Maps (2023)

Para a medição da velocidade em função do tempo, utilizou-se o aplicativo *Speed Tracker* (Speed Tracker, 2023), um medidor de velocidade por GPS, que recolhe as estatísticas citadas anteriormente, no trajeto, gerando pontualmente o gráfico da velocidade *versus* tempo. Com o gráfico em mãos, o software *Engauge Digitizer* (Engauge Digitalizer, 2019), realizou a transcrição dos dados para uma série de pontos, possibilitando assim os cálculos.

O último passo, foi a realização dos cálculos como a velocidade média (EQ-2.1), que define o quão rápido ocorreu o percurso. A velocidade cúbica média (EQ-2.2), relaciona a velocidade média, em cada instante de tempo. Razão de velocidades (EQ-2.3), que quantifica a faixa das velocidades no decorrer do ciclo de condução. Aceleração característica (EQ-2.4), que é a taxa na qual a velocidade do veículo muda ao longo da viagem (Simpson, 2005), sendo as equações representadas por:

a) Velocidade média (Simpson, 2005)

$$V_{méd} = \frac{1}{t_{ciclo}} * \int_0^{t_{ciclo}} V * dt \quad (2.1)$$

Onde:

- $V_{méd}$ = Velocidade média;
- t_{ciclo} = Tempo total do ciclo;
- V = Velocidade instantânea;
- dt = Derivada em relação ao tempo.

b) Velocidade cúbica média (Simpson, 2005)

$$V_{cméd} = \sqrt[3]{\frac{1}{t_{ciclo}} * \int_0^{t_{ciclo}} V^3 * dt} \quad (2.2)$$

Onde:

- $V_{cméd}$ = Velocidade cúbica média;
- t_{ciclo} = Tempo total do ciclo;
- V = Velocidade instantânea;
- dt = Derivada em relação ao tempo.

c) Razão de velocidades (Simpson, 2005)

$$Rv = \frac{V_{cméd}}{V_{méd}} \quad (2.3)$$

Onde:

- Rv = Razão de velocidades
- $V_{méd}$ = Velocidade média;
- $V_{cméd}$ = Velocidade cúbica média;

d) Aceleração característica (Simpson, 2005)

$$Ac = \frac{\sum_1^n (v_{n+1}^2 - v_n^2)}{2 * V_{méd} * t_{ciclo}} \quad (2.4)$$

Onde:

- Ac = Aceleração característica
- $V_{méd}$ = Velocidade média;
- t_{ciclo} = Tempo total do ciclo;
- v_n = Velocidade instantânea no tempo n ;
- v_{n+1} = Velocidade instantânea no ponto seguinte.

3.1.2. Características das plataformas veiculares

As características das plataformas veiculares são parâmetros de entrada na ferramenta PAMVEC (Simpson,2005), na mesma foram preenchidos parâmetros referentes as características dos veículos, sendo de suma importância, pois utilizando-os, consegue-se uma análise mais condizente com a realidade. Os parâmetros são definidos da seguinte maneira:

- Massa da carroceria;
- Fator de inércia do veículo;
- Fator estrutural de massa do veículo;
- Coeficiente de arrasto aerodinâmico;
- Coeficiente de atrito com o solo;
- Massa da carga a ser transportada, o que incluiu pessoas, entre outros;
- Fração de freio regenerativo.

3.1.3. Fluxo de passageiros

A identificação do fluxo de passageiros, foi uma aproximação da realidade no cenário do transporte intermunicipal. A realização do mesmo baseou-se em coleta de dados de campo, onde o levantamento ocorreu no veículo em que realiza o transporte intermunicipal de passageiros, registrando o número de passageiros presentes. Esse método de coleta proporcionou informações precisas e em tempo real, refletindo a ocupação do veículo em situações reais de operação.

3.2. Análises financeiras

Segundo a empresa de pesquisa energética, Epe (2020), o procedimento para análise financeira, parte da divisão em distintas etapas. Na primeira, é realizada a análise CAPEX, *Capital Expenditure*, onde são definidos os custos relativos a cada tecnologia, compostos pelas despesas de capital. O próximo passo, é realizar análise referente as despesas operacionais (OPEX). Por fim, são calculados os principais indicadores financeiros do projeto de substituição das tecnologias: tempo de retorno do investimento (*payback*), valor presente líquido (VPL), *Total Coast of Ownership* (TCO) e Taxa interna de retorno (TIR). Com isso, foi avaliada a viabilidade econômica da eletrificação da frota.

3.2.1. CAPEX

No cálculo do CAPEX, consideraram-se o investimento inicial na aquisição do veículo e o custo da sua infraestrutura de recarga. Ressalta-se que a infraestrutura de abastecimento de veículos a diesel já se encontra em operação, enquanto a implantação dos equipamentos para a recarga elétrica dos veículos requer investimento adicional à sua aquisição. (Epe, 2020).

3.2.2. OPEX

Com a utilização da ferramenta PAMVEC (Simpson,2005), conseguiu-se os custos operacionais (OPEX) de cada veículo, utilizando o *output* da ferramenta cujo nome é energia total consumida, onde o mesmo é baseado nos custos por quilômetro (Castro, 2013). As análises para o veículo a combustão interna e híbrido são realizadas baseadas na seguinte equação:

$$Ckm = \frac{Ekm * CL}{DE} \quad (2.5)$$

Onde:

- Ekm = Energia total consumida por km [Wh/km];
- CL = Preço do combustível por litro [R\$/L];
- DE = Densidade de energia do combustível [Wh/L];
- Ckm = Custo por quilômetro [R\$/km].

O custo por quilômetro para a alternativa elétrica. Para tal, foi realizado o cálculo, baseado no consumo de energia por quilômetro, multiplicado pelo preço do KW/hora (Castro,2013).

$$Ckm = Ekm * Ckw \quad (2.6)$$

Onde:

- Ekm = Energia total consumida por km [KWh/km];
- Ckw = Preço do KWh [R\$/KW].

3.2.3. TCO

Com os dados referentes a quantidade de energia, pôde-se realizar uma análise para identificação dos custos atuais e futuros de uma possível aquisição de propriedade. A realização da mesma permite analisar a viabilidade comercial, comparando a eficiência econômica dos bens. A técnica de análise recebe o nome de *Total Coast of Ownership* (TCO) (Muñoz *et al.*, 2022). Para realização de tal análise, são considerados os custos do veículo, o de manutenção, custos com combustível e outros custos diversos, como os da plataforma de carregamento dos veículos elétricos. Todos esses custos são os realizados sob determinado período de tempo, atrelados a quilometragem rodada durante o período. Com isso, o cálculo do TCO, é realizado baseado nos custos totais anuais da plataforma, multiplicado pela vida útil do veículo.

3.2.4. Valor presente líquido

O valor presente líquido é um método de análise financeira, no qual se calcula o retorno do investimento, realizando os cálculos junto às taxas de desconto, como por exemplo a inflação, gerando resultados mais condizentes com a realidade (Epe, 2020).

$$VPL = \sum_{n=0}^{n=N} \frac{Fcj}{(1+k)^n} \quad (2.7)$$

Onde:

- VPL= Valor presente líquido;
- FCj = Fluxo Líquido de Caixa no instante j;
- K = Taxa de desconto aplicável aos fluxos de caixa no período j;
- N = Número de períodos.

3.2.5. Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno pode ser explicada como, a taxa de juros compostos que zera o saldo de um fluxo de caixa em qualquer data, onde a mesma é considerada como o somatório das entradas monetárias que coincide com o somatório das saídas. Para o cálculo da mesma, são considerados os retornos esperados, atrelados ao investimento inicial. Para sua realização, utilizou-se a plataforma Excel, onde foram imputados os dados e utilizou-se a abreviação TIR (-Investimento; Retorno mensal/anual) (Leme, 2023).

3.2.6. Payback

Payback é um modelo de análise econômica, em que após um investimento de capital espera-se recuperar os valores investidos após um determinado prazo (Brigham; Gapenski; Ehrhardt, 2001).

Existem duas análises que podem ser feitas através do método. O *payback* simples, que são somando os valores dos fluxos de caixas negativos com os valores dos fluxos de caixa positivos, até o momento em que essa soma resulta em zero. E o *payback* descontado, que se assemelha ao método anterior, entretanto leva em consideração valores descontados, ou seja, os valores foram trazidos em moeda do período zero por uma taxa de juros, geralmente a utilizada é a taxa Selic (Parize *et al.*,2015).

Para tal análise foi necessária a divisão do capital investido inicialmente pelo valor presente líquido, obtendo o ano em que ocorrerá o *payback*.

3.3. Cenários de substituição

Visando a análise em diversos cenários, foram estipuladas algumas condições que elucidarão todo o processo de tomada de decisão, criando vertentes, as quais definirão a melhor perspectiva de frota.

- Cenário 1: Substituição do veículo convencional a diesel, por um veículo elétrico;
- Cenário 2: Substituição do veículo convencional a diesel, por um veículo híbrido.

Para o atual cenário da empresa, fez-se necessário a aquisição de dois veículos, visto que os horários de saída e chegada não coincidem, ou seja, o horário de chegada do veículo na cidade de Lavras, é posterior a saída com o destino para São João del Rei.

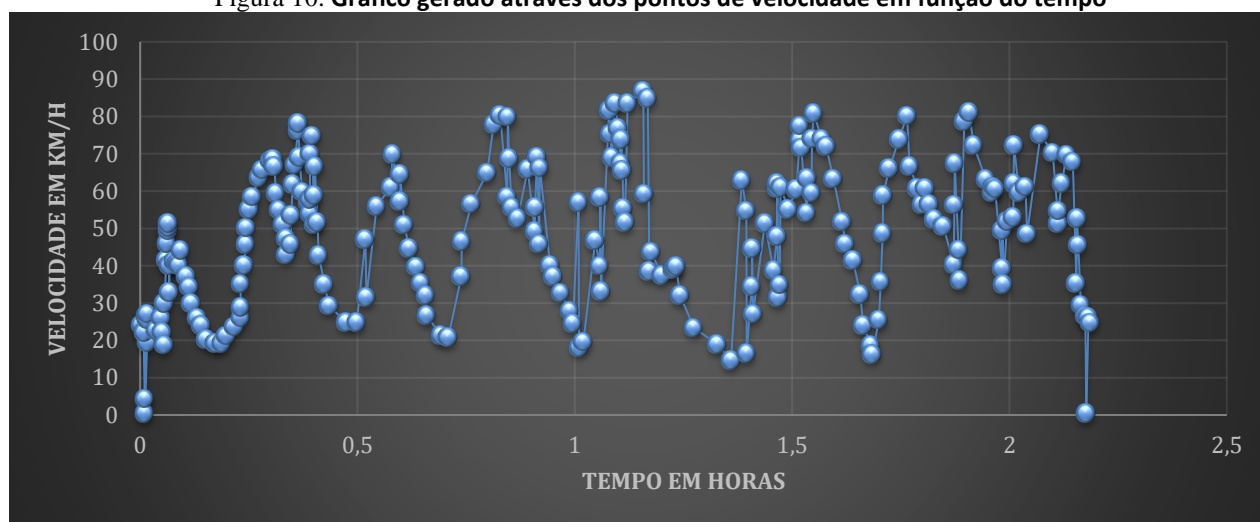
4. RESULTADOS

Com os tópicos apresentados na metodologia, foram realizadas as análises dos diversos parâmetros e variáveis a fim de realizar a viabilidade econômica das propostas de substituição. Para uma melhor análise, visando uma possível comparação em cenários internacionais, todos os custos obtidos em Reais (R\$) foram convertidos para Dólar (US\$), tendo como base a taxa de câmbio referente a data de 17/11/2023, onde segundo BCB (2023), o valor de um dólar americano, equivalia ao valor de R\$ 4,88.

4.1. Dados do ciclo de condução

Inicialmente, utilizado o aplicativo *Speed Tracker*, conseguiu-se um gráfico da velocidade em função do tempo. Logo, como já foi explicitado, o próximo passo foi o uso do software *Engauge Digitalizer*, responsável pela conversão de tal gráfico em uma série 230 dados, exportados para o Excel. Tais dados podem ser expressos através da Figura 10, representando um gráfico gerado, para uma melhor visualização dos pontos.

Figura 10. Gráfico gerado através dos pontos de velocidade em função do tempo



Fonte: Dos autores

Aplicando as equações 2.1 - 2.4, conseguiu-se os parâmetros que descreveram o ciclo de condução, onde os mesmos foram utilizados para o *input* na ferramenta PAMVEC.

Tabela 1. Parâmetros do ciclo de condução

Parâmetros	Valores
Velocidade Média	48,6 km/h
Velocidade cúbica média	50,53 km/h
Razão de velocidades	1,04
Aceleração característica	0,01 m/s^2

4.2. Informações dos veículos

O primeiro passo realizado foi o levantamento de dados do veículo usado no transporte intermunicipal que liga as cidades de Lavras (MG) e São João del Rei (MG). Com tais dados, foram buscados veículos para substituir o mesmo nos cenários já discutidos. Tais dados são de suma importância, onde com eles, pôde-se realizar a comparação com a possível substituição de *powertrain*. Os dados levantados, são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do veículo atual

Parâmetros	Dados
Modelo	Marcopolo Paradiso G7- chassi Mercedes Benz O-500
Lotação	42 passageiros
Custo do veículo	US\$ 200.819,67
Viagens por dia	5
Quilometragem por percurso	93,8 km
Quilometragem por ano	171.185 km

Figura 3. Veículo Marcopolo Paradiso G7



Fonte: Viajante Marco Polo (2020)

A escolha do veículo elétrico, se baseou na disponibilidade dos ônibus elétricos comercializados no Brasil. Após o levantamento de dados, determinou-se o veículo BYD D9F, que é de origem de uma empresa chinesa, porém desenvolvido em conjunto com a companhia já consolidada Marcopolo, o mesmo se trata de um modelo similar ao já em uso para o transporte intermunicipal, apresentando as seguintes características (Grande, 2021).

Tabela 3. Dados do veículo elétrico

Parâmetros	Dados
Modelo	Marcopolo Viaggio G7 1050 BYD D9F
Lotação	46 passageiros
Custo do veículo	US\$ 351.434,42
Custo estação de carregamento rápida	US\$ 32.991,80
Baterias	LifePO4 de 324 kWh 380 V.
Tempo de carga	4-5h
Motorização	4 elétricos, síncrono de ímãs permanentes, 201 cv e 56 kgfm
Autonomia	250 km

Figura 12. Marcopolo Viaggio G7 1050 BYD D9F



Fonte: Secco (2023)

O chassi híbrido selecionado para a análise, é o Volvo B5L S-Charge Híbrido. Um veículo que não possui a necessidade de carregamento plug-in, que possui como característica, a ligação de ambas as motorizações, elétrica e a combustão, de forma que as mesmas impulsionem o veículo em momentos distintos, baseado na necessidade de potência. (Mahmoud *et al.*, 2016). Vale ressaltar que veículos híbridos correspondem a uma redução de até 30% no consumo de combustível (Bazani, 2016).

Tabela 4. Dados do veículo híbrido

Parâmetros	Dados
Modelo	Volvo B5L S-Charge Híbrido
Lotação	46 passageiros**
Custo do veículo	US\$ 301.229,50

**A lotação trata-se de uma estimativa, onde a carroceria do veículo seria um Marcopolo Viaggio G7 1050. Tal premissa se deve ao fato da empresa Volvo, fabricante do chassi, possuir parceria com a empresa Marcopolo. Além das dimensões do chassi BYD D9F, citado anteriormente, serem próximas das medidas do chassi Volvo B5L.

A Figura 13 ilustra um veículo que está em uso atualmente no Brasil e utiliza o chassi Volvo B5L S-Charge Híbrido.

Figura 13. Volvo B5L S-Charge Híbrido



Fonte: Volvo Buses (2017)

Os chassis BYD tem autonomia de 280 km, e de acordo com o fabricante a carga completa ocorre em cerca de duas horas, baseado na quilometragem rodada diariamente (Feltrin, 2023). Os veículos elétricos necessitariam carregar pelo menos uma vez durante o dia. Deve-se então, baseado nos horários que são realizadas as linhas, realizar a parada de duas horas entre uma viagem e outra, além da carga durante o período noturno, após a última viagem.

Para a simulação na ferramenta PAMVEC é necessário a utilização da massa da carroceria. Para todos os casos, essa foi considerada como sendo 7,69 toneladas (Goedel *et al.*, 2014). Como a empresa Marcopolo possui o mesmo padrão de carrocerias para todos os chassis já citados, foi viável utilizar as mesmas massas para todas os tipos de chassis.

4.3. Fluxo de passageiros

Um ponto a ser identificado é a quantidade de passageiros no decorrer das viagens. Baseado no levantamento em campo quanto ao fluxo de passageiros, foi constatado que o ônibus opera com 70% de sua capacidade. Para utilização da ferramenta PAMVEC, a massa de cada passageiro considerada foi de 80 kg, logo, a massa total dos passageiros corresponde a 2352 kg, utilizando o fluxo de passageiros constatado.

4.4. Parâmetros de Input PAMVEC

Parâmetros como a massa da carroceria e dos passageiros já foram citados. Para os parâmetros remanescentes foram utilizados dados presentes na literatura.

Segundo Barth (2005), o fator de inércia (F_k) para veículos pesados é de 1,1 e o coeficiente de arrasto (C_d) para veículos como os ônibus é de 0,65.

O fator estrutural de massa do veículo (K_{estrt}) e o coeficiente de atrito com o solo (C_{rr}) para esse tipo de veículo utilizado por Simpson (2005), possui respectivamente os valores de $K_{estru}=1,15$ e $C_{rr}=0,01$.

A fração de freio regenerativa para veículos elétricos foi considerada como de 50%, segundo simulações realizadas por Simpson (2005).

4.5. Custos CAPEX

Após o levantamento de todos os dados já citados, iniciaram-se as análises econômicas. O primeiro aspecto a ser levantado foram os custos CAPEX.

Em virtude dos ônibus híbridos e elétricos aptos para o transporte intermunicipal ainda não serem difundidos no território nacional, além da indisponibilidade dos custos de aquisição de tais veículos, um outro método foi adotado para estimar os custos.

A estratégia adotada para os valores dos veículos que substituirão o ônibus diesel atual, parte do pressuposto de que é possível determinar o custo dos ônibus elétricos disponíveis no Brasil por meio de um fator proporcional em relação aos seus equivalentes movidos a diesel. Essa abordagem segue uma prática semelhante ao que é feito pelo *California Air Resources Board* (CARB) para impulsionar o desenvolvimento do Regulamento Inovador de Trânsito (Slowik *et al.* 2018). De acordo com os dados do CARB, há uma proporção de 1,75 entre o valor de aquisição de um ônibus elétrico com bateria e seu equivalente convencional a diesel. Para os custos dos veículos híbridos, o custo esperado é de 50% a mais que o valor do veículo.

Tabela 5. Valor dos veículos

Modelo do Veículo	Valor em Dólar
Veículo Diesel (atual)	US\$ 200.819,67
Veículo Elétrico	US\$ 351.434,42
Veículo Híbrido	US\$ 301.229,50

Os custos da infraestrutura daqueles que necessitam de carregamento é de US\$ 32.991,80 para ônibus com chassi da BYD, com carregamento rápido. A infraestrutura para os veículos diesel não é considerada, em virtude da já difundida rede de postos de abastecimento, as quais não apresentam custos adicionais.

4.6. Custos OPEX

Os custos de operação foram divididos em dois grupos distintos, sendo eles os custos de manutenção e custos com combustível/eletricidade, no primeiro caso foi realizado uma estimativa baseada em parâmetros já estabelecidos. Já os custos com combustível e eletricidade foram realizados baseados na simulação na ferramenta PAMVEC.

4.6.1. Custos manutenção

Os custos operacionais com manutenção do veículo a diesel que realiza o transporte atualmente foram estimados baseado em um documento desenvolvido pela ANTP, ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS, com o intuito de oferecer suporte aos gestores públicos e à sociedade civil ao abordar os custos associados aos serviços de transporte coletivo urbano por ônibus, contribuindo assim para o aprimoramento desse setor, identificando por exemplo se ocorre a tarifação adequada (Antp,2017).

A divisão dos custos foi subdividida nos tópicos seguintes.

4.6.1.1. Custos com lubrificantes

Itens referentes a lubrificação dos veículos podem ser organizados na Tabela 6, onde relaciona-se o item em questão, com a frequência baseada na quilometragem rodada, além da quantidade gasta em litros e o valor total gasto com a substituição do lubrificante, levando em consideração as recomendações do fabricante, como viscosidade e classe.

Tabela 6. Custos estimados com lubrificantes

Quilometragem	Item	Quantidade (L)	Valor (US\$) **
20.000	Óleo de motor	26	US\$ 119,88
20.000	Óleo de eixo	9	US\$ 128,07
20.000	Graxa de lubrificação	1,5	US\$ 16,39
30.000	Óleo de câmbio	11	US\$ 135,25
150.000	Fluido de freio	1	US\$ 20,49
70.000	Óleo da direção hidráulica	3,5	US\$ 112,70
70.000	Fluido de arrefecimento	42	US\$ 69,67

**O valor foi estimado conforme pesquisas realizadas em 10/09/2023.

Baseado na quilometragem anual rodada, de aproximadamente 171.185 km. Os custos com lubrificantes representam em média um valor de US\$ 1.610,54 por ano.

4.6.1.2. Custos com ARLA-32

O consumo médio do ARLA 32 é de 3% a 5% do consumo de diesel (Antp,2017). Segundo as análises realizadas por meio do PAMVEC, consome-se cerca de 35.000 litros de diesel por ano. O custo médio do litro do ARLA-32 é de R\$ 4,00 (Cobliblog ,2020). O custo anual estimado com ARLA-32 é de US\$ 1.403,15, cerca de 1710 litros de ARLA baseado na estimativa de 5% do total consumido de diesel.

4.6.1.3. Custos com pneus

Segundo Antp (2017), a vida útil de um pneu varia de 85.000 a 125.000 km, logo, em média espera-se uma troca de todos os pneus anualmente. O que geraria um custo de US\$ 3.688,52 a troca dos 10 pneus.

4.6.1.4. Peças e acessórios

Peças e acessórios, são itens necessários a cada troca de óleo, como os filtros, ou até mesmo peças que se desgastam com o tempo como amortecedores, suspensões e embreagem. Baseado em métodos, também foi criada uma tabela para estimar esses custos.

Tabela 7. Custos com peças e acessórios

Quilometragem	Item	Valor (US\$)
20.000	Filtros de óleo, combustível, ar e separador de água	US\$ 69,67
78.000	Reparos na embreagem	US\$ 1229,50
150.000	Reparos na suspensão e amortecedores	US\$ 2459,01
40.000	Troca de lonas de ferio	US\$ 122,950

Assim, como a estimativa foi realizada nos lubrificantes, no caso das peças e acessórios, o custo anual dos mesmos baseado na quilometragem anual é da casa de US\$ 2.329,91.

Contudo, estima-se que o custo com manutenção de um veículo como o que realiza a rota intermunicipal Lavras-São João del Rei é de US\$ 9.426,22 anualmente. Baseado na quilometragem rodada anualmente, o custo representa o valor de 0,055 US\$/km.

Segundo Mdic (2018), ônibus elétrico a bateria apresenta custo de manutenção 24% inferior a um modelo diesel, já um híbrido 14% inferior a um diesel, baseando-se nessa informação, foram calculados os custos por quilômetro com os veículos elétricos e híbridos, que foram respectivamente, 0,041 US\$/km e 0,047 US\$/km.

4.6.2. Custos com combustível/eletricidade

Com o auxílio da ferramenta PAMVEC, após o *input* dos dados já citados, se consegue o consumo de energia, de determinada motorização, baseado no ciclo de condução. Com tais valores, utiliza-se as equações 2.5 para veículos diesel e híbridos, a equação 2.6 é utilizada para os veículos elétricos, com finalidade de calcular os custos com combustível por quilômetro. Pode-se encontrar na Tabela 8 os valores encontrados após a simulação realizada.

Tipo de veículo	Ekm
Diesel	1884
Elétrico	560
Híbrido	1381

Para o cálculo dos custos com combustível, utiliza-se a equação 2.5, onde se faz necessário o valor do litro de combustível, que em média, no mês de setembro de 2023 foi de R\$ 6,22 por litro (1,27 US\$/L), segundo os dados fornecidos por Petrobrás (2023). Outro parâmetro é a densidade de energia encontrada dentro da própria ferramenta, que é 10360 Wh/L. Partindo disso, o custo por quilômetro foi calculado, representando um valor de 0,23 US\$/km para os veículos a diesel. Os custos para o veículo híbrido representam o valor de 0,17 US\$/km.

O consumo de energia para o ônibus elétrico é de 1,153 KWh/km. O preço médio do KW/hora em Minas Gerais, no ano de 2023 até o mês de setembro, foi de R\$ 0,65313 (0,1338 US\$/KWh) considerando a bandeira amarela de consumo, segundo Cemig (2023). Contudo, após os cálculos, é identificado um valor de 0,075 US\$/Km.

Após a realização dos cálculos já citados, a Tabela 9 foi gerada para uma melhor visualização das informações.

Parâmetro	Diesel	Elétrico	Diesel híbrido
CAPEX- Aquisição	US\$ 200.819,67	US\$ 351.434,42	US\$ 301.229,50
CAPEX- Infraestrutura	-	US\$ 32.991,80	-
OPEX - Combustível	0,23 US\$/km	0,075 US\$/km	0,17 US\$/km
OPEX- Manutenção	0,055 US\$/km	0,0418 US\$/km	0,0473 US\$/km

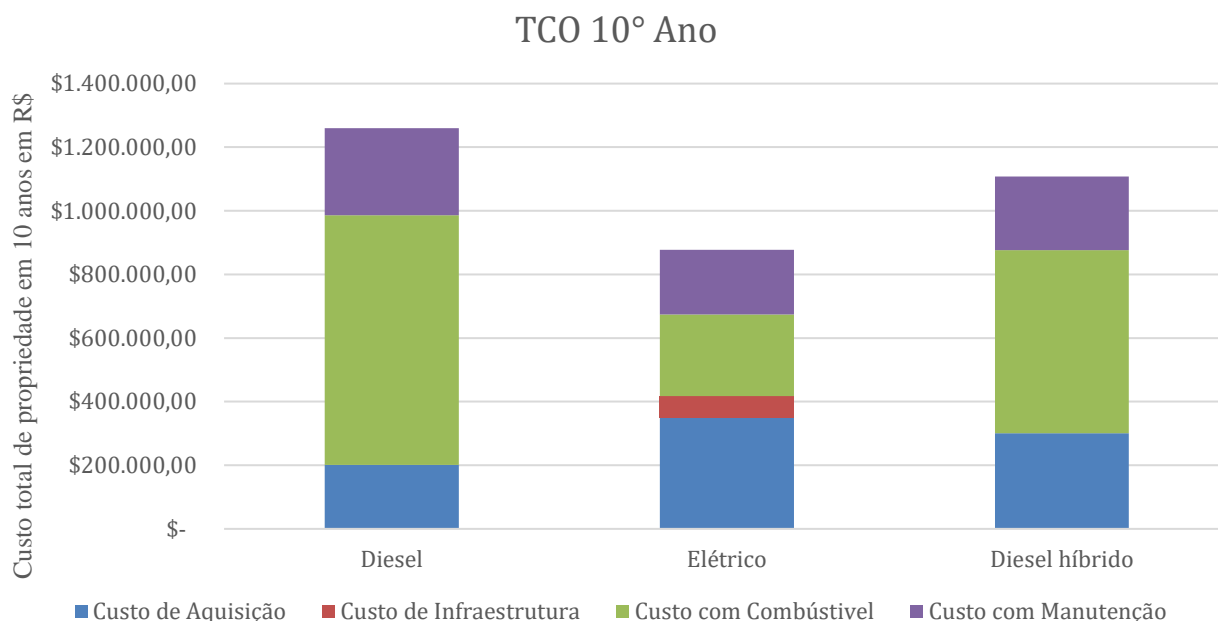
Para as análises econômicas a seguir, vale ressaltar que os custos enumerados na Tabela 9 foram multiplicados por 2, em virtude da necessidade de dois veículos.

4.7. Tco

Como já foi enumerado, as análises foram divididas em possíveis cenários. A análise TCO seguirá a subdivisão iniciando pelo primeiro cenário. Para tal análise, foram considerados os 171.185 km rodados anualmente no veículo intermunicipal. Além disso, o período identificado como a vida útil dos veículos de acordo com as análises de Epe (2020), é de 10 anos.

Realizou-se o TCO para cada cenário, identificando os custos da propriedade após o período de tempo especificado. Utilizando os custos relacionados aquisição do veículo, a infraestrutura, no caso dos veículos elétricos, custos atrelados ao combustível e a manutenção. Contudo, foi gerado um gráfico com os custos totais de todos os cenários.

Figura 14. Estimativa do TCO ao longo de 10 anos para cada cenário estipulado



Fonte: Dos Autores

Identificando o TCO em todos os cenários, pode-se observar que em ambos os cenários de substituição os custos atrelados são menores que os indicados pela motorização atual.

A vantagem do cenário com a substituição por um veículo elétrico são os custos reduzidos com combustíveis, representados por 56% de economia. Um ponto a ser levantado é a análise frente a instabilidade do preço dos combustíveis fósseis, como já ocorreu em alguns períodos, onde tal valor pode sofrer altas repentinas, fazendo com que os custos com combustível dos veículos diesel fiquem altos, gerando vantagens para os veículos elétricos.

A análise TCO mostrou que tanto a eletrificação quanto a hibridização da frota são viáveis no quesito econômico, pois em ambos os casos, as colunas dos gráficos representaram valores menores do que o veículo a diesel.

O cenário de hibridização da frota de veículos se demonstrou viável devido ao fato de o custo de sua aquisição ser intermediário, estando menor que o ônibus elétrico e maior que o diesel, além de representar uma boa economia de combustível, quando comparado ao diesel, representando 17% de economia.

Vale ressaltar que a análise TCO, não leva em consideração taxas de juro, onde nos cenários, os valores não são trazidos para o presente, indicando uma não coerência na análise econômica. Cabe a utilização de outras ferramentas para uma análise financeira mais condizente com a realidade.

4.8. VPL

Inicialmente, deve-se organizar os dados referentes aos fluxos de caixa, ou investimento inicial de cada cenário, que é definido como a diferença entre os custos CAPEX do veículo existente e os possíveis cenários de substituição, atrelado as expectativas de retorno, que é a diferença entre os custos OPEX de cada caso, os quais são organizados na Tabela 10.

Tabela 10. Diferença dos Custos nos cenários

Cenário	Investimento inicial	Retorno anual
Elétrico	US\$ 334.016,39	US\$ 59.914,75
Híbrido	US\$ 200.819,67	US\$ 25.256,80

Para a análise de valor presente líquido utiliza-se a equação 2.7, com um período baseado também na vida útil dos veículos, de 10 anos. E a média da taxa de juros Selic de 9,22% segundo a projeções para o os últimos 10 anos (Banco central do Brasil, 2023). Logo, tem-se os valores referentes a cada um dos cenários.

Tabela 11. Valor presente líquido nos cenários

Cenário	VPL
Elétrico	US\$ 46.800,35
Híbrido	-US\$ 40.288,02

Nessa análise, apenas o cenário de substituição por veículos elétricos se mostrou viável. Na eletrificação o VPL é representado pelo valor de US\$ 46.800,35. O que mais impactou nesse caso de substituição, foi o menor valor dos gastos com combustíveis, quando em comparação ao veículo diesel.

O cenário de hibridização, possui um valor presente líquido de -US\$ 40.288,02 após os 10 anos de vida útil, demonstrando que tal cenário é não vantajoso, representando a inviabilidade econômica. No cenário de hibridização o veículo ainda é abastecido com diesel, onde sofre variações nos custos com combustíveis, podendo ao longo dos anos adquirir valores que beneficiem a substituição ou a invalide. Um ponto importante para ressaltar é que os custos menores com combustível e manutenção nesse cenário não foram o suficiente para viabilizar a proposta.

Utilizando das análises de VPL, para o caso de hibridização, foram realizadas algumas simulações com o auxílio do Excel, visando identificar cenários onde validariam a proposta que substitui os veículos diesel por híbridos, organizados na Tabela 12.

Tabela 12. Variação dos parâmetros de veículos híbridos buscando a viabilidade

Parâmetro	Valor Máximo
Custo com Combustível Veículo Híbrido	0,149 US\$/km
Custo com Manutenção Veículo Híbrido	0,020 US\$/km
Custo de Aquisição do Veículo Híbrido	US\$ 281.085,50
Custo de Aquisição do Veículo Diesel	US\$220.963,68
Custo com Combustível Veículo Diesel	0,24 US\$/km
Custo com Manutenção Veículo Diesel	0,098 US\$/km

O aumento de 0,01 US\$/km para o custo com combustível dos veículos diesel chamou atenção, visto que é uma pequena variação no valor que viabilizou a proposta. O custo com manutenção dos veículos diesel teria que aumentar 0,046 US\$/km para validar a proposta dos híbridos. O custo de aquisição dos veículos híbridos teria que diminuir 7% para viabilidade.

4.9. TIR

Para a análise de taxa interna de retorno, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 13. Taxa interna de retorno

Cenário	TIR
Elétrico	12%
Híbrido	4%

Para a proposta ser viável, o valor da TIR deve ser maior que a taxa de juros estipulada, 9,22 %. A análise da taxa interna de retorno comprovou os estudos realizados com o VPL, onde apenas nos cenários de substituição por veículos elétricos os valores da TIR foram maiores do que a taxa de juros estipulada, sendo viável economicamente nesse caso. Para os híbridos, a taxa ficou relativamente menor, da casa de 4%, inviabilizando a proposta.

4.10. Payback

O *payback* foi calculado para dez anos no cenário onde ocorreu a substituição do veículo diesel pelo veículo elétrico, como observado na Tabela 14, o retorno do capital investido acontecerá no 9º ano (US\$ 21.996,90), que ainda se encontra dentro da vida útil estipulada do veículo.

Tabela 14. Payback Eletrificação

Ano	Análise Payback
0	US\$ -334.016,39
1	US\$ -279.159,45
2	US\$ -228.933,36
3	US\$ -182.947,19
4	US\$ -140.843,02
5	US\$ -102.293,16
6	US\$ -66.997,54
7	US\$ -34.681,47
8	US\$ -5.093,42
9	US\$ 21.996,90
10	US\$ 46.800,35

O mesmo cálculo foi realizado para o cenário de substituição do veículo diesel pelo veículo híbrido. Através da Tabela 15, conclui-se que o *payback* não acontecerá dentro da vida útil estipulada, no 15º ano (US\$ 150,24).

Tabela 15. Payback Híbridização

Ano	Análise Payback
0	US\$ -200.819,67
1	US\$ -177.694,97
2	US\$ -156.522,37
3	US\$ -137.137,10
4	US\$ -119.388,28
5	US\$ -103.137,75
6	US\$ -88.259,03
7	US\$ -74.636,33
8	US\$ -62.163,62
9	US\$ -50.743,81
10	US\$ -40.288,02
11	US\$ -30.714,88
12	US\$ -21.949,87
13	US\$ -13.924,78
14	US\$ -6.577,14
15	US\$ 150,24
16	US\$ 6.309,71

Baseado nas análises de *payback* expostas nas tabelas acima, a alternativa em que os veículos utilizados atualmente são substituídos por elétricos é a mais viável. Os veículos híbridos se demonstraram inviáveis, com um *payback* no 15º ano. O custo reduzido com combustível foi o fator implicante para o alcance dos melhores resultados para veículos elétricos, quando em comparação às outras configurações de motorização, assim como elucidado nas outras análises.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizada uma análise econômica visando identificar a viabilidade econômica de possíveis substitutos ao veículo atual de transporte coletivo que liga a cidades de Lavras a São João del Rei. Após uma série de dados levantados, simulações e aplicações de ferramentas econômicas, identificou-se cenários onde tais substituições seriam viáveis no aspecto econômico.

Com base nas análises de valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback* conclui-se que a alternativa que substitui os veículos a diesel pelos elétricos foi a mais viável no quesito econômico, encontrando valores que validaram as propostas. O fator crucial que proporcionou a viabilização dessa categoria de veículos, foi o baixo custo com o combustível, que atrelado aos menores custos com manutenção amortizou o custo inicial de aquisição e infraestrutura dos veículos elétricos.

A substituição pelos veículos híbridos se mostrou inviável, ainda que o cenário em questão demonstre economia com combustível e manutenção.

Nas análises realizadas, a eletrificação total da frota se tornou atrativa, entretanto vale ressaltar que o investimento em uma nova tecnologia como a apresentada, pode representar uma grande ascensão ou a falência de uma empresa.

Tais análises levaram em conta os custos atuais de todas as tecnologias, o que se espera é que com o decorrer do tempo, os veículos elétricos fiquem mais baratos, fazendo com que os mesmos se difundam e gere cenários com custos cada vez mais atrativos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores pela dedicação e comprometimento com a arte de ensinar, especialmente ao meu orientador Professor Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez pelo apoio e orientações deste trabalho. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram como parte da minha formação.

7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, H; Mehmet, O. An overview of regenerative braking systems, *Journal of Energy Storage*, 2022.
- Almeida, S; Vieira, F. Modeling and analysis of an electric vehicle using pamvec, *Revista de Engenharia Térmica*, 2018.
- Antp. Custos Dos Serviços De Transporte Público Por Ônibus. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2017/8/21/1.-metodo-de-calculo--final-impresso.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.
- Banco Central Do Brasil: Taxas de juros básicas – Histórico. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- Barth, M ; Younglove ,T ; Scora, G. Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. University of California, Riverside, 2005.
- Basma, H, et al. Evaluation of the techno-economic performance of battery electric buses: Case study of a bus line in Paris, *Research in Transportation Economics*,2022.
- Bazani, A. Diário do Transporte. *In*: Volvo apresenta ônibus híbrido em Curitiba. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2016/03/18/volvo-apresenta-onibus-hibrido-articulado-em-curitiba/>. Acesso em: 3 jan. 2023.
- BCB. Banco Central do Brasil. [S. l.], 17 nov. 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- Brigham, E.F.; Gapenski, L.C.; Ehrhardt, M.C. *Administração Financeira Teoria e Prática*. São Paulo: Atlas, 2001.
- Brunetti, F. *Motores de combustão interna: volume 1*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- Çengel, Y; Boles, M. *Termodinâmica*. 7. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. 1018 p

- Castro, F.A. Utilização da ferramenta pamvec para modelagem de caminhões de coleta de lixo. 2013. TCC (Graduação ao Curso de Engenharia Mecânica) - UFRJ, [S. l.], 2013.
- Cemig. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Cobliblog. O que é ARLA 32 e qual sua importância para veículos? [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.cobli.co/blog/o-que-e-arla>. Acesso em: 14 set. 2023.
- Engauge Digitalizer: Extracts data points from images of graphs. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://markummittchell.github.io/engauge-digitalizer/>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- Empresa de Pesquisa Energética (Epe). NOTA TÉCNICA EPE/DEA-DPG/SEE- SGB/001/2020: Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil.
- Figenbaum, Erik Retrospective Total cost of ownership analysis of battery electric vehicles in Norway, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022.
- Goedel, F; Iturrioz, I; Dias de meira jr, A; Walber, M. Simulação numérica da estrutura de um ônibus rodoviário submetida a impacto semifrontal contra uma parede rígida. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131514000601#:~:text=Esta%20massa%20considera%20a%20carroceria,8.720%20kg%20na%20parte%20traseira>. Acesso em: 24 nov. 2023
- Girardi, P., Brambilla, C., Gargiulo, A. A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015. Brasília, 2020.
- Google Maps. [S. l.: s. n.], 2023. Trajeto Lavras/Mg-São João del Rei/MG. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/47mXeg2ZoA7WDsqKA>. Acesso em: 19 nov. 2023.
- Feltrin, A. Ônibus elétricos BYD de dois andares chegam ao Chile. [S. l.], 28 out. 2023. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/onibus-eletricos-byd-de-dois-andares-chegam-ao-chile/>. Acesso em: 4 out. 2023.
- Khaligh, A; Li, Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles: State of the Art, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010.
- Leme, M. Aula 3 – Avaliação Econômica. In: Aula 3 – Avaliação Econômica: Disciplina: Projeto de Máquinas Térmicas. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://campusvirtual.ufla.br/presencial/mod/resource/view.php?id=934153>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- Malaquias, A., Antonio, F., Langeani, M., Coelho, J. The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the Brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019.
- Mahmoud, M., Garnett, R., Ferguson, M., Kanaroglou, P. Electric buses: A review of alternative powertrains. Renewable & Sustainable Energy Review, 2016.
- Mercado Livre: Marcopolo Paradiso 1200 G8 Ano 2023 M.b O500. [S. l.], 2023. Disponível em: https://veiculo.mercadolivre.com.br/MLB-3887454320-marcopolo-paradiso-1200-g8-ano-2023-mb-o500-rsd-jm-cod409-_JM#position=2&search_layout=grid&type=item&tracking_id=ffacca20-678b-45b4-bf2f-dc93f570288d. Acesso em: 28 nov. 2023.
- Muñoz, P., Franceschini, E., Levitan, D., Rodriguez, C., Humana, T., Correa, G. Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses, Energy Conversion and Management, 2022.
- Nutramon, T., Supachart, C. Influence of Driving Cycles on Exhaust Emissions and Fuel Consumption of Gasoline Passenger Car in Bangkok. Journal of Environmental Sciences, 2009.

- Parize, D., Reichert, J., Cunico, L. Estudo de viabilidade financeira de uma franquia. encitec, [s. l.], 2015. Disponível em: https://www2.fag.edu.br/coopex/inscricao/arquivos/encitec/20151022-202346_arquivo.pdf. Acesso em: 31 jan. 2023.
- Petrobrás. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-diesel>. Acesso em: 03 out. 2023.
- Secco: Marcopolo viaggio 1050 byd 100% elétrico inova transporte gaúcho. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.seccocomunicacao.com.br/single-post/marcopolo-viaggio-1050-byd-100-el%C3%A9trico-inova-transporte-ga%C3%A7o>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- Serasa: Carro elétrico compensa? Conheça prós e contras. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.serasa.com.br/carteira-digital/blog/carro-eletrico-compensa/>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- Simpson, A.G. Parametric Modelling of Energy Consumption in Road Vehicles. Ph.D. dissertation, The University of Queensland, Queensland, Australia, 2005.
- Slowik, P., Araujo, C., Dallmann, T., Façanha, C. Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-de-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/>. Acesso em: 1 out. 2023.
- Speed Tracker: GPS Speedomete. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://apps.apple.com/us/app/speed-tracker-gps-speedometer/id604836034>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- Viajante Marco Polo: Al mariah transport aumenta frota com 29 novos Marcopolo Paradiso New G7 1200 com BIOSAFE e Tecnologia EURO VI. [S. l.], 27 out. 2020. Disponível em: <https://viajante.marcopolo.com.br/noticias/al-mariah-transport-aumenta-frota-com-29-novos-marcopolo-paradiso-new-g7-1200-com-biosafe-e-tecnologia-euro-vi/>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- VOLVO Buses: Híbrido volvo é apresentado à prefeitura municipal de caxias do sul. [S. l.], 4 jun. 2017. Disponível em: <https://www.volvobuses.com.br/news1/blog/noticias/alem-de-trazer-onibus-eletrico-hibrido-ao-brasil-volvo-testara-sua-primeira-frota-de-onibus-100-eletrica.html>. Acesso em: 17 nov. 2023.

ECONOMIC ANALYSIS OF THE ELECTRIFICATION OF THE INTERCITY BUS LINE

Pedro Henrick Ávila Silva, pedro.silva8@estudante.ufla.br¹

Carlos Eduardo Castilla Alvarez, carlos.alvarez@ufla.br¹

¹Universidade Federal de Lavras, 37.200-000, Lavras, MG, Brazil

Abstract: *The electrification of vehicles is becoming a prominent topic, with electric buses playing a crucial role in transforming public transportation systems, providing environmental, social, and economic benefits. The transition to this technology represents a significant step toward more sustainable and resilient cities. However, the economic viability of electrification proposals is still something to be identified, aiming to understand in which scenarios it is advantageous. With the goal of identifying the feasibility of possible replacements of internal combustion engine vehicles with electric vehicles, this study aims to conduct research on intermunicipal transportation operating between the cities of São João del Rei and Lavras-MG. Initially, data related to various replacement proposals were collected, along with data from the vehicle currently in use in the city. The next step was to identify the costs of each platform, with the assistance of the vehicle analysis tool, PAMVEC. Finally, established methods were used to identify the economic aspects of each powertrain. The results show that electrification based on the current scenario of intermunicipal transportation is feasible, where fully electric vehicles presented more satisfactory values in economic analyses compared to hybrids. This is due to the fact that the costs of "fuel" for electric buses, in this case, energy, were significantly lower.*

Keywords: *electrification, bus, analysis, economical, electric vehicles*

The authors are the only ones responsible for the content of this work.