

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Gilson de Souza Pereira Junior

**IFMG BETIM - TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO TRANSPORTE
PÚBLICO BRASILEIRO: METODOLOGIA DE ESTUDO SOBRE
INFRAESTRUTURAS DE RECARGA PARA ÔNIBUS ELÉTRICOS**

Betim
2025

GILSON DE SOUZA PEREIRA JUNIOR

**IFMG BETIM - TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO TRANSPORTE
PÚBLICO BRASILEIRO: METODOLOGIA DE ESTUDO SOBRE
INFRAESTRUTURAS DE RECARGA PARA ÔNIBUS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes

Betim
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

P436t Pereira Júnior, Gilson de Souza

Transição energética no transporte público brasileiro metodologia de estudo sobre infraestruturas de recarga para ônibus elétricos / Gilson de Souza Pereira Júnior. – 2025.

115 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes

1. Transição energética. 2. Transporte público. 3. Veículos elétricos. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Pereira Júnior, Gilson de Souza. II. Título.

CDU: 681.5

GILSON DE SOUZA PEREIRA JUNIOR

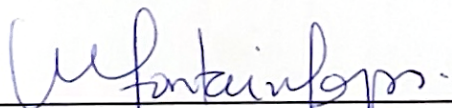
**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO TRANSPORTE PÚBLICO
BRASILEIRO**

Metodologia de Estudo sobre Infraestruturas de recarga para ônibus elétricos.


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Betim como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Betim, 04 de julho de 2025.

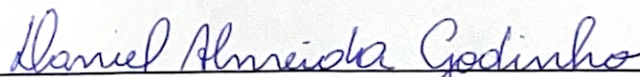
BANCA EXAMINADORA



Prof. Welinton La Fontaine Lopes
DAUTI – IFMG Campus Betim



Prof. Bruno Porto Caetano
DAUTI – IFMG Campus Betim



Prof. Daniel Almeida Godinho
DAUTI – IFMG Campus Betim

Dedico este trabalho ao meu amor pela engenharia e todas as pessoas que me suportaram até chegar aqui, colegas , amigos, professores e familiares.

AGRADECIMENTOS

PORTUGUÊS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Gilson de Souza Pereira e Desedina Dalva Lemos Barboza, estes meus progenitores e que puderam mais uma vez me prover com uma oportunidade que eles não tiveram. Dedico este esforço a minha amada Fabienne Lischer, que me manteve motivado e focado nos momentos que me faltou energia para trabalhar e produzir. Aos meus amigos e colegas de trabalho e da vida que contribuíram diretamente ou indiretamente na construção deste texto e do trabalho. João Pedro Tabelini Domingues, Rafael Henrique de Souza Vieira, Norberto Rodrigues Granado, Windson Braga e Roger Oton. Agradeço também ao meu orientador Wellington Lafontaine por toda a paciência do mundo. Ao professor Leandro Freitas, me desculpo por todas as vezes que enrolei e faltei com comprometimento com a minha própria causa.

"Não é possível obter resultados diferentes, se você permanecer por toda a sua vida seguindo os mesmos caminhos, métodos e erros, se arrisque, abrace o imprevisível!!!".

Abraços.

"Os cientistas estudam o mundo como ele é. Os engenheiros criam um mundo como ele nunca havia sido" - Theodore Von Kármán.

RESUMO

Nas últimas décadas, a crescente demanda por fontes de energia limpa tem impulsionado o mercado de energias renováveis em escala global. Iniciativas como a COP (Conferência das Partes), criada em 1994 pela ONU, em Berlim, têm tornado imprescindível a inclusão de questões ambientais e climáticas nos planejamentos de curto, médio e longo prazo dos governos ao redor do mundo. Esse movimento consolida a sustentabilidade como um elemento central no planejamento governamental, inclusive no Brasil, com foco na redução das emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono. Nesse contexto, a eletrificação das frotas públicas e privadas de veículos automotores surge como uma solução eficaz para mitigar os impactos ambientais e climáticos. Diversas prefeituras brasileiras já iniciaram essa transição energética, investindo em frotas de ônibus elétricos e dando os primeiros passos rumo à consolidação da eletromobilidade urbana no país. Este trabalho tem como objetivo analisar os principais eletroterminais públicos de recarga já instalados no Brasil, identificando seus pontos fortes e fracos. A análise abrangerá aspectos qualitativos — como os impactos sociais e ambientais — e quantitativos — envolvendo critérios técnicos e econômicos. Como resultado, pretende-se destacar as melhores práticas e recomendações para a implantação eficiente de eletroterminais no contexto urbano brasileiro.

Palavras-chave: Eletromobilidade, Eletroterminais, Clima, Sustentabilidade, Frotas Públicas, Mobilidade Urbana.

ABSTRACT

In recent decades, the growing demand for clean energy sources has driven the global renewable energy market. Initiatives such as the COP (Conference of the Parties), created in 1994 by the UN in Berlin, have made it essential to incorporate environmental and climate-related issues into the short-, medium-, and long-term planning of governments worldwide. This movement establishes sustainability as a central element in governmental planning, including in Brazil, with a focus on reducing greenhouse gas emissions such as carbon dioxide. In this context, the electrification of public and private vehicle fleets emerges as an effective solution to mitigate environmental and climate impacts. Several Brazilian municipalities have already begun this energy transition by investing in electric bus fleets, thus taking the first steps toward consolidating urban electromobility in the country. This study aims to analyze the main public electric bus charging terminals already installed in Brazil, identifying their strengths and weaknesses. The analysis will cover both qualitative aspects—such as social and environmental impacts—and quantitative aspects—including technical and economic criteria. As a result, the study seeks to highlight best practices and recommendations for the efficient implementation of electric bus terminals in Brazilian urban settings.

Keywords: Electromobility, Electric Charging Terminals, Climate, Sustainability, Public Fleets, Urban Mobility.

RESUMEN

En las últimas décadas, la creciente demanda de fuentes de energía limpia ha impulsado el mercado de energías renovables a nivel global. Iniciativas como la COP (Conferencia de las Partes), creada en 1994 por la ONU en Berlín, han hecho imprescindible la inclusión de cuestiones ambientales y climáticas en la planificación a corto, mediano y largo plazo de los gobiernos en todo el mundo. Este movimiento consolida la sostenibilidad como un elemento central en la planificación gubernamental, incluso en Brasil, con un enfoque en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono. En este contexto, la electrificación de las flotas de vehículos públicos y privados surge como una solución eficaz para mitigar los impactos ambientales y climáticos. Varias alcaldías brasileñas ya han iniciado esta transición energética, invirtiendo en flotas de autobuses eléctricos y dando así los primeros pasos hacia la consolidación de la electromovilidad urbana en el país. Este trabajo tiene como objetivo analizar los principales electrosistemas públicos de recarga ya instalados en Brasil, identificando sus fortalezas y debilidades. El análisis abarcará tanto aspectos cualitativos —como los impactos sociales y ambientales— como cuantitativos —incluyendo criterios técnicos y económicos. Como resultado, se busca destacar las mejores prácticas y recomendaciones para la implementación eficiente de estaciones de recarga de autobuses eléctricos en contextos urbanos brasileños.

Palabras clave: Electromovilidad, Terminales de Carga Eléctrica, Clima, Sostenibilidad, Flotas Públicas, Movilidad Urbana.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação da temperatura global nas últimas décadas	14
Figura 2 – Emissões do setor de transporte no Brasil em 2019	15
Figura 3 – Inauguração do Eletroterminal Oeste de Cascavel no Parana em Agosto de 2024	16
Figura 4 – Investimento Global em Transição de Energia por Setor	17
Figura 5 – Interior do ônibus elétrico - Passageiros	19
Figura 6 – Interior do ônibus elétrico - Motorista	20
Figura 7 – Projeção em milhões de dólares para eletrificação por categoria nas cidades e áreas rurais	22
Figura 8 – Arquitetura do ônibus elétrico X ônibus a combustão	25
Figura 9 – Eficiência do ônibus elétrico X ônibus a combustão	26
Figura 10 – Tipos de ônibus elétricos	27
Figura 11 – Tipologias de veículos utilizados em operação no Brasil	28
Figura 12 – Principais elementos de um eletro terminal de recargas para ônibus elétricos	29
Figura 13 – Padrão de Distribuição de Energia - Brasil	30
Figura 14 – Cabine primária blindada	31
Figura 15 – Cabine de alvenaria	32
Figura 16 – QGBT -Quadro Geral de Baixa Tensão	33
Figura 17 – Carregador DC com dois conectores.	34
Figura 18 – Ônibus com conexão simples e dupla.	35
Figura 19 – Relação entre potência do carregador e tempo de recarga — modelo BYD D11B.	36
Figura 20 – Principais tipos de conectores disponíveis no mercado	37
Figura 21 – Principais elementos de uma usina fotovoltaica	40
Figura 22 – Eficiências laboratoriais máximas de diferentes tecnologias fotovoltaicas. . .	43
Figura 23 – Layout das vagas com diferentes ângulos	52
Figura 24 – Layout com vagas em ângulo de 180°	53
Figura 25 – Layout com estações de recarga individuais	54
Figura 26 – Layout com estações de recarga duplas	55
Figura 27 – Custo do MWp instalado no Brasil em 2024	62
Figura 28 – Custo de referência dos créditos de carbono no mercado voluntário	65
Figura 29 – Localização do terminal e suas rotas principais - São José dos Campos . . .	71
Figura 30 – Vista superior do terminal	72
Figura 31 – Estações de recarga de 200 kW com duas saídas CCS2	73
Figura 32 – Localização do terminal e suas rotas principais — Salvador	74
Figura 33 – Vista superior do terminal — Salvador	75
Figura 34 – Relatório de recargas (jan–mai/2025) — Terminal de Salvador	76
Figura 35 – Localização dos terminais e principais rotas — Cascavel	78
Figura 36 – Vista superior do terminal — Cascavel	79

Figura 37 – Relatório de recargas (jan–mai/2025) — Terminal de Cascavel	80
Figura 38 – Usina fotovoltaica de Cascavel	81
Figura 39 – Usina fotovoltaica de Cascavel sobre o aterro sanitário	82
Figura 40 – Problemas de layout no eletroterminal de São José dos Campos	84
Figura 41 – Layout proposto com correção para o eletroterminal de São José dos Campos	84
Figura 42 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de São José dos Campos .	85
Figura 43 – Layout das vagas de recarga no eletroterminal de Salvador	89
Figura 44 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de Salvador	90
Figura 45 – Layout das vagas de recarga no eletroterminal de Cascavel	94
Figura 46 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de Cascavel	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SOC	State of Charge
SEP	Sistema Elétrico de Potência
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
BMS	Battery Energy Storage System
CO ₂	Dióxido de carbono
IEC	International Electrotechnical Commission
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
ESG	Environmental, Social and Governance
WMO	World Meteorological Organization
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ANTP	Agência Nacional de Transportes
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
PIB	Produto Interno Bruto
MME	Ministério de Minas e Energia
DTP	Diário do Transporte
ICCT	International Council on Clean Transportation
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
QGMT	Quadro Geral de Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
CLP	Controlador Lógico Programável

GBT	Padrão chinês de carregamento
CCS2	Padrão europeu de carregamento
CHAdeMO	Padrão japonês de carregamento
RPN	Risk Priority Number
GRI	Global Reporting Initiative
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Letra grega Delta;
η	Letra grega Eta;
Σ	Letra grega Sigm.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos gerais e específicos	16
1.2	Justificativa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Mobilidade urbana sustentável	21
2.2	Veículos elétricos e transporte coletivo	23
2.3	Elementos de um eletroterminal de recargas de ônibus elétricos	29
2.3.1	<i>Conexão coma rede e infraestrutura de média tensão</i>	29
2.3.2	<i>Infraestrutura de baixa tensão</i>	32
2.3.3	<i>Estações de recarga</i>	33
2.3.4	<i>Desafios</i>	38
2.4	Eletroterminais Sustentáveis - Usinas solares vinculadas	39
2.5	Método de avaliação dos terminais - Origem e Fundamentação do Método de <i>Scoring</i>	44
2.5.1	<i>Análise de robustez operacional e o FMEA</i>	45
2.5.2	<i>Análise sustentável e indicadores de ESG</i>	46
3	METODOLOGIA	48
3.1	Método de avaliação e consolidação dos resultados finais	48
3.2	Método de avaliação da robustez operacional	49
3.2.1	<i>Percentual de utilização do potencial de recarga do terminal</i>	49
3.2.2	<i>Layout da instalação e o impacto na operação</i>	51
3.2.3	<i>Projeto elétrico e redundância de alimentação do circuito</i>	55
3.3	Método de avaliação da sustentabilidade	57
3.3.1	<i>Determinando a redução de emissões de CO₂ e o impacto ambiental</i>	57
3.3.2	<i>Usina fotovoltaica integrada - Estimativa de custos</i>	60
3.3.3	<i>Créditos de carbono</i>	63
3.4	Método de avaliação do custo benefício	67
3.5	Pontuação, Consolidação e Critérios de Avaliação Final	68
3.6	Eletroterminais já implantados no Brasil - Visão Geral	69

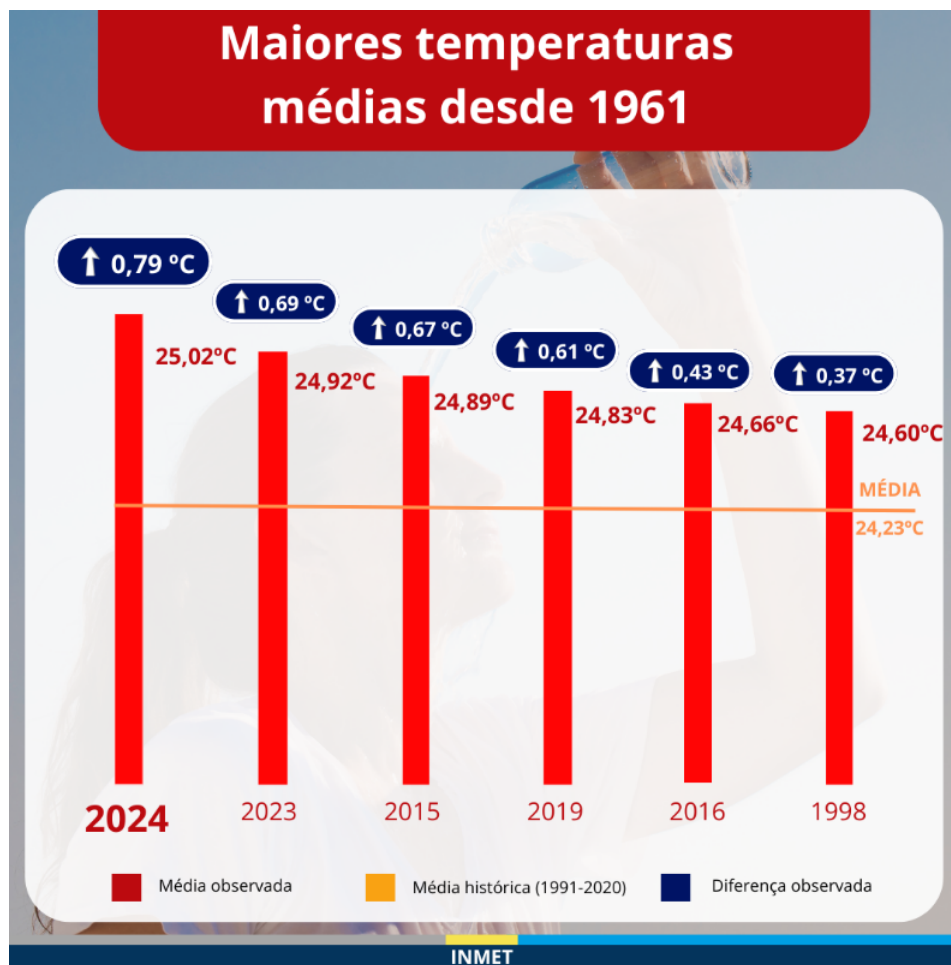
3.6.1	<i>Eletr terminal de São José dos Campos - São Paulo</i>	69
3.6.2	<i>Eletr terminal de Salvador - Bahia</i>	73
3.6.3	<i>Eletr terminal de Cascavel - Paraná</i>	77
4	RESULTADOS	83
4.1	Eletr terminais já implantados no Brasil – Análise das infraestruturas	83
4.1.1	<i>Eletr terminal de São José dos Campos - Robustez operacional</i>	83
4.1.2	<i>Eletr terminal de São José dos Campos - Sustentabilidade</i>	85
4.1.3	<i>Eletr terminal de Salvador - Robustez Operacional</i>	87
4.1.4	<i>Eletr terminal de Salvador - Sustentabilidade</i>	90
4.1.5	<i>Eletr terminal de Cascavel - Robustez Operacional</i>	93
4.1.6	<i>Eletr terminal de Cascavel - Sustentabilidade</i>	95
4.2	Comparação e análise dos resultados dos Resultados	98
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	102
5.1	Conclusão Comparativa dos Terminais	102
5.1.1	<i>Consolidação da Metodologia e aplicação em projetos</i>	103
5.2	Trabalhos Futuros	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente demanda por fontes de energia limpa tem impulsionado o mercado de energias renováveis em todo o mundo. Projetos e conferências internacionais, como a COP (Conferência das Partes), iniciada em 1994 em Berlim pela ONU (Organização das Nações Unidas), tornaram imprescindível a inclusão da preocupação com o meio ambiente e as mudanças climáticas nos planejamentos de curto, médio e longo prazo dos governos globais.

Além disso, dados divulgados pelo Governo Federal, com base em relatório da Organização Meteorológica Mundial (WMO – World Meteorological Organization), revelam que o Brasil continua seguindo a tendência de quebra de recordes de temperatura, ultrapassando, mais uma vez, a média histórica registrada desde 1961. Em 2024, a média das temperaturas no Brasil foi de 25,02°C, sendo 0,79°C acima da média histórica de 1991–2020, que é de 24,23°C. Já em 2023, a média anual foi de 24,92°C, ou seja, 0,69°C acima da média histórica. (INMET, 2024).

Figura 1 – Variação da temperatura global nas últimas décadas



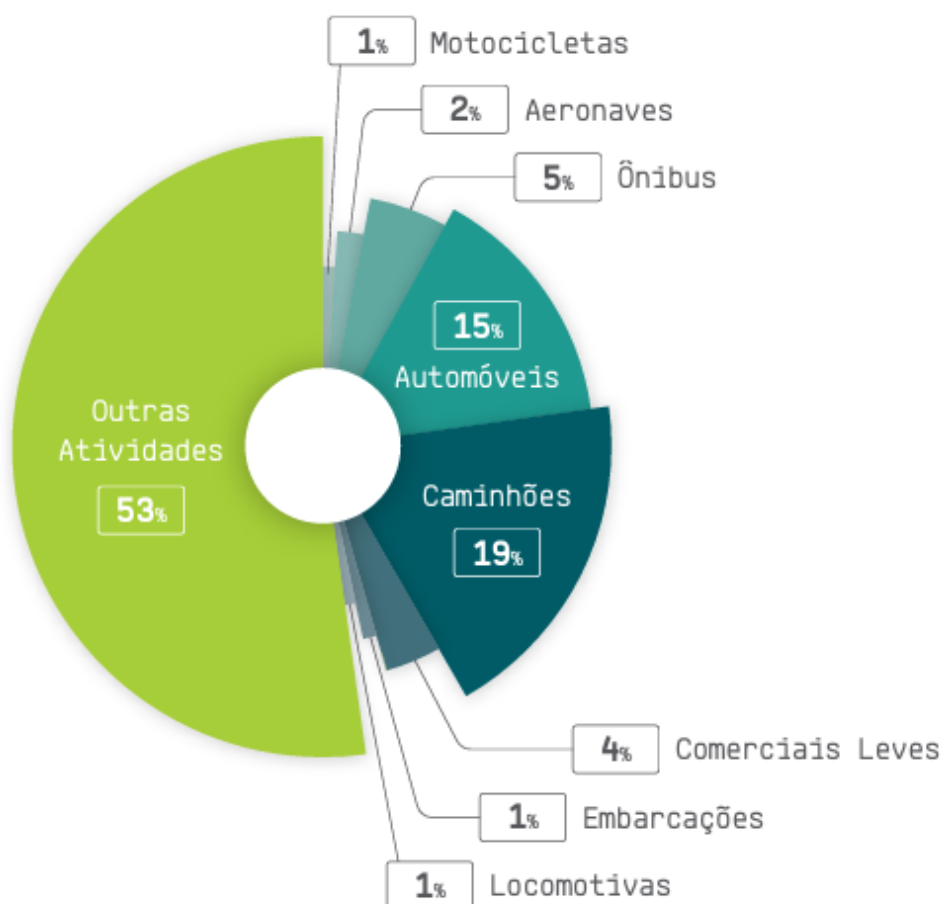
Fonte: INMET, 2024.

A sustentabilidade tem se tornado um pré-requisito crescente no planejamento dos governos brasileiros, focando na redução das emissões de gases carbônicos na atmosfera. De acordo

com dados do SEBRAE (SEBRAE, 2023), 40% a 60% das emissões de gases de efeito estufa nas cidades brasileiras são geradas pelo transporte urbano.

Mais precisamente, a Associação Nacional de Transportes Públicos, publicou em julho de 2024 um caderno "*ROTAS TECNOLÓGICAS DE DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO NO BRASIL*" que mostra por meio da Figura 2 (página 21 do caderno), dados do Instituto de Energia e do Meio Ambiente (IEMA) que o transporte público (ônibus), foi responsável por 5% das emissões de CO₂ no Brasil.

Figura 2 – Emissões do setor de transporte no Brasil em 2019



Fonte: ANTP, 2024.

Estes 5% das emissões são compostos por ônibus urbanos a diesel, incluídos os rodoviários e fretados, de acordo com (ANTP, 2024) são responsáveis pela emissão de (22 MtCO₂eq), pouco menos de 1% das emissões nacionais. Apesar de em montante nacional tratar-se de uma pequena quantidade, são diretamente responsáveis pela diminuição da qualidade do ar nas grandes metrópoles do país e pela poluição sonora. Diante destes impactos, cada vez mais os investimentos em mobilidade urbana tem crescido e soluções como eletroterminais de recarga para ônibus de frotas urbanas vem ganhando espaço no planejamento, desenvolvimento e evolução do transporte urbano nacional.

Figura 3 – Inauguração do Eletroterminal Oeste de Cascavel no Parana em Agosto de 2024



Fonte: Prefeitura de Cascavel, 2024.

1.1 Objetivos gerais e específicos

Este trabalho tem como objetivo principal **analisar os eletroterminais públicos instalados no Brasil até o ano de 2024**, utilizando uma abordagem comparativa fundamentada em três pilares centrais: *robustez operacional*, *impacto sustentável* e *relação custo-benefício*.

Com base nessa análise, pretende-se:

- Identificar as melhores práticas operacionais, ambientais e econômicas adotadas nos terminais já implantados, contribuindo para o estabelecimento de diretrizes para projetos futuros;
- Mensurar e caracterizar os impactos gerados pelos eletroterminais no contexto urbano e ambiental;
- Consolidar uma metodologia técnica de projeto aplicável à concepção e implantação de novos terminais públicos de recarga, alinhada aos princípios de eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Além disso, o estudo visa responder, de forma objetiva e fundamentada, às seguintes questões:

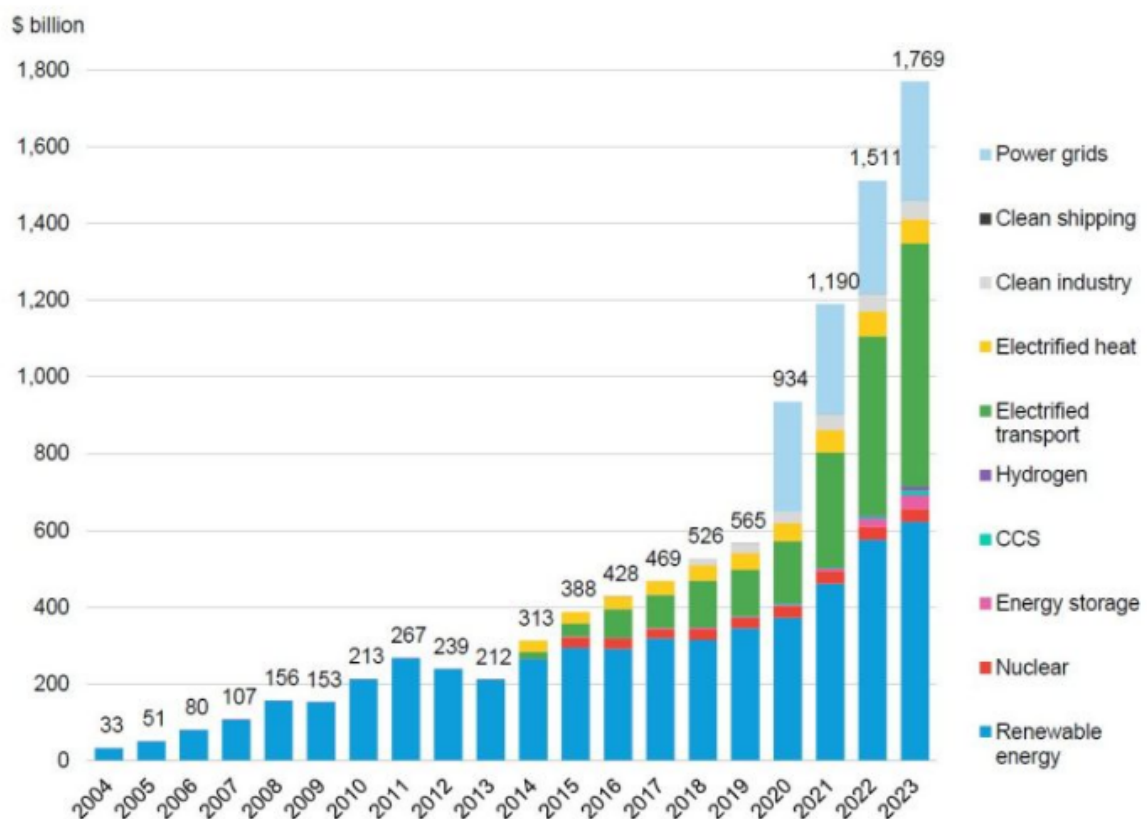
1. Qual dos eletroterminais avaliados apresenta maior robustez operacional?
2. Qual demonstra melhor desempenho em termos de sustentabilidade ambiental?
3. Qual oferece a melhor relação custo-benefício, considerando investimentos, operação e retorno social?

1.2 Justificativa

No mundo, a eletrificação do transporte tem recebido grandes investimentos monetários como podemos observar na Figura 4, onde no ano de 2023 chegamos a um valor próximo de 1,4 bilhões de dólares investidos em eletrificação do transporte em todo o planeta, valor que é aproximadamente 27% maior que o investido no ano de 2022.

Figura 4 – Investimento Global em Transição de Energia por Setor

Global investment in energy transition, by sector



Source: BloombergNEF. Note: Start years differ by sector but all sectors are present from 2020 onwards; see [Methodology](#) for more detail. Most notably, nuclear figures start in 2015 and power grids in 2020. CCS refers to carbon capture and storage.

No Brasil, o cenário não tem sido diferente: o governo federal aprovou, em 2024, um investimento bilionário para 2025 com foco na eletrificação do transporte público, como destacado em (Governo Federal do Brasil, 2024):

"Foi divulgado o resultado do processo de seleção de propostas da modalidade Renovação de Frota, setor público, por meio da publicação da PORTARIA MCID Nº 445, DE 7 DE MAIO DE 2024. Ao todo, 77 propostas foram selecionadas, totalizando R\$ 10,6 bilhões em recursos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e de outras fontes geridas pelo BNDES. A seleção beneficiará 7 estados e 61 municípios com a aquisição de 2.296 ônibus elétricos, 3.015 Euro 6 e 39 veículos sobre trilhos para renovar a frota e equipamentos do transporte urbano brasileiro.". (Governo Federal do Brasil, 2024)

Os principais fatores que têm impulsionado os esforços e investimentos na eletrificação de frotas públicas e privadas são de natureza financeira, ambiental, operacional e social. O crescimento acelerado das populações nos grandes centros urbanos tem motivado os governos a buscar alternativas que incentivem a população a reduzir o uso de veículos particulares, especialmente para deslocamentos cotidianos e trajetos relacionados ao trabalho. Como aponta (Estadão Mobilidade, 2024), a ineficiência do transporte público gera um custo de produtividade que resulta em impactos bilionários no Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Para além das questões econômicas, a qualidade de vida nos grandes centros tem se deteriorado, impulsionada pela piora da qualidade do ar — devido ao elevado número de veículos a combustão — e pelos longos períodos enfrentados no trânsito. A adoção de veículos elétricos contribui para a mitigação desses problemas, oferecendo soluções tecnológicas com menor impacto ambiental, com mais conforto para o passageiro (ar condicionado, assentos mais confortáveis, sem barulho do motor).

Figura 5 – Interior do ônibus elétrico - Passageiros



Fonte: DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2024.

Tais fatores, por si sós, já justificam os investimentos em mobilidade elétrica. No entanto, a implantação de ônibus elétricos proporciona, adicionalmente, benefícios econômicos tanto para os operadores quanto para as administrações municipais. De acordo com o Greenpeace (GREENPEACE BRASIL, 2024), os ônibus elétricos apresentam uma vida útil até 50% superior à dos veículos movidos a combustão, além de custos de manutenção reduzidos, decorrentes da simplicidade de seus sistemas eletromecânicos (Figura 8).

Outro aspecto relevante está relacionado à melhoria das condições de trabalho dos motoristas do transporte público. Com a introdução dos novos veículos elétricos, esses profissionais passam a operar veículos automáticos, mais seguros — equipados com câmeras em todos os lados, eliminando pontos cegos — e sistemas de climatização. Durante o treinamento de novos condutores da frota elétrica da Prefeitura de Curitiba, uma motorista relatou que “é uma tecnologia maravilhosa. O ônibus é muito silencioso e confortável, com câmeras no lugar dos espelhos retrovisores, que oferecem uma visão muito boa para o motorista” (PREFEITURA DE CURITIBA, 2024).

Figura 6 – Interior do ônibus elétrico - Motorista



Fonte: DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2024.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Mobilidade urbana sustentável

Os incentivos governamentais voltados à eletrificação da mobilidade urbana têm se baseado no conceito de mobilidade urbana sustentável. Esse conceito busca proporcionar um sistema de transporte mais eficiente e acessível, estruturado sobre quatro pilares fundamentais nas cidades brasileiras, conforme estabelecido pela Lei Federal nº 12.587/2012. São eles:

- Acesso universal;
- Eficiência nos deslocamentos;
- Redução de impactos ambientais;
- Prioridade aos modos de transporte coletivo e não motorizados.

Os principais desafios da mobilidade nas grandes cidades envolvem aspectos de infraestrutura, financeiros e sociais, como apontado em (Estadão Mobilidade, 2024). Com a crescente concentração populacional nos centros urbanos, o aumento no fluxo de veículos tem impactado diretamente a produtividade do brasileiro, sobretudo devido ao tempo excessivo gasto na comutação entre casa e trabalho — tempo esse que repercute negativamente no Produto Interno Bruto (PIB) do país. Diante desse cenário, os governos precisam investir na melhoria da infraestrutura de transporte público, oferecendo alternativas mais atrativas em termos de preço, conforto e praticidade, de modo a desestimular o uso do transporte individual motorizado para os deslocamentos diários.

No que se refere às questões ambientais, os ônibus elétricos têm se mostrado altamente eficazes em diversos países, contribuindo significativamente para a redução das emissões de poluentes. No entanto, a limitação da infraestrutura elétrica disponível para a instalação de eletroterminais de recarga ainda representa um obstáculo relevante. Como alternativa, a adoção de sistemas de armazenamento de energia (BESS – Battery Energy Storage System) tem ganhado destaque e se consolidado como uma pauta prioritária no planejamento urbano sustentável.

Conforme divulgado pelo Governo Federal no Plano Decenal de Energia para 2032 (PDE) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2023), na página 39, é mencionada a política adotada pela China, na qual o governo subsidiou 50% dos custos de infraestrutura e aquisição de veículos, com o objetivo de incentivar a adoção de ônibus elétricos pelos operadores de transporte.

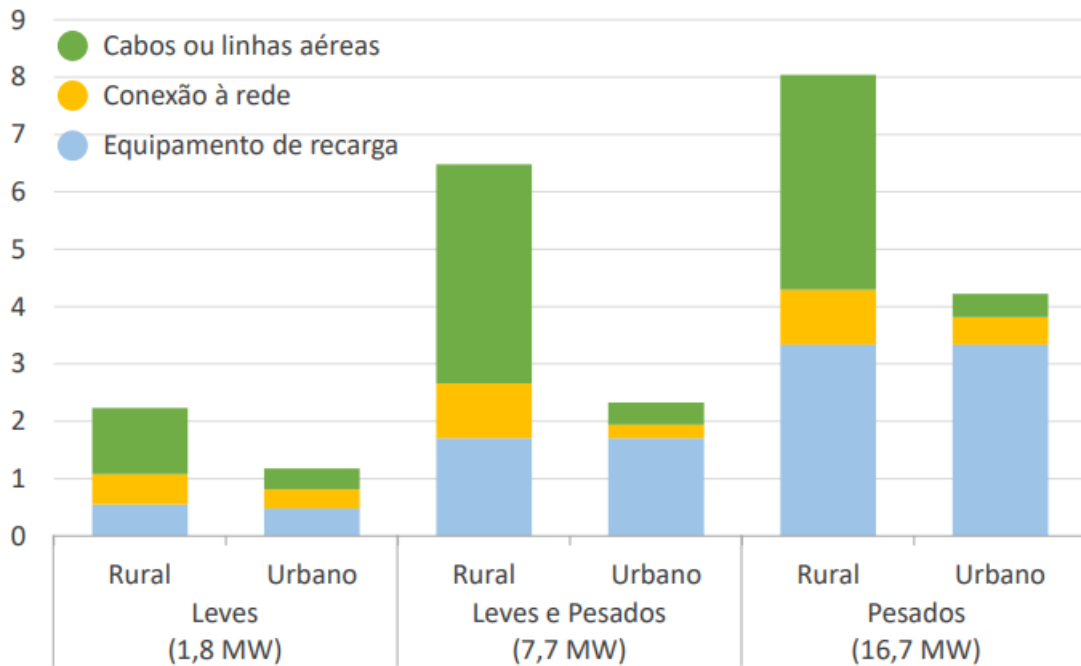
Na Figura 7, é apresentada a estimativa de custos, em milhões de dólares, para a instalação de infraestrutura de recarga (em megawatts) por tipo de veículo (leves, semileves e pesados) em áreas urbanas e rurais. Observa-se que, para veículos semileves e pesados, os investimentos podem variar entre 6 e 9 milhões de dólares por município em áreas rurais. Já em relação às

estações de recarga, tanto em contextos urbanos quanto rurais, os custos estimados situam-se na faixa de 3 a 4 milhões de dólares.

Figura 7 – Projeção em milhões de dólares para eletrificação por categoria nas cidades e áreas rurais

Investimentos requeridos para carregadores de automóveis elétricos por localização e tamanho (milhão US\$ 2022)

Fonte: [EV Outlook 2022 da IEA](#)



Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2023.

Do ponto de vista social, a implantação de novas tecnologias deve ser realizada de forma a não elevar os custos nem causar a desapropriação de residências da população, garantindo, assim, a efetivação do pilar de acesso universal. Um grande exemplo é o aumento das tarifas do transporte público de Belo Horizonte nos últimos 10 anos (Fonte: (O Tempo, 2025)).

Tabela 1 – Histórico de tarifas de transporte público de Belo Horizonte

Data	Valor da Tarifa	Observação
Maio 2013	R\$ 2,80	12 ^a tarifa mais cara do país
Julho 2013	R\$ 2,65	Redução após protestos nacionais
Abril 2014	R\$ 2,85	6 ^a tarifa mais cara do país
Dezembro 2014	R\$ 3,10	4 ^a tarifa mais cara do país
Julho 2015	R\$ 3,40	—
Dezembro 2015	R\$ 3,70	3 ^a tarifa mais cara do país
Dezembro 2016	R\$ 4,05	1 ^a tarifa mais cara do país
Dezembro 2018	R\$ 4,50	1 ^a tarifa mais cara do país
Abril 2023	R\$ 6,00	1 ^a tarifa mais cara do país
Julho 2023	R\$ 4,50	13 ^a tarifa mais cara; redução com subsídio
Dezembro 2023	R\$ 5,25	6 ^a tarifa mais cara do país

Fonte: O Tempo, 2025.

2.2 Veículos elétricos e transporte coletivo

As iniciativas para a implantação de ônibus elétricos vêm ganhando cada vez mais espaço nas pautas e planejamentos dos governos municipais e estaduais, como mencionado na introdução deste trabalho. De modo geral, a adoção desses veículos tem gerado benefícios para as prefeituras em diversos aspectos, entre os quais se destacam:

- Redução dos custos operacionais;
- Maior conforto para os passageiros;
- Diminuição dos impactos ambientais.

A Tabela 2 apresenta os custos médios de manutenção de ônibus elétricos no Brasil, considerando algumas capitais que já operam esse tipo de veículo em suas frotas públicas. Para fins de comparação, inclui-se também o custo médio de manutenção de ônibus a combustão, conforme publicado pelo *Diário do Transporte* (Diário do Transporte, 2020). Os valores relativos aos veículos elétricos foram estimados com base em dados aproximados obtidos por meio de entrevistas e conversas com gestores de garagens responsáveis pela operação dessas frotas.

Tabela 2 – Custo médio de manutenção por km de ônibus elétricos e a combustão em diferentes cidades brasileiras

Cidade	Custo Elétrico (R\$/km)	Custo Combustão (R\$/km)
São Paulo	0,20	0,48–0,64
Cascavel	0,40	0,48–0,64
São José dos Campos	0,63	0,48–0,64
Salvador	0,20	0,48–0,64
Curitiba	0,20	0,48–0,64

Adaptado de: Diário do Transporte, 2020.

Nesta tabela 2 ainda não foram considerados alguns fatores operacionais informados pelos operadores viários. Todos relataram que, ao longo de 10 anos de operação, os ônibus a combustão exigem pelo menos uma substituição do motor e da caixa de câmbio, além de apresentarem custos de manutenção bastante imprevisíveis após os cinco primeiros anos de uso. Por outro lado, os veículos elétricos possuem uma vida útil operacional estimada em 15 anos e tendem a apresentar menor variabilidade nos custos de manutenção. Segundo os fabricantes, é esperado que, por volta da metade dessa vida útil, seja necessário substituir as células das baterias, cujo custo de reposição ainda não está plenamente definido. Essas informações obtidas nas entrevistas, forma inseridas na tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo de Manutenção: Ônibus Elétrico vs. Ônibus a Combustão

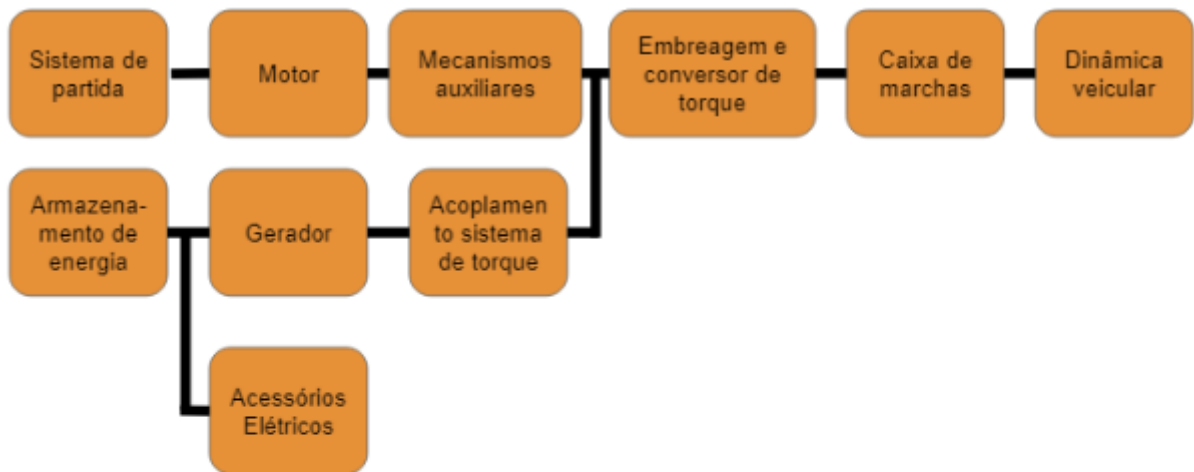
Critério	Ônibus Elétrico	Ônibus a Combustão
Troca de peças principais	Substituição das células da bateria após 7,5 anos de uso.	Substituição do motor e da caixa de câmbio após 5 anos.
Reparos no chassi	Cerca de 2 intervenções mensais, geralmente relacionadas a sensores.	Reparos frequentes em válvulas, sensores e partes mecânicas.
Pequenas manutenções	Troca periódica do líquido de arrefecimento.	Troca regular de fluidos do motor e filtros de óleo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

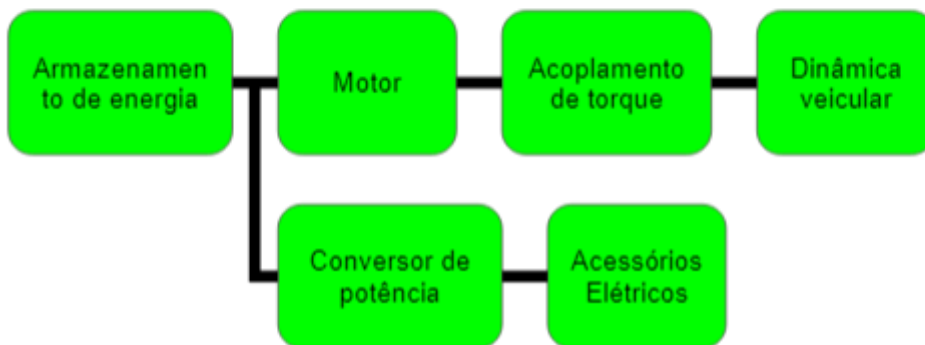
O custo reduzido de manutenção, também abordado pelo *ICCT (International Council on Clean Transportation)*, foi detalhado em um artigo publicado em 2021 que analisa as razões para essa diminuição. Neste estudo, foi utilizada uma metodologia que compara a eficiência e os custos de ônibus elétricos com os a combustão, considerando as mesmas condições de temperatura, operação e estresse. Como ilustrado na Figura 8, a arquitetura do veículo elétrico é significativamente mais simples, com menos peças móveis. Essa configuração resulta em menor desgaste e demanda por manutenções mais simples e menos frequentes.

Figura 8 – Arquitetura do ônibus elétrico X ônibus a combustão

Arquitetura do veículo a Diesel



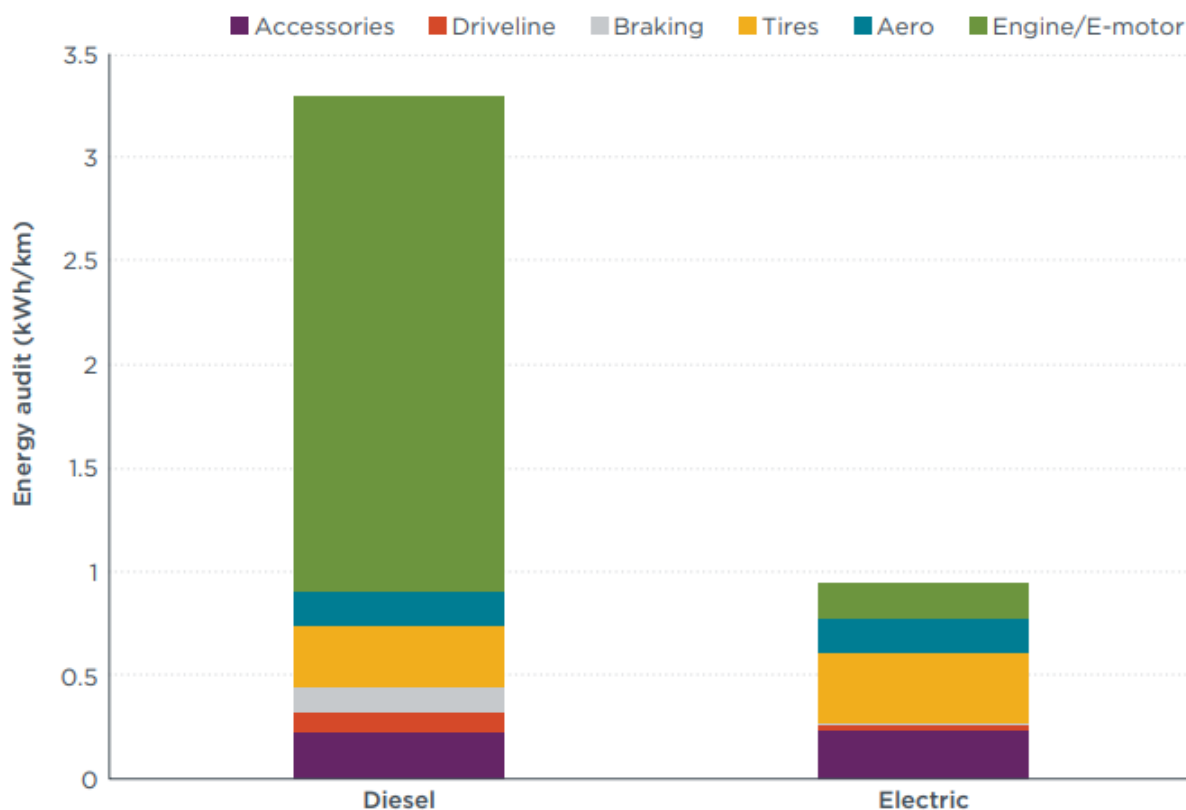
Arquitetura do veículo Elétrico



Fonte: ICCT, 2021.

Além desse fator, o estudo do (ICCT, 2021) também indica que a eficiência energética dos motores a combustão é significativamente inferior. Como podemos observar na Figura 9, a demanda de energia para o funcionamento do motor a combustão é consideravelmente maior em comparação com os veículos elétricos. Este gráfico foi gerado através de um ciclo de testes onde um ônibus elétrico e um a combustão foram expostos as mesmas condições. No eixo Y, ambos os consumos de energia foram transformados para a unidade de kWh/km.

Figura 9 – Eficiência do ônibus elétrico X ônibus a combustão



Fonte: ICCT, 2021.

Esta disparidade na eficiência dos motores também nos leva a comparar a eficiência do combustível utilizado em cada tipo de veículo para gerar a força motriz. Na Tabela 4, são apresentados vários parâmetros que evidenciam essa diferença de eficiência. Além disso, podemos constatar que o diesel é 65% menos eficiente do que o kWh. Os custos do Diesel e do kilowatt hora foram considerados para o estado de Minas Gerais durante o mês de Abril em 2025. Os dados foram retirados de (Silva, Carlos, 2020) para o veículo á combustão, e os dados do veículo elétrico do estudo da SP Trans (ICCT, 2022).

Os custos do diesel e do kWh foram estimados com base nas tarifas da BR Distribuidora e da ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica.

Tabela 4 – Eficiência: diesel vs kWh

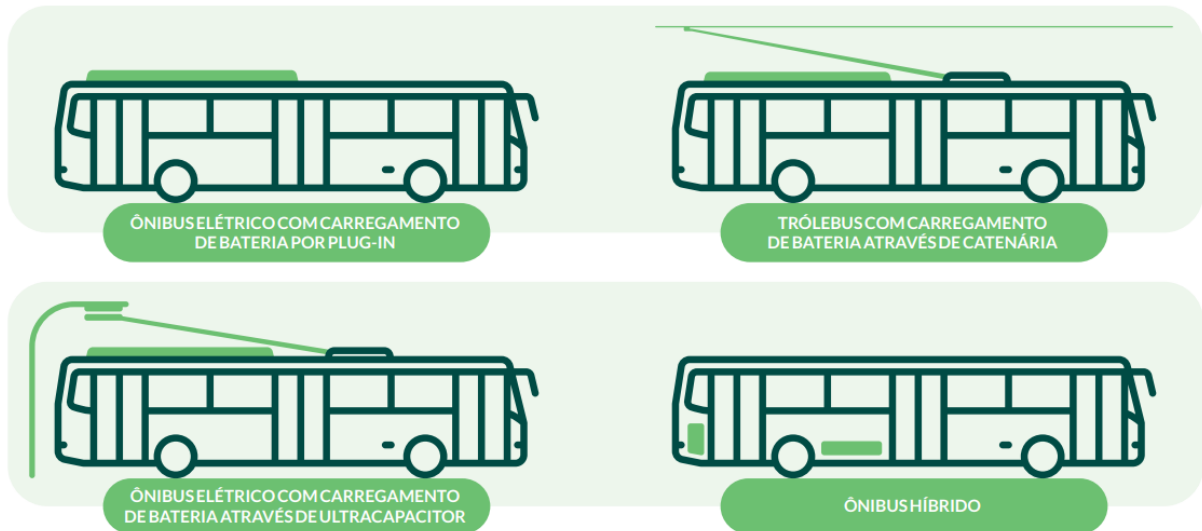
Tipo de Ônibus	Consumo Médio	Eficiência Estimada	Equivalente em kWh/km	Custo Médio (R\$/unidade)
Diesel	2,5 – 3,0 km/l	20%	3,3 – 3,9 kWh/km	R\$ 6,44/litro ¹
Elétrico	1,2 – 1,4 kWh/km	85%	1,2 – 1,4 kWh/km	R\$ 0,80/kWh ²

Adaptado de: Silva, Carlos 2020 e ICCT 2022.

O ônibus elétrico vem sendo difundido no Brasil com mais força nos últimos 5 anos porém não é uma novidade. Em 1949 a cidade de São Paulo recebeu o primeiro *trolley bus*

(Diário do Transporte, 2017). Quando tratamos de ônibus elétricos existem algumas formas de oprá-los nas cidades, estas que são:

Figura 10 – Tipos de ônibus elétricos




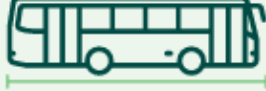





fonte:ANTP, 2023.

Os garagistas e as prefeituras têm a opção de escolher entre diferentes modelos de ônibus elétricos para suas operações. Esses modelos foram classificados e suas variações definidas pela ANTP (*Associação Nacional de Transportes Públicos*), conforme indicado no documento (ANTP, 2023). A imagem retirada desse documento, apresentada na Figura 11, ilustra essas variações. O tamanho do ônibus implica em alguns fatores como por exemplo:

- Tamanho da bateria;
- Quantidade de conectores disponíveis para recarga;
- Tempo de recarga.

Figura 11 – Tipologias de veículos utilizados em operação no Brasil

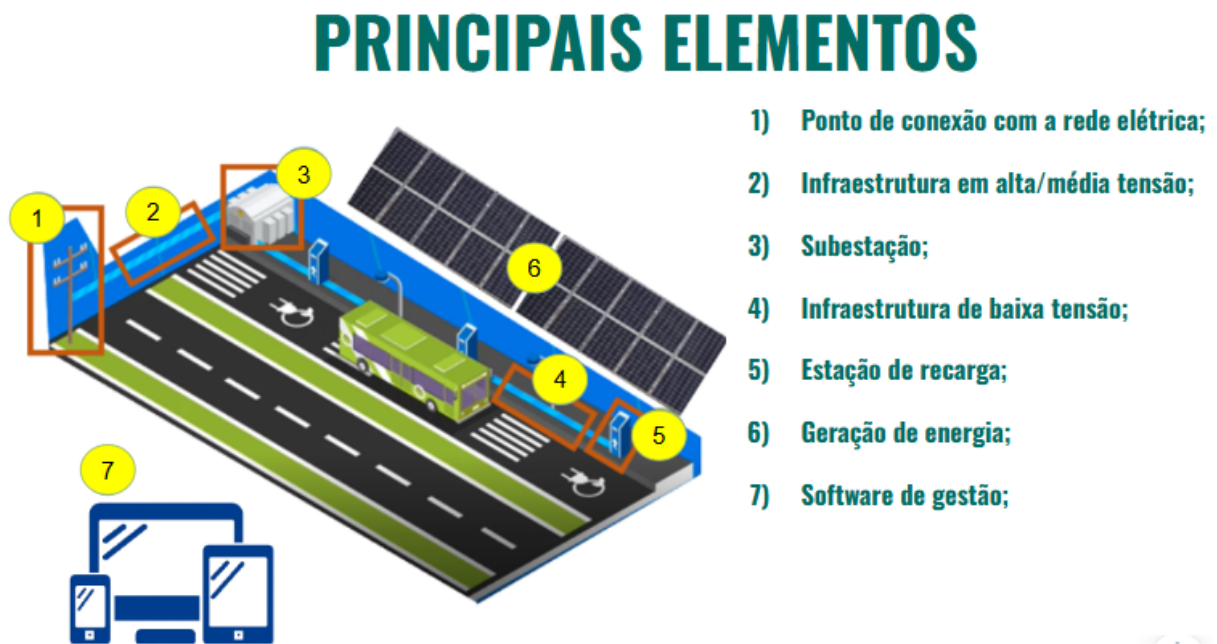
	Comprimento máximo (metros)	Capacidade (em passageiros) Em pé + sentados	Áreas médias (em m ²) para passageiros em pé
<p>Microônibus</p>  <p>7,40</p>	20	0	
<p>Miniônibus</p>  <p>9,60</p>	35	2,5	
<p>Midiônibus</p>  <p>11,50</p>	50	4,9	
<p>Ônibus Básico</p>  <p>14,00</p>	74	6,5	
<p>Ônibus Padrão</p>  <p>14,00</p>	85 a 98	8,9	
<p>Ônibus Articulado</p>  <p>18,60 / 23,00</p>	128 a 170	15,2 a 20,0	
<p>Ônibus Biarticulado</p>  <p>30,00</p>	197	25,0	

fonte: ANTP, 2023.

2.3 Elementos de um eletroterminal de recargas de ônibus elétricos

Ao abordar a construção e o projeto de eletro terminais para recarga de ônibus elétricos, é essencial identificar os principais elementos envolvidos, apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Principais elementos de um eletro terminal de recargas para ônibus elétricos



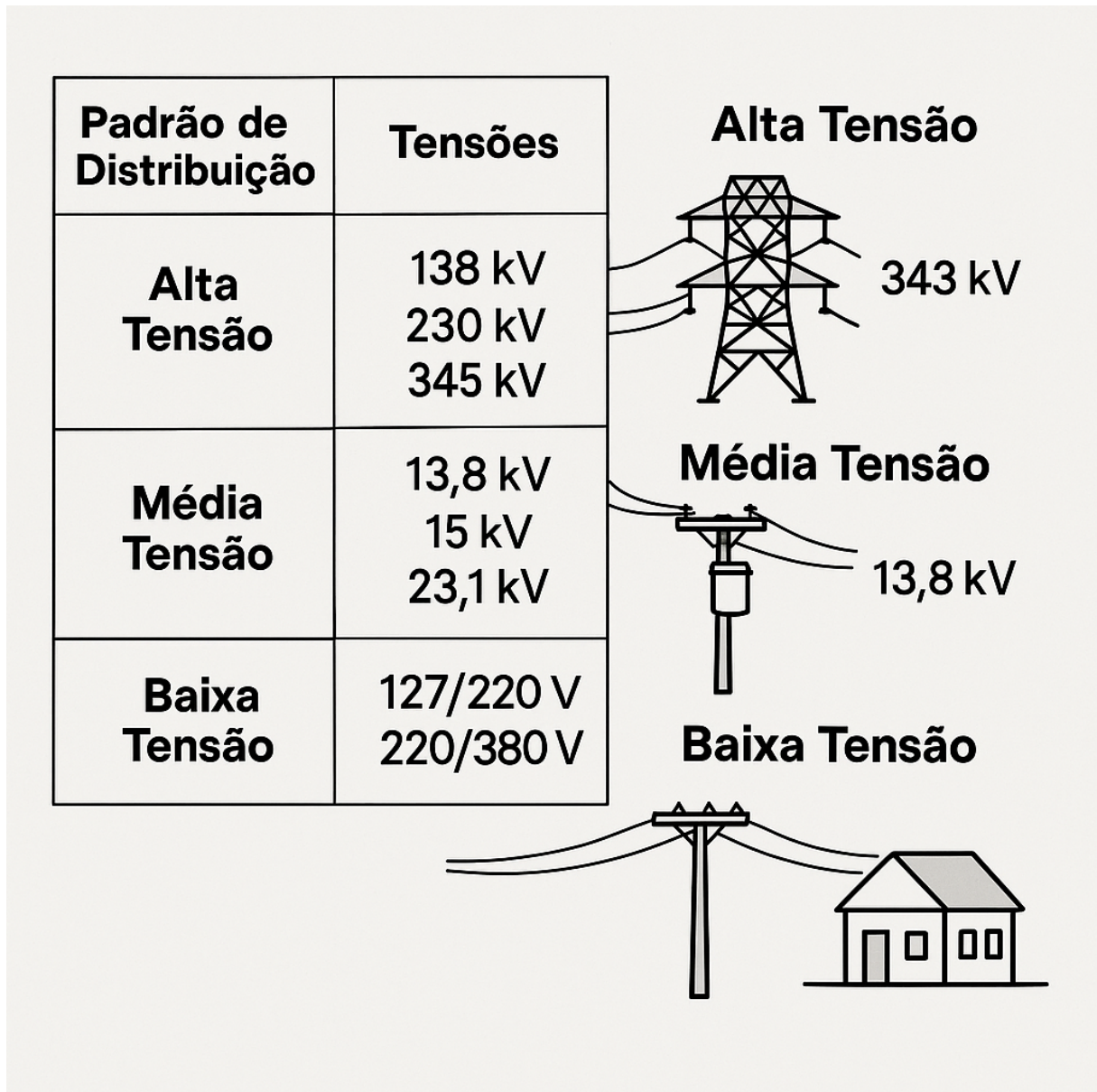
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.3.1 Conexão com a rede e infraestrutura de média tensão

Como mostrado na Figura 12, o primeiro elemento de um terminal é o ponto de conexão com a rede elétrica, fornecido pela concessionária de energia. Essa rede pode operar em alta, média ou baixa tensão. Na Figura 13, é apresentado o padrão de distribuição adotado pela CEMIG (*Companhia Energética de Minas Gerais*) e outras concessionárias no Brasil.

De modo geral, os eletroterminais são alimentados em média tensão, uma vez que, no Brasil, ainda não existem terminais elétricos de grande porte que demandem alimentação em alta tensão.

Figura 13 – Padrão de Distribuição de Energia - Brasil



fonte:ANEEL, 2018.

Quando o ponto de conexão é fornecido pela concessionária em média tensão, o projeto do terminal deve contemplar o dimensionamento da infraestrutura elétrica correspondente, que inclui a subestação. As subestações de média tensão podem ser classificadas, principalmente, em dois tipos: cabines blindadas (Figura 14) e cabines em alvenaria (Figura 15). Os principais componentes de uma cabine primária são:

Tabela 5 – Lista Explodida de Componentes Macro de uma Cabine Primária

Componente	Descrição
Chave seccionadora de entrada	Permite isolar a cabine da rede da concessionária, geralmente por meio de uma chave seccionadora ou chave-fusível.
Disjuntor de média tensão	Protege o sistema contra curtos-circuitos e sobrecargas. Pode ser do tipo a vácuo ou SF ₆ .
Seccionadoras / Chaves fusíveis (saídas)	Utilizadas para isolar circuitos de forma segura, com ou sem fusíveis de proteção.
Transformador Isolador	Reduz a tensão da concessionária (ex.: 13,8 kV para 380/220 V). Pode ser a seco ou a óleo.
Barramentos	Condutor interno encapsulado, geralmente de cobre ou alumínio, que interliga os dispositivos da cabine.
Transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP)	TC: Mede a corrente e alimenta os relés de proteção. TP: Mede a tensão e fornece dados para sistemas de medição e proteção.
Relés de proteção	Detectam falhas elétricas e comandam a abertura do disjuntor.
Painel de controle e medição	Centraliza os comandos, indicadores e medições da cabine (tensão, corrente, fator de potência etc.).
Para-raios	Protegem os equipamentos contra surtos de tensão e descargas atmosféricas.
Invólucro blindado	Estrutura metálica que abriga os componentes internos, garantindo segurança, isolamento e compactidade.
Sistema de aterramento	Assegura o escoamento seguro das correntes de falha para o solo, protegendo equipamentos e pessoas.

Adaptado de: ABNT, ABNT NBR14039, ABNT NBR10295 .

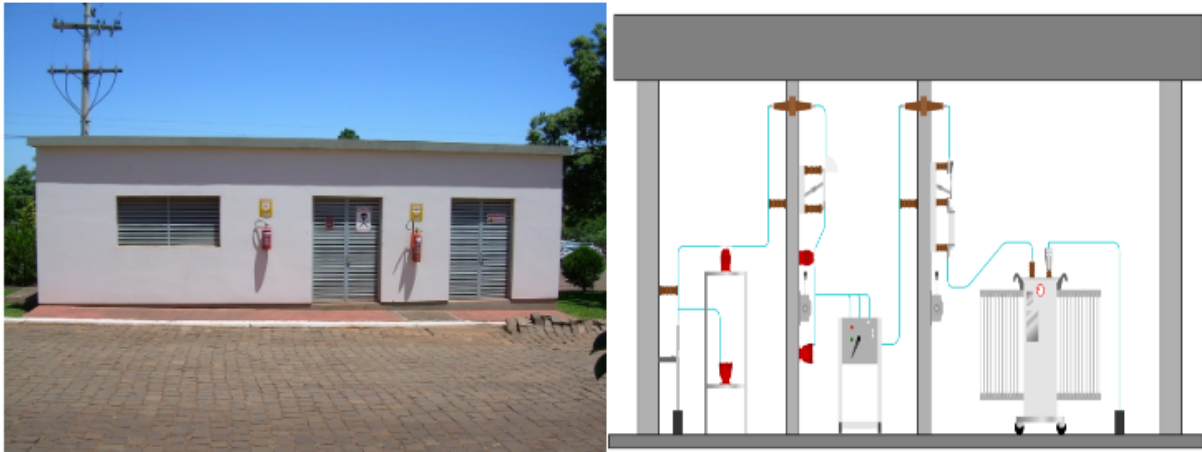
Nos projetos de eletroterminais, a escolha entre os modelos depende essencialmente da disponibilidade de espaço físico e do orçamento do projeto. As cabines blindadas são mais compactas e apresentam maior nível de segurança e integração, porém com custo de implantação mais elevado. Por outro lado, as cabines em alvenaria demandam maior área para instalação, mas oferecem uma solução mais econômica.

Figura 14 – Cabine primária blindada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 15 – Cabine de alvenaria



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.3.2 Infraestrutura de baixa tensão

A infraestrutura de baixa tensão é composta pelo QGBT e pelos cabos que interligam as cargas aos respectivos circuitos. O dimensionamento desses cabos é essencial, pois deve atender às especificações estabelecidas pela NBR 5410 (*Instalações Elétricas de Baixa Tensão*). A bitola dos cabos, depende da distância que as cargas vão estar do QGBT.

Os principais elementos de um QGBT — *Quadro Geral de Baixa Tensão* — são:

Tabela 6 – Elementos de um Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT)

Item	Elemento	Função/Descrição
1	Barramentos	Distribuem a energia entre os componentes internos. Podem ser de cobre ou alumínio, com separação por fase, neutro e terra.
2	Disjuntores	Protegem os circuitos contra sobrecargas e curtos-circuitos. Incluem disjuntores gerais e parciais.
3	Chave Seccionadora	Permite desligamento total do QGBT para manutenção segura. Pode ser manual ou motorizada.
4	DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos)	Protege a instalação contra surtos de tensão, como descargas atmosféricas.
5	DR (Disjuntor Diferencial Residual)	Protege contra fugas de corrente e choques elétricos.
6	TCs (Transformadores de Corrente)	Permitem a medição de corrente e são usados com relés e instrumentos de monitoramento.
7	Instrumentos de Medição	Incluem voltímetros, amperímetros, multímetros digitais e medidores de energia.
8	Barramento de Terra e Neutro	Fazem a interligação dos condutores de proteção (PE) e neutro (N). Conectados ao sistema de aterramento.
9	Sinalização e Controle	Luzes piloto, botões de comando, sistemas de supervisão (CLPs) para monitoramento e operação.
10	Estrutura Física	Invólucro metálico ou termoplástico com grau de proteção adequado (ex: IP54). Pode conter ventilação forçada.

Figura 16 – QGBT -Quadro Geral de Baixa Tensão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.3.3 Estações de recarga

A base de qualquer eletroterminal é composta pelos carregadores. Esses equipamentos são, em geral, dimensionados de acordo com as características da frota e com os modelos de veículos definidos pelo cliente. A escolha adequada do carregador impacta diretamente no dimensionamento da subestação elétrica e no layout da instalação.

As principais características a serem consideradas na especificação de um carregador incluem:

- Quantidade de conectores: 1, 2 ou 3;
- Tipo de carregamento (CA ou CC);
- Tipo de conector (CCS2, GBT, CHAdeMO);
- Infraestrutura elétrica necessária para alimentação;
- Potência nominal da estação de recarga.

Figura 17 – Carregador DC com dois conectores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No projeto de eletroterminais, é imprescindível compreender os fatores relacionados aos veículos que podem impactar diretamente nos custos e no desempenho da estação. Por exemplo, conforme ilustrado na Tabela 7, veículos de maior porte exigem e suportam potências elevadas de recarga devido às suas baterias de grande capacidade. Outro fator relevante é a janela de tempo disponível para recarga no contexto do transporte público, que geralmente impõe a necessidade de operar os carregadores próximos de sua capacidade máxima. Os dados da tabela foram obtidos a partir dos sites dos fabricantes: (Eletra, 2025), (TEVX, 2025), (BYD Brasil, 2025).

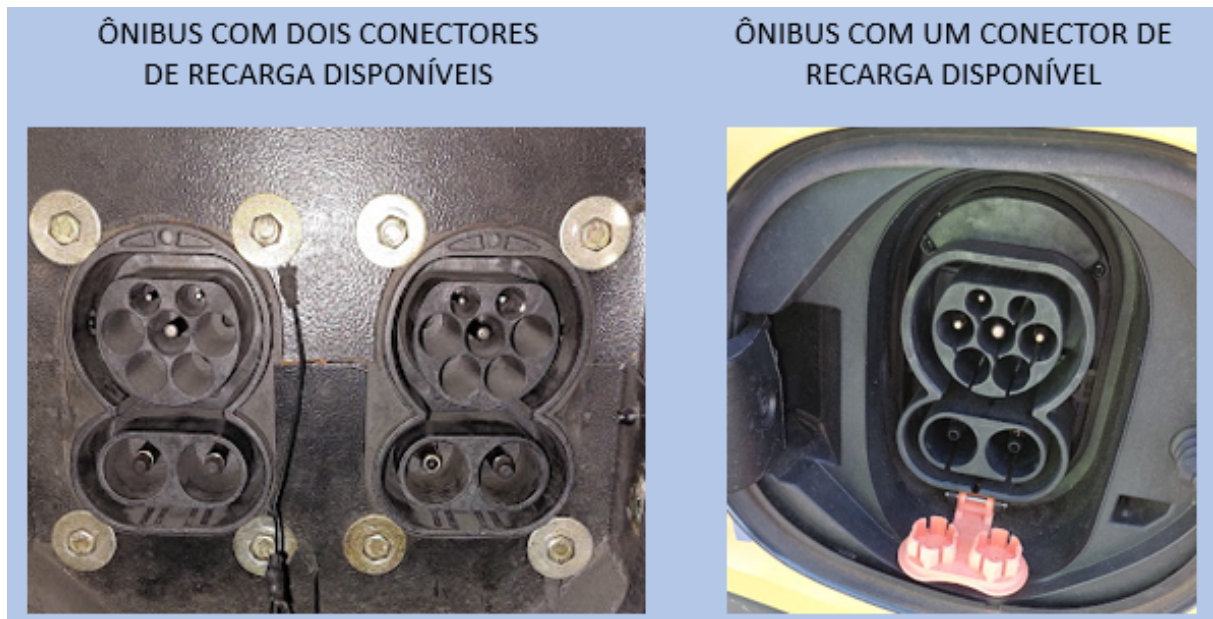
Tabela 7 – Modelos de ônibus elétricos disponíveis no mercado.

Marca	Modelo	Tipo	Bateria (kWh)	Autonomia (km)	Potência máx. recarga (kW)
BYD	BYD D11B	Articulado	590	270	200
BYD	BYD D9W	Padrón	344	270	160
HIGHER TVEX	Azure A18BR	Articulado	564	270	140
HIGHER TVEX	Azure A13BR	Padrón	385	270	140
ELETRA	EBUS21	Articulado	355	220	140
ELETRA	EBUS15	Padrón	300	220	140

Fontes: Eletra 2025, TEVX 2025, BYD Brasil 2025.

Com base nos dados da Tabela 7, tomemos como exemplo o modelo BYD D11B — atualmente em operação em São José dos Campos. Esse modelo possui uma potência máxima de recarga de 200 kW quando utilizado com dois conectores simultâneos. Com apenas um conector, o limite é de 130 kW, valor semelhante ao observado em outros modelos do mercado.

Figura 18 – Ônibus com conexão simples e dupla.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Considerando essas informações, observa-se que o tipo de estação de recarga e a potência disponível são elementos críticos para garantir a operação adequada dos ônibus elétricos. A equação 2.1 apresenta a relação entre os parâmetros envolvidos no cálculo do tempo de recarga, que é ilustrado de forma comparativa na Figura 19.

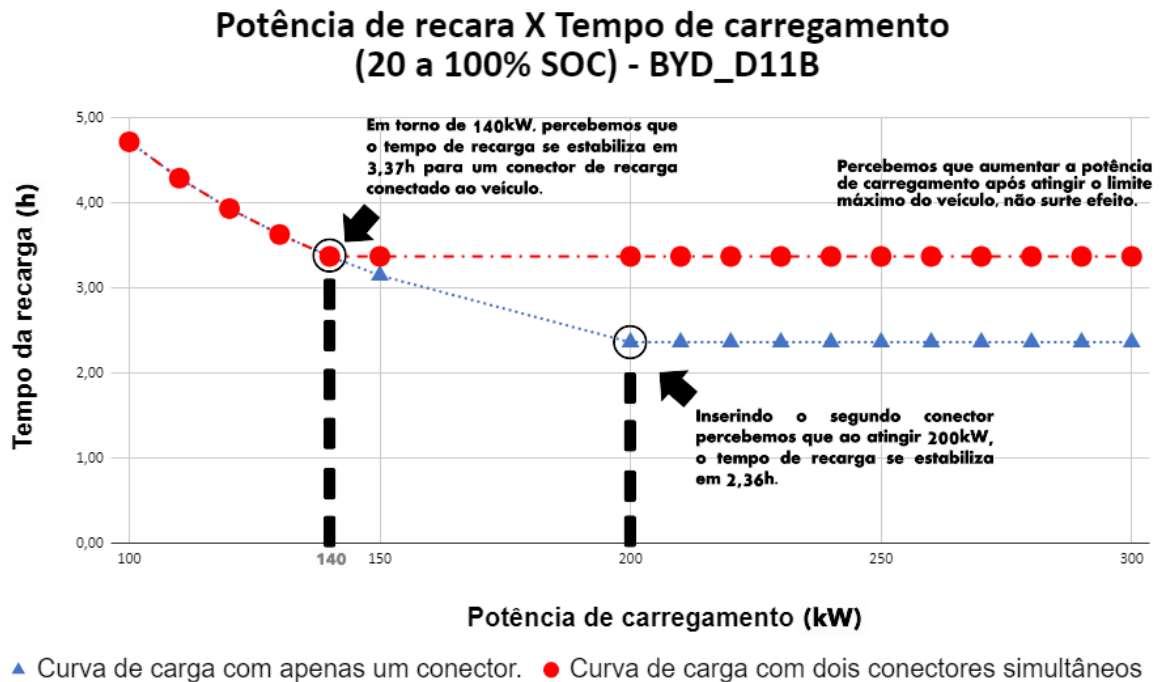
$$\text{Tempo de Recarga (h)} = \frac{\Delta SoC \times \text{Capacidade da Bateria (kWh)}}{\text{Potência de Recarga (kW)}} \quad (2.1)$$

- **ΔSoC** : Variação do estado de carga da bateria. Por exemplo, para uma recarga de 20% a 100%, adota-se $\Delta SoC = 0,8$.
- **Capacidade da Bateria (kWh)**: Energia total que pode ser armazenada na bateria, expressa em quilowatt-hora.
- **Potência de Recarga (kW)**: Potência efetiva entregue pelo carregador à bateria.
- **Tempo de Recarga (h)**: Tempo necessário para atingir o nível de carga desejado.

Como pode ser observado na Figura 19, o simples aumento da potência do carregador não resulta necessariamente em uma redução no tempo de recarga, uma vez que o veículo possui um limite técnico definido pelo *Battery Management System* (BMS). No ponto de interseção destacado, nota-se que o BMS já atingiu a potência máxima admissível pelo sistema do veículo. Assim, mesmo que o carregador tenha capacidade para fornecer mais energia, isso não influenciará o tempo total de carregamento. Por outro lado, a utilização de carregadores com potência inferior

umenta significativamente o tempo de recarga, o que pode comprometer a disponibilidade operacional da frota.

Figura 19 – Relação entre potência do carregador e tempo de recarga — modelo BYD D11B.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O aumento da potência de carregamento e a escolha entre modelos de conector único *single* ou conector duplo *dual* impactam diretamente tanto no custo da infraestrutura quanto no valor dos carregadores, conforme ilustrado na Tabela 8. Os valores foram retirados de orçamentos de referência de um fabricante de carregadores no mercado brasileiro no ano de 2025. Outro fator determinante, é o volume de compra, terminais com maiores quantidades de estações, conseguem negociar preços menores por unidade.

Tabela 8 – Custo de referência por tipo de carregador

Tipo de Carregador	Potência (kW)	Nº de Conectores	Custo (R\$)
DC	180	2 (Dual)	R\$ 260.530,60
DC	180	1 (Single)	R\$ 200.480,60
DC	120	2 (Dual)	R\$ 207.103,81
DC	120	1 (Single)	R\$ 156.360,70
DC	80	2 (Dual)	R\$ 156.282,00
DC	80	1 (Single)	R\$ 156.282,00

Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

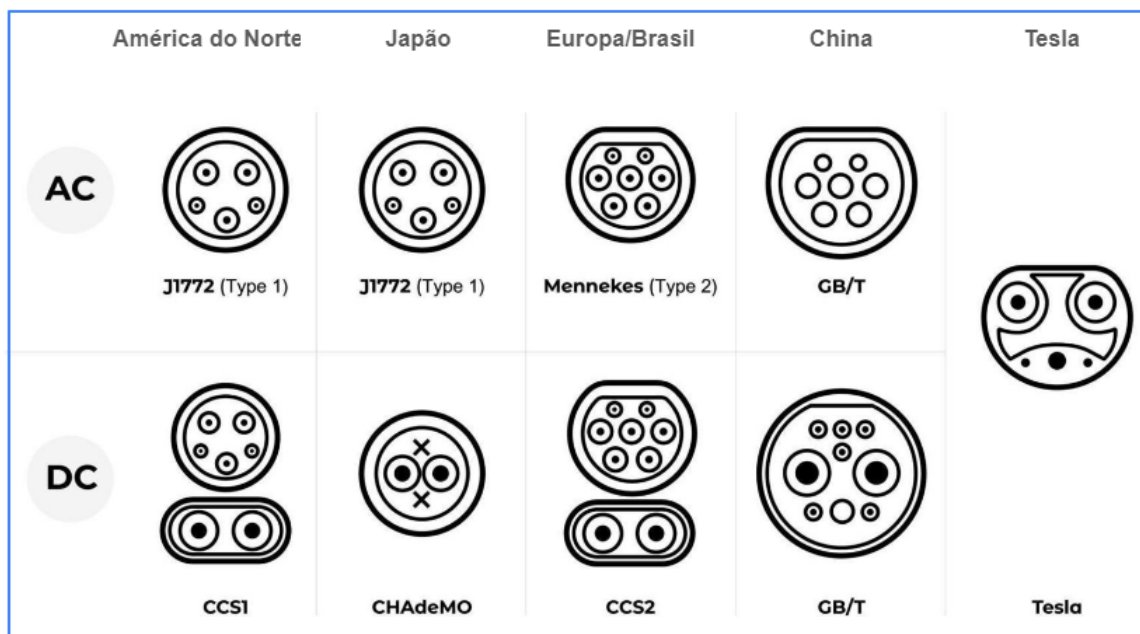
É importante destacar que a potência nominal atribuída a uma estação de recarga nem

sempre representa sua capacidade real de entrega com diferentes quantidades de conectores. Como discutido anteriormente, a potência efetiva de carregamento depende não apenas do carregador, mas também das características do veículo, da corrente máxima suportada pelo cabo e do protocolo de comunicação do conector.

Outro fator determinante na infraestrutura de recarga é a escolha do tipo de conector. Esta decisão está diretamente ligada à interface de entrada dos veículos da frota a ser atendida. Cada protocolo de conector possui especificações técnicas distintas que influenciam na corrente máxima permitida, como apresentado na Tabela 9 e ilustrado na Figura 27.

Por exemplo, o conector GB/T — padrão chinês — é amplamente utilizado em maquinários de grande porte, como os dos setores agrícola e de mineração, pois permite a condução de correntes elevadas (até 600 A) sem a necessidade de refrigeração líquida. Por outro lado, o conector CCS2 — padrão europeu — é amplamente adotado em veículos urbanos, como ônibus e automóveis elétricos, com um limite de corrente em torno de 250 A.

Figura 20 – Principais tipos de conectores disponíveis no mercado



Fonte: EAFO - Observatório Europeu de Combustíveis Alternativos, 2024.

Tabela 9 – Corrente máxima por tipo de conector de recarga

Tipo de Conector	Corrente Máxima	Observações
Tipo 1 (SAE J1772)	32 A (AC)	Monofásico — comum na América do Norte
Tipo 2 (Mennekes)	32 A (AC)	Padrão europeu — amplamente usado no Brasil
CCS Tipo 1 (Combo 1)	500 A (DC)	Versão rápida do Tipo 1
CCS Tipo 2 (Combo 2)	500 A (DC)	Versão rápida do Tipo 2
CHAdeMO	400 A (DC)	Padrão japonês — comum em veículos Nissan
Tesla (proprietário)	300 A (AC/DC)	Compatível com estações Supercharger da Tesla
GB/T (AC)	32 A (AC)	Padrão chinês – corrente alternada
GB/T (DC)	250 A (DC) ³	Padrão chinês – corrente contínua

Adaptado de: EAFO - Observatório Europeu de Combustíveis Alternativos, 2024.

2.3.4 Desafios

Como demonstrado ao longo deste trabalho, diversas tecnologias envolvidas na implantação de um eletroterminal sustentável para recarga de ônibus elétricos apresentam tanto benefícios quanto desafios. A seguir, listam-se os principais obstáculos identificados:

- Alto custo de instalação e infraestrutura;
- Autonomia limitada dos veículos;
- Necessidade de grande espaço físico para operação e manutenção;
- Mercado ainda recente, com escassez de profissionais qualificados, o que eleva os custos com mão de obra especializada.

Tabela 10 – Investimentos, modelos e quantidade de carregadores em eletroterminais no Brasil

Cidade / Projeto	Custo Estimado (R\$)	Modelo do Carregador	Qtd. Estações
São José dos Campos	4,6 milhões	100 kW Dual	6
Salvador	4,0 milhões	80 kW Dual	10
Cascavel	7,5 milhões	180 kW Dual	9

Adaptado de: CASCAVEL 2023, SALVADOR 2023, DIÁRIO DO TRANSPORTE 2022.

Como mostrado na Tabela 10, os dados apresentados exemplificam os custos relacionados à infraestrutura de recarga, os quais foram extraídos de materiais e informações publicadas pelas próprias prefeituras na internet e em diários oficiais. Além desses custos, é importante observar também o custo médio dos ônibus elétricos, apresentado na Tabela 11, que registraram um aumento de 2,77% entre 2023 e 2024. Estes dados que foram levantados pelo Diário do Transporte em 2024 (Diário do Transporte).

Tabela 11 – Comparativo de custos de transporte por tipo de veículo (2023–2024)

Tipo	2023	2024	Aumento	%
<i>MIDI</i>	R\$ 1.879.076,87	R\$ 1.931.142,27	R\$ 52.065,40	2,77%
<i>Básico</i>	R\$ 2.024.475,25	R\$ 2.080.569,34	R\$ 56.094,09	2,77%
<i>Padron</i>	R\$ 1.965.003,12	R\$ 2.019.449,37	R\$ 54.446,25	2,77%
<i>Padron 15m</i>	R\$ 2.178.995,14	R\$ 2.239.370,66	R\$ 60.375,52	2,77%
<i>Articulado 18m</i>	R\$ 2.814.271,43	R\$ 2.892.249,18	R\$ 77.977,75	2,77%
<i>Articulado 21m</i>	R\$ 2.834.921,54	R\$ 2.913.471,45	R\$ 78.549,91	2,77%

Fonte: Diário do Transporte, 2024.

2.4 Eletroterminais Sustentáveis - Usinas solares vinculadas

Neste trabalho, serão analisadas usinas fotovoltaicas com o objetivo de avaliar seu impacto tanto sob a ótica da sustentabilidade ambiental quanto da viabilidade financeira, no contexto de projetos de eletroterminais sustentáveis. Inicialmente, será apresentada uma visão geral da estrutura dessas usinas, sem aprofundamento técnico. Em seguida, será aplicada uma metodologia específica — descrita na Seção de Metodologia — para estimar seus custos de implantação, bem como os impactos e benefícios ambientais associados à sua operação.

Uma usina fotovoltaica é composta por diversos subsistemas interligados que visam à conversão da energia solar em energia elétrica e sua inserção na rede elétrica. A seguir, descrevem-se os principais componentes que compõem uma usina fotovoltaica de médio ou grande porte.

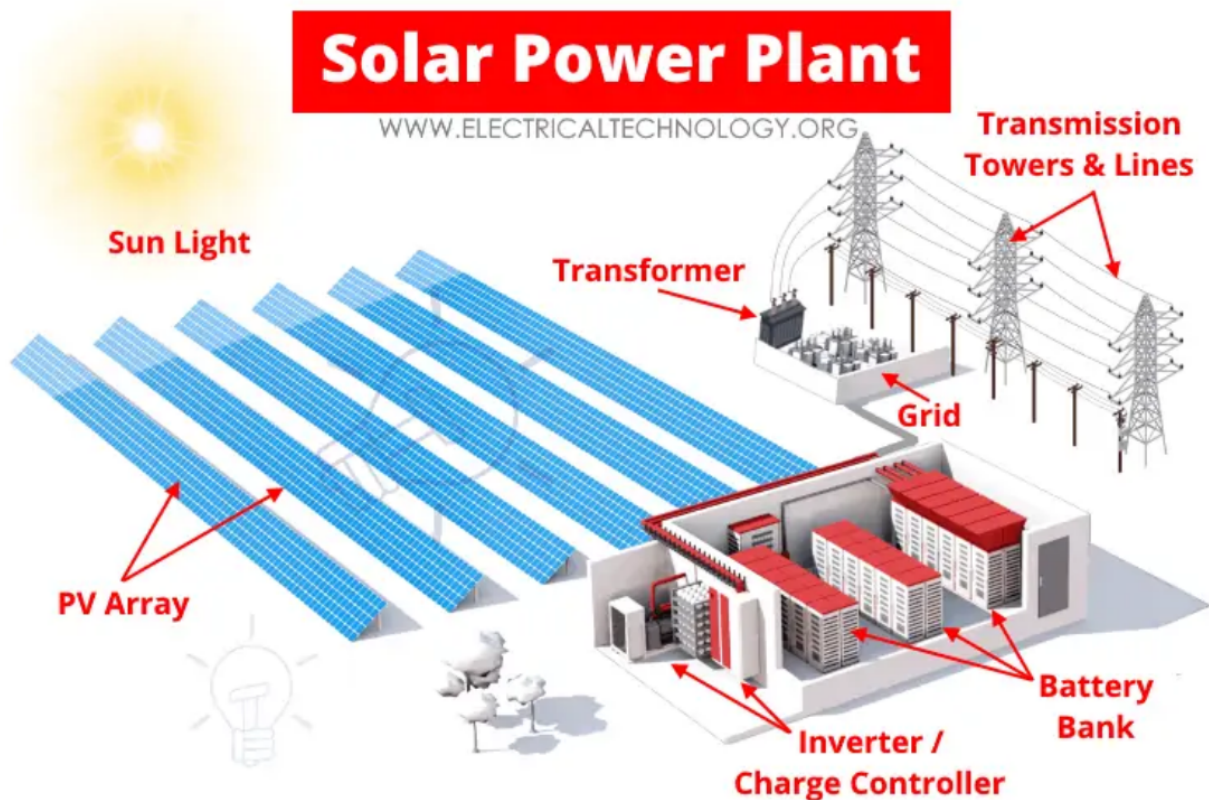


Figura 21 – Principais elementos de uma usina fotovoltaica

Fonte: Electrical Technology, 2021.

Sistema Gerador (Campo Fotovoltaico):

- **Módulos fotovoltaicos:** responsáveis pela conversão da radiação solar em corrente elétrica contínua (DC).
- **String Box (caixa de junção CC):** agrupa circuitos dos módulos e oferece proteção elétrica (fusíveis, disjuntores, DPS).
- **Estruturas de fixação:** suportes metálicos que garantem a estabilidade dos módulos e seu posicionamento adequado em relação ao sol.
- **Sistemas de rastreamento solar (opcional):** mecanismos que ajustam a inclinação dos módulos ao longo do dia para maximizar a captação solar.

Sistema de Conversão:

- **Inversores:** realizam a conversão da corrente contínua (DC) gerada pelos painéis para corrente alternada (AC), compatível com a rede elétrica. Podem ser do tipo *string* ou *central*.

- **Transformadores:** elevam a tensão da corrente alternada para níveis adequados de transmissão e distribuição.

Sistema de Conexão e Distribuição:

- **Quadros elétricos (AC):** realizam a proteção e o seccionamento dos circuitos de saída dos inversores.
- **Cabos e eletrodutos:** realizam as conexões entre os diferentes equipamentos da planta.
- **Subestação elétrica (SE):** integra a energia produzida na usina à rede pública de distribuição ou transmissão.

Sistema de Monitoramento e Controle:

- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** sistema que permite o monitoramento remoto do desempenho e funcionamento da usina.
- **Sensores climáticos:** dispositivos que medem variáveis ambientais, como irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento.
- **Data logger ou gateways:** responsáveis pela coleta e transmissão dos dados operacionais.

Sistema de Proteção:

- **Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS):** protegem os equipamentos contra descargas atmosféricas e picos de tensão.
- **Disjuntores e seccionadoras:** permitem o desligamento seguro de partes do sistema para manutenção.
- **Sistema de aterramento e SPDA:** proteção contra descargas elétricas e segurança operacional.

Infraestrutura de Apoio:

- **Sala de controle e operação:** espaço destinado à supervisão e gerenciamento da usina.
- **Abrigos e cabines:** proteção física dos inversores, transformadores e outros equipamentos sensíveis.
- **Sistema de segurança:** inclui cercamento, CFTV e sensores de intrusão.
- **Sistema de comunicação:** interliga os equipamentos via fibra óptica, rádio ou outras tecnologias.

- **Vias internas e drenagem:** facilitam o acesso para manutenção e evitam alagamentos.

Sistema de Armazenamento de Energia (opcional):

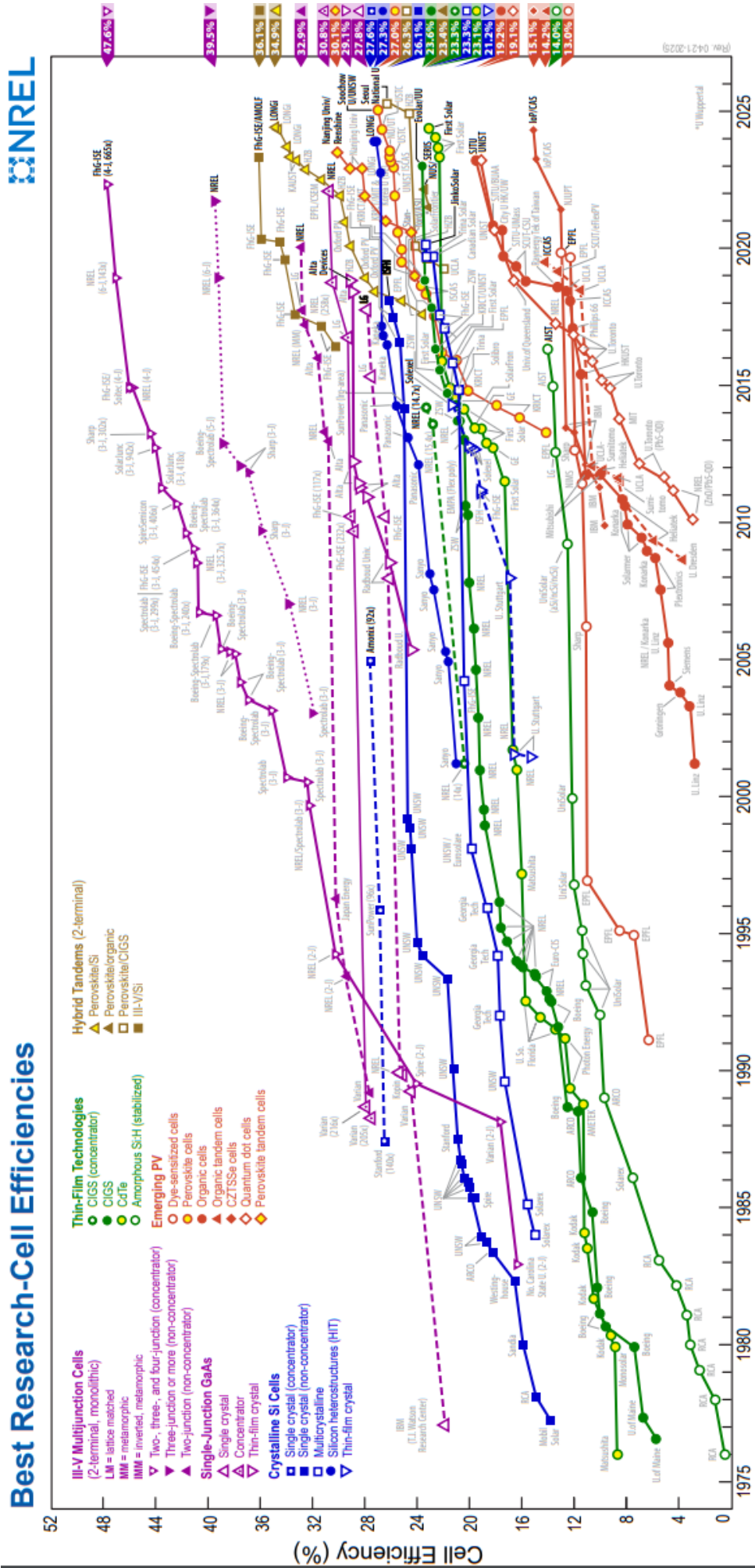
- **BESS (Battery Energy Storage System):** sistema de baterias para armazenar energia elétrica e fornecê-la em momentos estratégicos, como picos de demanda ou ausência de radiação solar.

Para avaliar a eficiência de uma usina fotovoltaica, é fundamental considerar o tipo de material utilizado na fabricação dos painéis solares. Conforme apresentado na pesquisa realizada por (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2024), ilustrada na Figura 27, existem diversos tipos de materiais e tecnologias empregados na produção de células fotovoltaicas.

Entretanto, como o foco deste trabalho não é discutir em profundidade as diferentes tecnologias fotovoltaicas, adota-se como referência os painéis de silício cristalino — amplamente utilizados no mercado e reconhecidos por apresentarem desempenho intermediário em termos de eficiência e relação custo-benefício.

A Figura 22 apresenta o desempenho de diferentes materiais empregados na fabricação de painéis solares, com base em dados laboratoriais extraídos do relatório do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

Na Seção de Metodologia, serão utilizados dados dos principais fabricantes do setor fotovoltaico para estimar a eficiência das usinas e possibilitar os cálculos necessários à avaliação de seu desempenho energético e ambiental.



A Tabela 12 resume os principais tipos de painéis solares baseados em silício, destacando suas eficiências típicas e vida útil média, os dados de eficiência foram extraídos da figura 22.

Tabela 12 – Resumo das tecnologias de painéis solares baseadas em silício.

Tipo de Painel	Eficiência (%)	Vida Útil (anos)
Monocristalino (concentrador)	27,6%	25–30
HJT	27,3%	25–30
Monocristalino (não - concentrador)	26,1%	25–30
Policristalino	23,3%	20–25
Filme Fino (Thin-Film)	21,2%	10–20

Fonte: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2024.

2.5 Método de avaliação dos terminais - Origem e Fundamentação do Método de *Scoring*

O método de *scoring*, também conhecido como modelo de pontuação ponderada, é amplamente utilizado em processos de avaliação e tomada de decisão multicritério, especialmente nas áreas de engenharia, administração e análise de investimentos. Embora sua aplicação prática seja bastante difundida, o método não possui um único criador definido. Em vez disso, sua origem está vinculada à consolidação progressiva de técnicas de apoio à decisão que surgiram a partir do século XX. Será a referência utilizada para a criação do método utilizado neste trabalho para as pontuações dos terminais avaliados.

As ideias iniciais sobre avaliação com base em múltiplos critérios remontam ao economista Irving Fisher, que já em 1896 abordava a comparação de preferências com base em atributos ponderados (FISHER, 1896). Posteriormente, a contribuição de Herbert A. Simon, por meio de sua teoria da racionalidade limitada (SIMON, 1955), destacou a importância de métodos pragmáticos para decisões em ambientes complexos e incertos, influenciando diretamente o desenvolvimento de modelos simplificados de avaliação por pontos.

A formalização acadêmica do método de *scoring* foi significativamente influenciada pelos trabalhos de Keeney e Raiffa, especialmente na obra *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs* (KEENEY; RAIFFA, 1976), na qual os autores estabelecem uma estrutura matemática para a atribuição de pesos e valores a diferentes critérios, formando a base do que se entende atualmente como modelos de pontuação ponderada.

Ao longo das décadas de 1980 e 1990, o método ganhou força com o avanço das práticas de engenharia de software, gestão de portfólios e avaliação de projetos, destacando-se por sua simplicidade, transparência e flexibilidade. Consultorias estratégicas como McKinsey & Co. e instituições como o Gartner Group contribuíram para sua popularização no meio corporativo. Ademais, o conceito de avaliação por pontuação também foi reforçado por metodologias como o *Balanced Scorecard*, desenvolvido por Kaplan e Norton (KAPLAN; NORTON, 1996).

Em síntese, o método de *scoring* é o resultado da evolução de abordagens quantitativas de apoio à decisão, sendo sustentado por bases teóricas robustas da análise multicritério, mas amplamente moldado pelas demandas práticas de avaliação comparativa de alternativas em contextos diversos.

Segue um exemplo de tabela (13) utilizando o método de *Scoring*.

Tabela 13 – Exemplo de avaliação por pontuação de projetos

Critério	Peso (%)	Projeto A	Projeto B	Projeto C
Custo estimado	30	8	7	9
Prazo de execução	25	7	9	6
Impacto ambiental	20	9	8	7
Geração de emprego	15	6	7	8
Viabilidade técnica	10	9	8	7
Pontuação final	100	7,65	7,85	7,45

Adaptado de: KEENEY; RAIFFA, 1976.

Nota: A pontuação final foi obtida multiplicando-se cada nota pelo peso do critério correspondente (em forma decimal) e somando-se os resultados.

2.5.1 Análise de robustez operacional e o FMEA

A Análise de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis* – FMEA) é uma metodologia sistemática para identificar, avaliar e priorizar falhas potenciais em produtos, processos ou sistemas. Aplicada em diversos setores industriais, a FMEA analisa os modos de falha, suas causas e efeitos, classificando-os com base em três critérios: **Severidade** (S), **Ocorrência** (O) e **Detecção** (D), cada um avaliado em escala ordinal, usualmente de 1 a 10. O produto desses valores resulta no **RPN** (*Risk Priority Number*), utilizado para ranquear os riscos e definir ações corretivas ou preventivas.

Segundo (STAMATIS, 2003), cada linha da matriz FMEA estrutura essas informações por meio da descrição do item analisado, modo de falha, efeito e causa potencial. A metodologia promove uma abordagem proativa na gestão de riscos, aumentando a confiabilidade e a robustez do sistema, ao direcionar os esforços às falhas mais críticas e contribuir para a melhoria contínua. A tabela 14 exibe um exemplo de FMEA já aplicado a eletroterminias de recarga..

Tabela 14 – FMEA – Robustez Operacional na Operação de Carregamento de Veículos Elétricos

Item	Modo de Falha	Efeito da Falha	Causa Potencial	S	O	D	RPN	Ações Recomendadas
1	Indisponibilidade do carregador	Veículo não consegue carregar / Atraso nas operações	Falha elétrica / Falha interna do equipamento	9	4	3	108	Manutenção preventiva e peças críticas em estoque
2	Falha na comunicação OCPP	Impossibilidade de iniciar ou monitorar a carga	Erro de software / Rede / Firmware desatualizado	8	3	4	96	Atualizações de firmware e testes periódicos
3	Sobrecarga elétrica simultânea	Queda de energia / Interrupção da operação	Ausência de gerenciamento de carga	9	3	3	81	Implementar sistema LMS com balanceamento
4	Conector danificado	Impossibilidade de conexão / Risco à segurança	Uso inadequado / Desgaste	7	4	3	84	Inspeções diárias e treinamento operacional
5	Falha na identificação do veículo	Erro na autorização da carga	Defeito em leitores / Configuração incorreta	6	3	4	72	Testes de autenticação e backup manual
6	Falta de pessoal capacitado	Tempo excessivo de parada	Rotatividade / Treinamento insuficiente	7	3	3	63	Treinamento contínuo e procedimentos claros
7	Condições climáticas adversas	Curto-circuito / Paralisação da recarga	Falta de proteção física dos equipamentos	8	2	4	64	Proteções IP adequadas e sensores de alimentação
8	Falta de planejamento de recarga	Congestionamento e atrasos na frota	Deficiência no agendamento / Integração limitada	7	4	4	112	Sistema de agendamento integrado à frota

Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

- **Severidade (S):** Impacto da falha na operação (1 = baixo, 10 = crítico).
- **Ocorrência (O):** Frequência da falha (1 = rara, 10 = frequente).
- **Detecção (D):** Probabilidade de detecção antes do impacto (1 = fácil, 10 = difícil).
- **RPN (Risk Priority Number):** $RPN = S \times O \times D$; quanto maior, maior a prioridade de ação.

A análise da Tabela 14 permite constatar que grande parte dos riscos identificados está diretamente associada à infraestrutura elétrica, ao correto dimensionamento das estações de recarga e à existência de estratégias adequadas de redundância e planejamento operacional. Diante disso, a seção 3.3 (Método de avaliação da sustentabilidade) deste trabalho abordará os parâmetros e critérios utilizados para a avaliação da eficiência e robustez operacional do terminal, com foco na mitigação desses riscos.

2.5.2 Análise sustentável e indicadores de ESG

A Global Reporting Initiative (GRI) é uma organização internacional independente, fundada em 1997, que desenvolve padrões amplamente utilizados para a elaboração de relatórios de sustentabilidade. Seus *frameworks* orientam organizações públicas e privadas a divulgar, de forma transparente, seus impactos econômicos, ambientais e sociais. Os indicadores ESG

(*Environmental, Social and Governance*) mais recorrentes nas diretrizes do GRI incluem, no eixo ambiental, a gestão de energia (GRI 302) e emissões de gases de efeito estufa (GRI 305); no eixo social, destacam-se aspectos como saúde e segurança ocupacional (GRI 403) e impacto nas comunidades locais (GRI 413); e, no eixo de governança, são abordadas práticas de compliance, ética e participação das partes interessadas (GRI 102 e GRI 205). Tais indicadores são fundamentais para avaliar a sustentabilidade de projetos de infraestrutura, como eletroterminais, contribuindo para decisões mais responsáveis e alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (INITIATIVE, 2021).

Neste trabalho, a avaliação da sustentabilidade dos eletroterminais será conduzida com base em três indicadores principais:

- O uso de fontes renováveis para compensação da eletricidade consumida na operação do terminal;
- A quantidade de emissões de gases de efeito estufa evitadas em função da eletrificação da frota;
- A estimativa de créditos de carbono gerados, expressos em valores monetários (R\$).

Na seção 3.3 (Método de avaliação da sustentabilidade), serão apresentados os métodos de cálculo e as premissas utilizadas para a obtenção dos resultados relacionados a esses indicadores.

3 METODOLOGIA

3.1 Método de avaliação e consolidação dos resultados finais

Este trabalho tem como objetivo avaliar três eletroterminais de recarga públicos implantados pela empresa na qual atuo, com ênfase específica na operação de recarga de ônibus elétricos. A proposta é compreender o funcionamento desses terminais e discutir os resultados obtidos a partir de duas perspectivas principais: a ambiental e a quantitativa. Complementarmente, serão abordados os custos médios de mercado associados às aplicações e soluções analisadas.

A análise busca responder às seguintes questões fundamentais:

- Qual dos terminais demonstra maior robustez operacional?
- Qual apresenta o melhor desempenho em termos de sustentabilidade?
- Qual oferece o melhor custo-benefício?

Cada uma das perguntas será analisada com base em dados quantitativos e/ou qualitativos, a fim de se chegar a uma conclusão. Essa comparação será consolidada por meio de uma pontuação, descrita nesta seção.

Para responder à pergunta "Qual dos terminais demonstra maior robustez operacional?", serão considerados os seguintes aspectos:

- O percentual de utilização do potencial de carregamento do terminal;
- Quantidade de pontos de recarga de oportunidade disponíveis;
- Existência de previsão de expansão da infraestrutura elétrica, incluindo a presença de múltiplos transformadores na entrada de alimentação;
- Eficiência do layout da instalação, com foco na otimização do uso simultâneo de todos os conectores de recarga.

Para a questão "Qual dos terminais apresenta maior sustentabilidade?", os critérios de avaliação incluirão:

- Emissões evitadas com a eletrificação da frota;
- Consumo energético do terminal — levantamento da demanda total de energia consumida mensalmente para sua operação;
- Existência de sistemas de geração de energia renovável, como usinas fotovoltaicas, para compensação parcial ou total do consumo elétrico.

Além da análise comparativa, o trabalho também propõe melhorias para os problemas identificados em cada terminal, acompanhadas de uma estimativa de custos para as adequações necessárias. Por fim, busca-se mapear um conjunto de boas práticas e diretrizes que contribuam para o desenvolvimento eficiente de eletroterminais de recarga, tanto públicos quanto privados.

Neste contexto, será abordada a questão "Qual oferece o melhor custo-benefício?", considerando os seguintes fatores:

- Geração de créditos de carbono associada à operação do terminal;
- Conjunto de funcionalidades oferecidas em relação ao custo de implantação e operação;
- Custo estimado para a correção dos problemas identificados em cada terminal.

3.2 Método de avaliação da robustez operacional

3.2.1 Percentual de utilização do potencial de recarga do terminal

Um dos principais parâmetros utilizados para avaliar o correto dimensionamento das estações de recarga, assim como a viabilidade de expansão da frota de veículos eletrificados, é o percentual de utilização do terminal. Este indicador é fundamental para compreender a margem operacional disponível e os ajustes necessários na organização dos horários de recarga da frota. O cálculo desse indicador é realizado com base nas equações apresentadas a seguir.

Primeiramente, é necessário determinar a quantidade de energia demandada pela frota, a qual é calculada de acordo com os veículos elétricos disponíveis. As frotas podem ser compostas por diferentes modelos, com capacidades de baterias variadas, além de apresentarem diferentes níveis de estado de carga (SOC) em função da distância percorrida por cada veículo. Assim, temos:

$$E_{\text{dem}} = \sum_{i=1}^n (N_{\text{bus},i} \cdot E_{\text{bat},i} \cdot \Delta_{\text{SOC},i}) \quad (3.1)$$

- E_{dem} : Energia total demandada pela frota para recarga por dia (kWh);
- n : Número total de tipos diferentes de veículos na frota;
- $N_{\text{bus},i}$: Quantidade de veículos do tipo i ;
- $E_{\text{bat},i}$: Capacidade da bateria dos veículos do tipo i (kWh);
- $\Delta_{\text{SOC},i}$: Faixa de recarga utilizada pelos veículos do tipo i , considerando a variação do estado de carga (SOC), representada como fração decimal (por exemplo, 0,8 para uma recarga de 20% a 100%);

- i : Índice que representa cada tipo de veículo da frota, variando de 1 até n .

Como não temos dados precisos das rotas (distância percorrida), vamos considerar sempre um ΔSOC de 80% (0,8).

O próximo passo consiste em determinar a energia disponível no terminal, com base nas estações de recarga instaladas. Vale destacar que, nesta análise, não são consideradas as estações de recarga de oportunidade, uma vez que estas são tratadas como redundância operacional.

Para isso, é necessário estimar o tempo disponível para as recargas, utilizando dados obtidos a partir dos relatórios gerados pelas plataformas de gestão dos terminais, conforme a equação a seguir:

$$T_{\text{disp}} = \frac{T_{\text{total}}}{N_{\text{recargas}}} \cdot 2 \quad (3.2)$$

- T_{disp} : Tempo médio gasto por recarga em cada conector (horas);
- T_{total} : Tempo total acumulado com todas as recargas no período analisado (horas);
- N_{recargas} : Número total de recargas realizadas no período;
- Fator 2: Fator de correção aplicado, considerando que, em muitos casos, as recargas ocorrem com apenas metade da potência máxima disponível na estação.

É importante ressaltar que, em terminais que não possuem dados detalhados de recarga devido à ausência de software de gestão, será adotado um período padrão de 5 horas (entre 00:00 e 05:00), correspondendo ao horário em que os ônibus geralmente estão fora de operação e estacionados nas garagens. Estimar o tempo disponível para recargas sem informações diretas da empresa operadora é um desafio, sendo este um dos métodos mais conservadores.

A partir dessas informações, podemos determinar a energia disponível para recarga, com base na seguinte equação:

$$E_{\text{disp}} = T_{\text{disp}} \cdot \sum_{j=1}^m (N_{\text{con},j} \cdot P_{\text{max},j}) \quad (3.3)$$

- E_{disp} : Energia total disponível para recarga no dia (kWh);
- T_{disp} : Janela de tempo disponível para recarga (horas);
- m : Número de diferentes tipos de conectores/carregadores com potências distintas;
- $N_{\text{con},j}$: Número de conectores do tipo j ;
- $P_{\text{max},j}$: Potência máxima de recarga de cada conector do tipo j (kW);

- j : Índice que representa cada tipo de conector ou carregador disponível no terminal, variando de 1 até m .

Assim, o percentual de utilização de um eletroterminal é definido por:

$$PCU = \left(\frac{E_{dem}}{E_{disp}} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

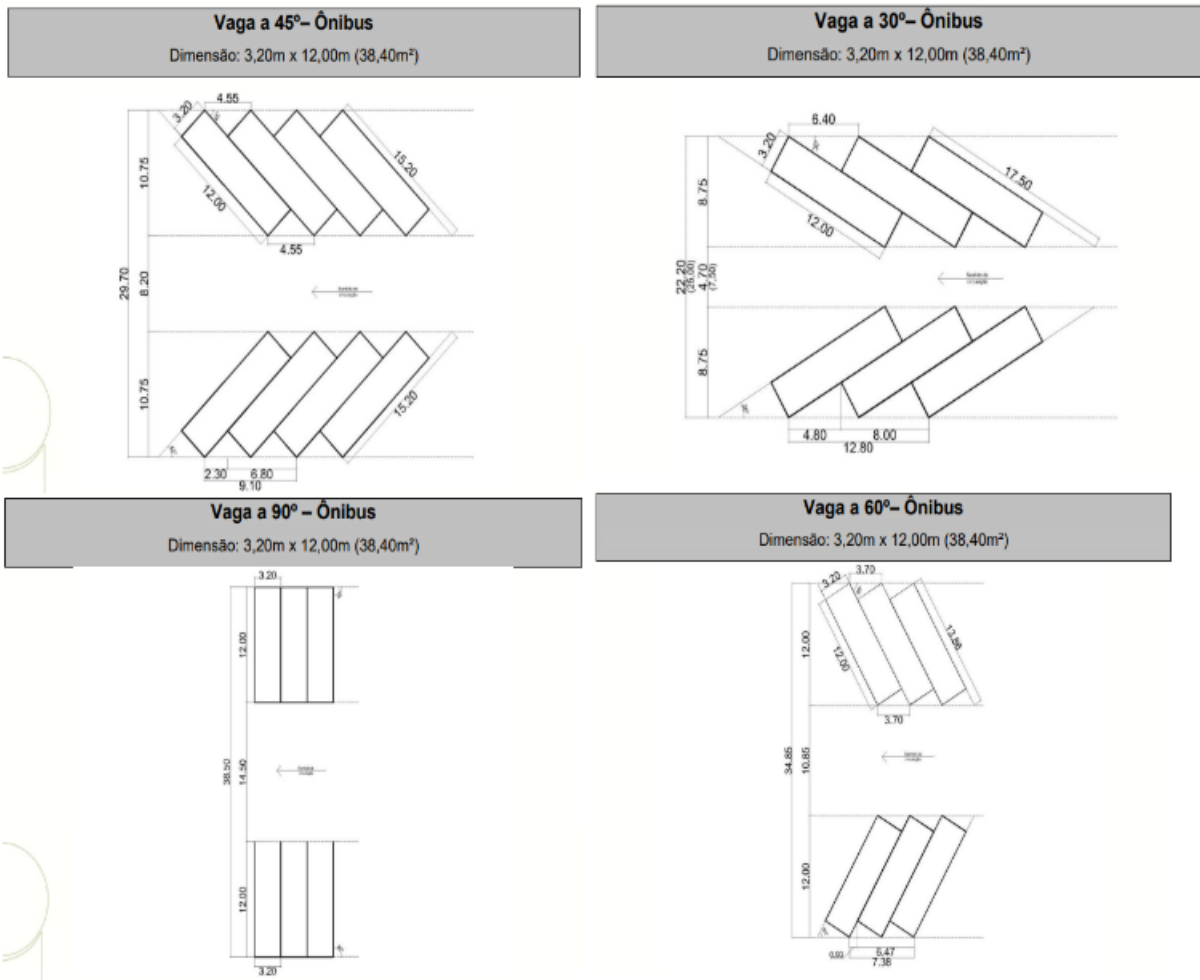
$$PCU = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot \Delta SOC_{i})}{\left(\frac{T_{total}}{N_{recargas}} \cdot 2 \right) \cdot \sum_{j=1}^m (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde PCU representa o percentual de utilização do terminal em porcentagem (%).

3.2.2 Layout da instalação e o impacto na operação

No processo de elaboração de projetos de eletroterminais, a definição do layout das estações de recarga desempenha um papel fundamental na otimização do espaço disponível e na redução de custos operacionais. De acordo com (IPDSA, 2025), a adoção de layouts com organização angular das vagas, especialmente no formato conhecido como "espinha de peixe" com ângulo de 45°, permite acomodar um maior número de ônibus em uma mesma área em comparação a outras angulações. Essa configuração resulta em uma ocupação mais eficiente do espaço físico e pode gerar significativa economia na implantação da infraestrutura.

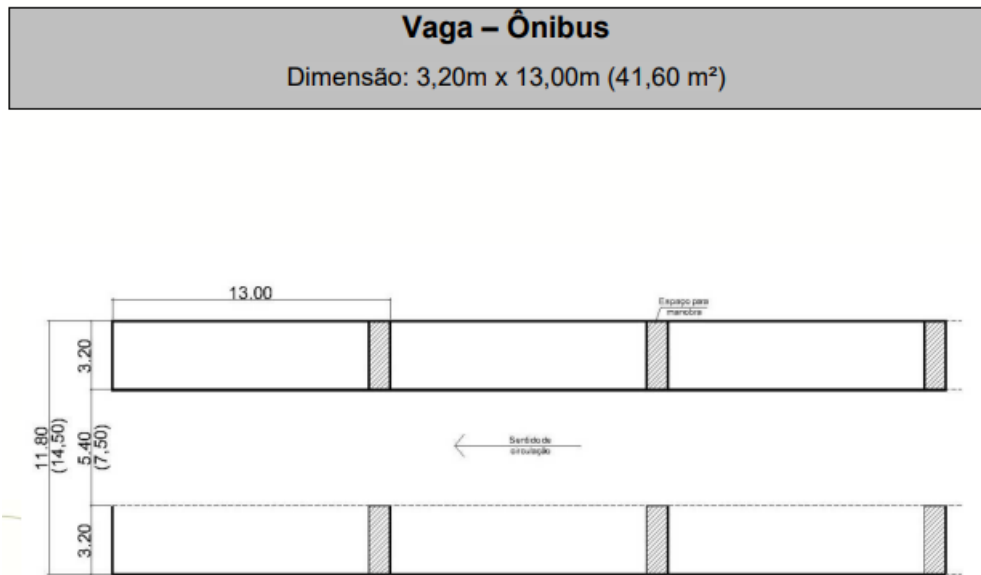
Figura 23 – Layout das vagas com diferentes ângulos



Fonte: IPDSA, 2025.

Ressalta-se que o layout com ângulo de 180° é o menos eficiente, pois demanda uma área maior para a mesma quantidade de veículos e dificulta a implantação de estações de recarga com dois conectores. Esse tipo de arranjo compromete a flexibilidade operacional e tende a encarecer o projeto.

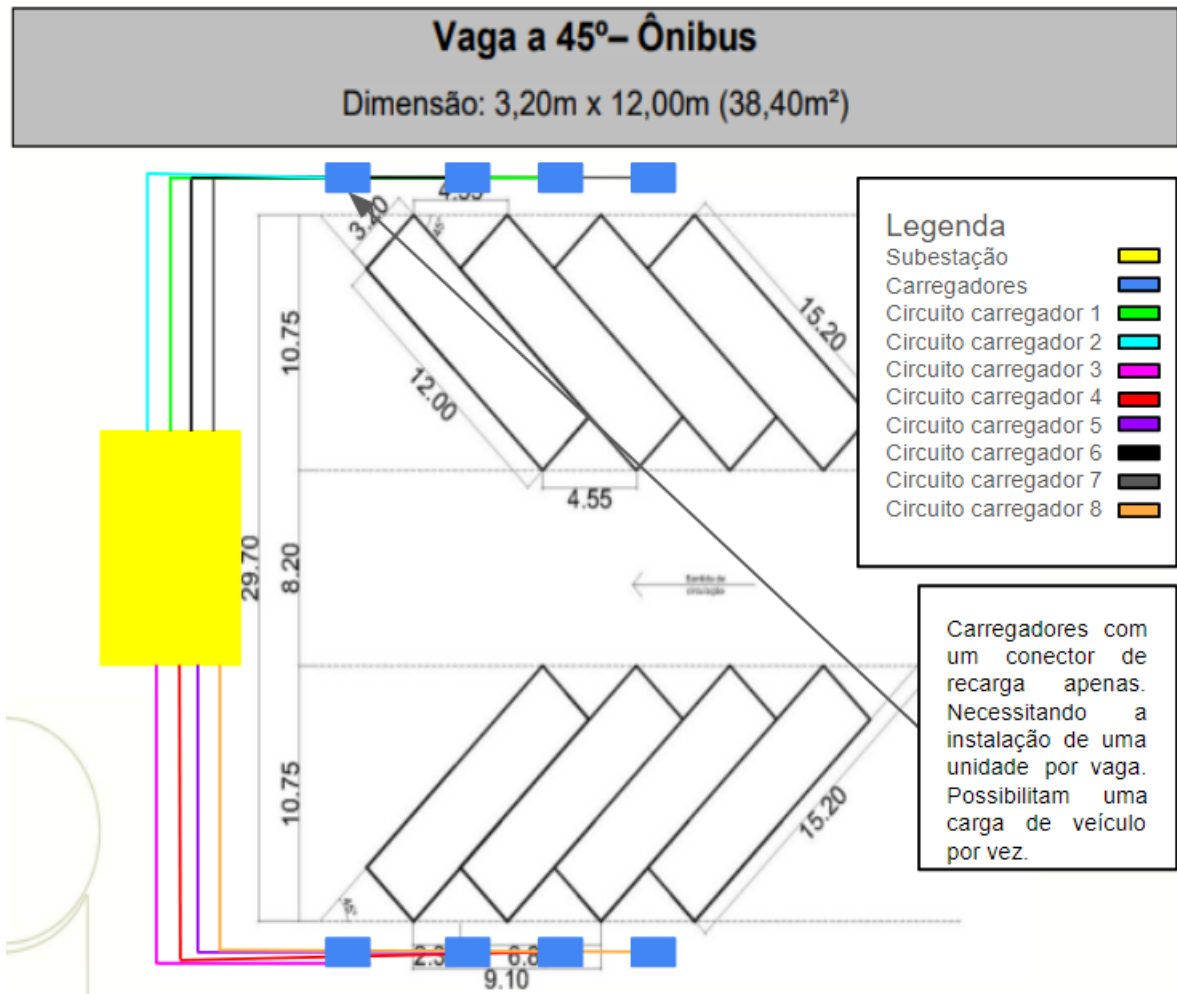
Figura 24 – Layout com vagas em ângulo de 180°



Fonte: IPDSA, 2025.

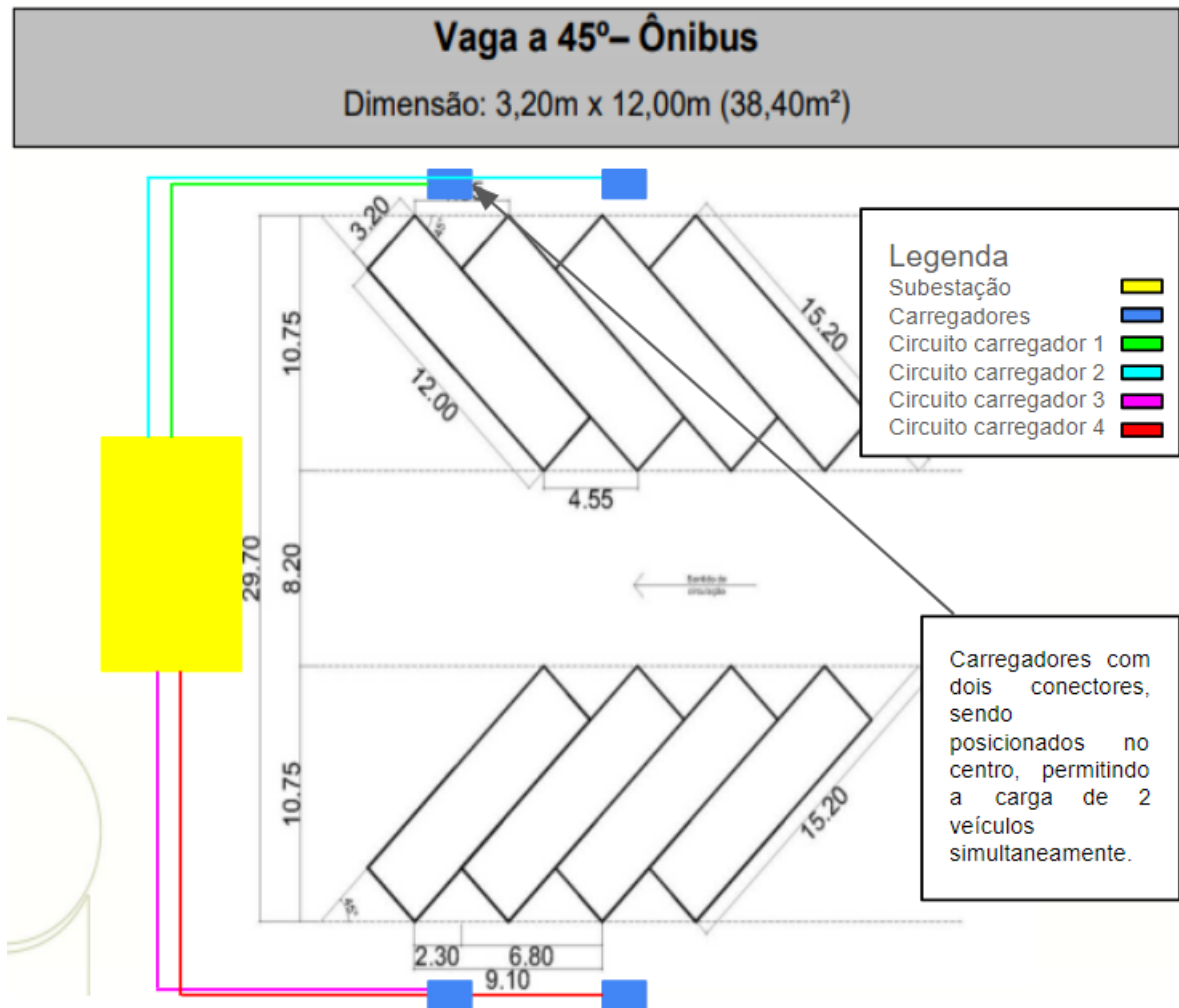
Do ponto de vista da otimização de custos, destaca-se que a utilização de estações de recarga com dois conectores pode potencializar ainda mais a eficiência do layout. Conforme ilustrado na Figura 26, essa configuração reduz o número total de estações necessárias e, consequentemente, o volume de cabos de alimentação utilizados. Considerando que as estações de carga rápida são alimentadas em tensão trifásica de 380V, cada ponto requer um conjunto de cinco condutores (três fases, neutro e terra). O uso racional desses condutores é essencial, uma vez que seu custo tem impacto significativo no orçamento da infraestrutura elétrica.

Figura 25 – Layout com estações de recarga individuais



Fonte: IPDSA, 2025.

Figura 26 – Layout com estações de recarga duplas



Fonte: IPDSA, 2025.

3.2.3 Projeto elétrico e redundância de alimentação do circuito

Em projetos de eletroterminais, a definição da infraestrutura elétrica, especialmente no que se refere à configuração das subestações e transformadores, é um fator crítico para garantir confiabilidade, escalabilidade e facilidade de manutenção. Uma abordagem tradicional, ilustrada na Figura 30, consiste na instalação de uma única subestação com um transformador centralizado, responsável por alimentar todas as estações de recarga do terminal.

Embora essa configuração seja funcional, apresenta fragilidades operacionais: qualquer falha no transformador principal ou em seu cubículo de média tensão pode comprometer toda a operação do terminal. Para mitigar esse risco, uma prática cada vez mais comum é a segmentação da carga por meio da instalação de múltiplos transformadores menores, distribuídos em cubículos independentes.

Nesse modelo, a cabine primária é projetada com várias saídas de média tensão, que alimentam subestações secundárias menores, cada uma com seu próprio transformador. Essa

configuração permite isolar falhas e realizar manutenções em apenas uma parte do sistema, sem paralisar completamente o terminal — aumentando, assim, a disponibilidade e a resiliência da operação.

Do ponto de vista de projeto civil e elétrico, essa abordagem impacta diretamente o layout geral do terminal, exigindo mais espaço para acomodação dos cubículos adicionais. No entanto, essa ocupação extra costuma ser compensada pela maior modularidade e facilidade de expansão futura da infraestrutura.

Em relação aos custos, embora se possa imaginar que a instalação de múltiplos transformadores gere um aumento significativo no orçamento, isso nem sempre se confirma na prática. A Tabela 15 mostra um comparativo hipotético entre a aquisição de um único transformador de 1500 kVA e três unidades de 500 kVA. Os valores de referência foram extraídos de orçamentos de referência com fabricantes de transformadores do mercado.

Tabela 15 – Comparativo de custos entre configurações de transformadores

Transformador	Custo estimado (R\$)
1 x 1500 kVA	145.040,87 (aproximado)
1 x 2000 kVA	199.060,00 (aproximado)
1 x 500 kVA	50.422,54 (aproximado)
1 x 300 kVA	37.152,94 (aproximado)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Como se observa, a diferença de custo entre as as opções pode ser marginal usar um transformador de grande porte ou dividi-lo entre menores cubículos, sobretudo quando ponderada em relação aos ganhos de confiabilidade, manutenção e escalabilidade. Portanto, a escolha por transformadores segmentados pode ser estrategicamente mais vantajosa, mesmo com um pequeno acréscimo no investimento inicial.

Além disso, uma importante forma de redundância operacional nos projetos de eletroterminais é a implantação de pontos de recarga de oportunidade. Em geral, os carregadores destinados a esse tipo de recarga são instalados em locais distintos do terminal principal, estrategicamente posicionados ao longo da rota operacional.

A necessidade de implantação da recarga de oportunidade surge, predominantemente, em linhas cuja autonomia dos veículos elétricos, mesmo iniciando o dia com carga total, não é suficiente para atender toda a jornada operacional com apenas uma recarga diária. Nesses casos, a linha com maior demanda energética torna-se a referência para o planejamento das soluções de recarga.

Para viabilizar o atendimento dessa demanda, é comum a realização de ajustes na grade horária da linha, com a inclusão de pequenas pausas ao longo do dia. Essas pausas são sincronizadas com a disponibilidade das estações de recarga intermediárias — ou seja, os pontos de

recarga de oportunidade — que, em geral, estão localizados em outros terminais ou em locais estratégicos da rede de transporte público.

Além da sua função principal de garantir a autonomia operacional, os pontos de recarga de oportunidade também contribuem para a redução dos chamados tempos mortos de transição, que correspondem aos deslocamentos dos ônibus entre as garagens e os terminais de início das linhas, geralmente realizados sem o transporte de passageiros. Ao permitir que a recarga ocorra diretamente nos pontos de maior fluxo de operação, minimiza-se a necessidade desses deslocamentos improdutivos, otimizando a eficiência energética e operacional do sistema.

3.3 Método de avaliação da sustentabilidade

3.3.1 Determinando a redução de emissões de CO₂ e o impacto ambiental

Em 2006, o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) estabeleceu, por meio de uma série de documentos técnicos, padrões metodológicos e fórmulas para a quantificação de emissões de gases de efeito estufa. Entre essas, destaca-se a equação 3.6, amplamente utilizada para o cálculo de emissões diretas:

$$\text{Ems} = \sum_a (\text{Fuel}_a \times \text{EF}_a) \quad (3.6)$$

Onde:

- **Ems**: Emissões de CO₂ (kg);
- **Fuel_a**: Quantidade de combustível do tipo *a* comercializada (TJ);
- **EF_a**: Fator de emissão do combustível *a* (kg/TJ), calculado com base no conteúdo de carbono multiplicado por $\frac{44}{12}$;
- **a**: Tipo de combustível (por exemplo, gasolina, diesel, gás natural, GLP etc.).

Ao transpor a equação 3.6 para o contexto da substituição de ônibus a combustão por veículos elétricos, é necessário considerar o consumo médio de diesel por quilômetro e o respectivo fator de emissão. No caso dos ônibus elétricos, utiliza-se o consumo médio em km/kWh, bem como o fator de emissão de CO₂ associado à matriz elétrica nacional. A Tabela 16 apresenta os parâmetros adotados para essa comparação. Os dados referentes aos veículos a combustão foram extraídos de (COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE TRANSPORTE DE CARGA (LTC), 2024), enquanto as informações sobre os ônibus elétricos estão em (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT), 2024). Já os fatores de emissão do diesel e da eletricidade foram obtidos, respectivamente, da Tabela 7 (p. 23) de (MCTI, 2020) e da Figura 8 (p.

18) de (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI), 2024). Esses parâmetros serão empregados na estimativa da economia de emissões.

Tabela 16 – Comparação entre Fatores de Emissão e Autonomia de Diferentes Tipos de Veículos

Tipo de Veículo	Fator de Emissão (kg CO₂/km)	Autonomia
Elétrico Padrón BYD	0,0385	0,78 km/kWh
Elétrico Articulado BYD	0,0385	0,46 km/kWh
Elétrico Padrón Higher	0,0385	0,70 km/kWh
Elétrico Articulado Higher	0,0385	0,48 km/kWh
Elétrico Padrón Eletra	0,0385	0,90 km/kWh
Elétrico Articulado Eletra	0,0385	0,76 km/kWh
Combustão Padrón	2,65	1,931 km/L
Combustão Articulado	2,65	1,321 km/L

Adaptado de: COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE TRANSPORTE DE CARGA (LTC) 2024, INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT) 2024, e catálogos dos fabricantes.

Com base na equação 3.6, a redução potencial de emissões de CO₂ (em kg por quilômetro rodado), resultante da eletrificação da frota, pode ser expressa pela equação 4.38:

$$\text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i^{(c)} \cdot C_i^{(c)} \cdot EF_i^{(c)} \right) - \sum_{j=1}^m \left(N_j^{(e)} \cdot C_j^{(e)} \cdot EF_j^{(e)} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

- $N_i^{(c)}$: Número de veículos da categoria i veículo a combustão.
- $C_i^{(c)}$: Consumo médio por veículo da categoria i veículo a combustão. (litros/km).
- $EF_i^{(c)}$: Fator de emissão de CO₂ do energético utilizado pela categoria i veículo a combustão. (ex: kg CO₂/litro).
- $N_j^{(e)}$: Número de veículos da categoria j veículo elétrico.
- $C_j^{(e)}$: Consumo médio por veículo da categoria j veículo elétrico.(kWh/km).
- $EF_j^{(e)}$: Fator de emissão de CO₂ do energético utilizado pela categoria j veículo elétrico.
- $\text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}}$: Economia total de emissões de CO₂ ao substituir a frota de a combustão pela frota elétrica por Km rodado.

Essa equação expressa a diferença entre as emissões estimadas para veículos a diesel e veículos elétricos, permitindo quantificar a redução de CO₂ por quilômetro rodado associada à substituição da tecnologia de propulsão.

Com os cálculos das emissões evitadas por quilômetro rodado em 4.38, é possível determinar o quanto a operação da frota elétrica contribui para a redução de emissões, a partir da estimativa da quilometragem anual percorrida.

Para as frotas que possuem dados de recarga disponíveis, é possível estimar a quilometragem média percorrida correlacionando a autonomia dos veículos com a capacidade de suas baterias. Essa análise baseia-se na relação entre as características técnicas dos veículos e o consumo energético total registrado no terminal durante o período analisado.

Para frotas que não possuem os dados vamos trabalhar com um média de 5000km percorridos por mês, este que é um dado de referência e foi obtido com base em conversa com operadores de frotas do mercado.

Dessa forma, a estimativa da quilometragem média mensal da frota de ônibus elétricos é realizada com base no consumo total de energia elétrica no terminal e nas especificações dos modelos em operação, tais como capacidade da bateria e autonomia. O método proposto permite uma análise quantitativa da atividade operacional da frota, mesmo na ausência de dados detalhados por veículo.

O consumo energético específico de cada modelo é calculado por:

$$C_i = \frac{E_i}{A_i} \quad [\text{kWh/km}] \quad (3.8)$$

O consumo médio ponderado da frota, considerando os diferentes modelos em operação, é determinado por:

$$C_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (3.9)$$

A quilometragem total percorrida pela frota no período de análise é obtida através da seguinte relação:

$$\text{Km}_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{C_{\text{médio}}} \quad (3.10)$$

Finalmente, a quilometragem média mensal e anual da frota é calculada por:

$$\text{Km}_{\text{mês}} = \frac{\text{Km}_{\text{total}}}{T} \quad (3.11)$$

Onde:

- E_{total} : Consumo total de energia elétrica no período considerado, em kWh;
- n : Número total de diferentes modelos de ônibus na frota;

- N_i : Quantidade de ônibus do modelo i ;
- E_i : Capacidade da bateria do modelo i , em kWh;
- A_i : Autonomia do modelo i , em km;
- C_i : Consumo energético específico do modelo i , em kWh/km;
- $C_{\text{médio}}$: Consumo médio ponderado da frota, em kWh/km;
- Km_{total} : Quilometragem total percorrida pela frota no período de análise, em km;
- T : Número de meses no período analisado;
- $Km_{\text{mês}}$: Quilometragem média mensal da frota, em km/mês.

Com os dados de saving de CO₂ por kilometro e a quilometragem que será percorrida por mês, podemos determinar o saving anual de CO₂ da operação dos elétricos por ano em toneladas de Co₂. Este valor que posteriormente usado para cálculo dos créditos de carbono gerados por ano:

$$Km_{\text{anual}} = Km_{\text{mês}} * 12 \quad (3.12)$$

$$SavingCO_2_{\text{anual}} = Km_{\text{anual}} \cdot Saving_{CO_2/km} \quad (3.13)$$

- $Km_{\text{mês}}$: Quilometragem percorrida por mês;
- Km_{anual} : Quilometragem total percorrida por ano;
- $Saving_{CO_2/km}$: Economia de CO₂ por quilômetro rodado (em toneladas);
- $SavingCO_2_{\text{anual}}$: Economia anual total de CO₂ (em toneladas).

3.3.2 Usina fotovoltaica integrada - Estimativa de custos

Neste trabalho, adota-se um custo estimado do MWp para atribuir um valor financeiro a uma usina fotovoltaica ideal, cuja função seria compensar o consumo energético relacionado à recarga dos ônibus elétricos nos terminais em estudo. Em alguns terminais de recarga mais modernos, plataformas de gestão energética já estão disponíveis, permitindo o monitoramento contínuo do consumo associado às recargas.

Para os terminais que disponibilizaram esses dados, propõe-se a seguinte metodologia para estimativa da potência da usina necessária:

Será obtido o um valor mensal de consumo em Kwh do terminal com base em seu consumo reportado via relatório dividido pelo intervalo de meses do relatório. Em seguida vamos usar este dados no cálculo do tamanho da usina por meio da fórmula 4.12.

$$C_{\text{mensal}} = \frac{E_{\text{total}}}{T} \quad (3.14)$$

$$P_{\text{usina mwp}} = \frac{C_{\text{mensal}}}{\eta \cdot HSP \cdot 1000} \quad (3.15)$$

- E_{total} : Consumo total de energia elétrica no período considerado, em kWh;
- T : Número de meses no período analisado;
- $P_{\text{usina mwp}}$: Potência da usina em MWp mensal.

Para os terminais que não possuem os dados de relatório do monitoramento das recargas, vamos seguir a metodologia abaixo, onde vamos estimar uma usina capaz de carregar todos os ônibus da frota no caso se suas baterias estivessem com o Δ SOC de 80%.

$$P_{\text{usina}} = \frac{N_{\text{ônibus}} \cdot E_{\text{bat}} \cdot \Delta SOC}{\eta \cdot HSP \cdot 1000} \quad (3.16)$$

- P_{usina} – Potência da usina solar necessária (kWp);
- $N_{\text{ônibus}}$ – Número de ônibus elétricos;
- ΔSOC - Porcentagem de bateria carregada real do veículo (ex:80%);
- E_{bat} – Capacidade da bateria de cada ônibus (kWh);
- η – Eficiência global do sistema (ex: 0,85);
- HSP – Horas de Sol Pleno diárias na localidade (ex: 4,5 h/dia).

Para os terminais que possuem usina fotovoltaica instalada, podemos calcular o quanto da energia consumida pelo terminal é compensada.

$$E_{\text{usada}} = \frac{C_{\text{usina}}}{C_{\text{terminal}}} \quad (3.17)$$

- E_{usada} : Percentual da energia do terminal compensada pela geração da usina solar.
- C_{usina} : Capacidade de geração mensal da usina solar (kWh/mês).
- C_{terminal} : Consumo mensal de energia elétrica do terminal (kWh/mês).

Para as horas de sol pleno vamos usar a tabela 17, estes dados que foram extraídos de: (Time and Date AS, 2024b), (Time and Date AS, 2024a) e (Climate-Data.org, 2024).

Tabela 17 – Estimativa média anual de horas de sol pleno

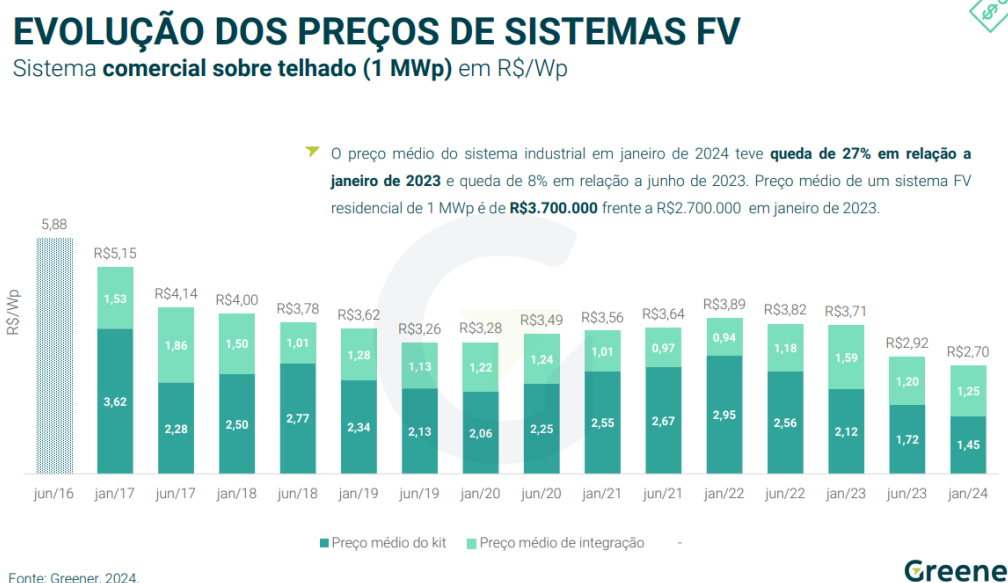
Cidade	Horas/ano	Média diária (h)
São José (SC)	~2.107	~5,8
Salvador (BA)	~3.095	~8,5
Cascavel (PR)	~3.055	~8,4

Fonte: Time and Date AS 2024b, Time and Date AS 2024a, Climate-Data.org 2024.

A análise será conduzida em duas etapas principais:

1. Exibir os dados de recarga de cinco meses do ano de 2025, fornecidos pela autarquia responsável. A partir desses dados, será calculada a média de consumo mensal, permitindo a estimativa do consumo energético anual. Essa estimativa servirá como base para o dimensionamento da usina fotovoltaica.
2. Com base nas informações do relatório *Estudo Estratégico de Geração Distribuída – Brasil em 2024*, publicado por (GREENER, 2024), temos um custo do Wp de R\$2,70. Logo podemos implicar que o custo do MWp instalado é de aproximadamente 2,7 milhões de reais.

Figura 27 – Custo do MWp instalado no Brasil em 2024



Fonte: GREENER, 2024.

Para ter um dado mais prático da eficiência das usinas (η) foi realizada uma análise de mercado baseada nos catálogos de cinco dos maiores fabricantes de painéis solares do mundo:

(LONGI SOLAR, 2024), (JINKOSOLAR, 2024), (JA SOLAR, 2024), (Trina Solar, 2024), (Canadian Solar, 2024). A Tabela 18 apresenta um comparativo entre os principais modelos, destacando a tecnologia, eficiência e potência máxima de saída.

Tabela 18 – Comparativo de painéis fotovoltaicos – líderes de mercado.

Fabricante	Modelo	Tipo de Composição	Eficiência (%)	Potência Máx. (Wp)
LONGi Solar	Hi-MO X10 LR7-72HVH	Monocristalino N-type BC (Back Contact)	até 24,8	630–670
JinkoSolar	Tiger Neo 78HL4-BDV	Monocristalino N-type TOPCon bifacial	22,36–23,25	625–650
JA Solar	JAM78D40-MB	Monocristalino N-type SMBB bifacial	até 23,3	625–650
Trina Solar	TSM-NEG21C.20	Monocristalino N-type TOPCon bifacial vidro duplo	até 23,3	695–720
Canadian Solar	TOPBiHiKu7 CS7N	Monocristalino N-type TOPCon bifacial vidro duplo	até 23,2	690–720

Fonte: Adaptado de catálogo dos fabricantes, 2025.

Com base nesses dados, adotou-se uma eficiência média representativa dos principais painéis disponíveis no mercado. Para isso, foi calculada a média ponderada das eficiências, considerando o limite superior de cada modelo apresentado na Tabela 18.

A fórmula utilizada para o cálculo da média ponderada é dada por:

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.18)$$

onde η_i representa a eficiência do painel i , P_i a respectiva potência máxima e n o número total de modelos considerados.

Substituindo os valores da Tabela 18:

$$\bar{\eta} = \frac{(24,8 \cdot 670) + (23,25 \cdot 650) + (23,3 \cdot 650) + (23,3 \cdot 720) + (23,2 \cdot 720)}{670 + 650 + 650 + 720 + 720} \quad (3.19)$$

$$\bar{\eta} = \frac{16616 + 15112,5 + 15145 + 16776 + 16704}{3410} = \frac{80353,5}{3410} \approx \mathbf{23,56\%} \quad (3.20)$$

Portanto, será considerada neste trabalho uma eficiência média de **23,56%** para os sistemas fotovoltaicos estimados.

3.3.3 Créditos de carbono

O impacto dos créditos de carbono será considerado na avaliação do grau de sustentabilidade de cada eletroterminal. A estimativa desse custo será realizada com base no relatório técnico da empresa Systemica, organização de atuação global que publica trimestralmente análises sobre o mercado voluntário de carbono, utilizando dados consolidados de diversas empresas multinacionais. Os valores de referência utilizados podem ser visualizados na Figura 28.

A 28 apresenta os valores médios de comercialização de créditos de carbono, classificados segundo diferentes níveis de confiabilidade dos dados de emissões evitadas, denominados *tiers*.

Essa classificação visa qualificar a robustez metodológica e a transparência dos dados utilizados na quantificação das reduções de emissões.

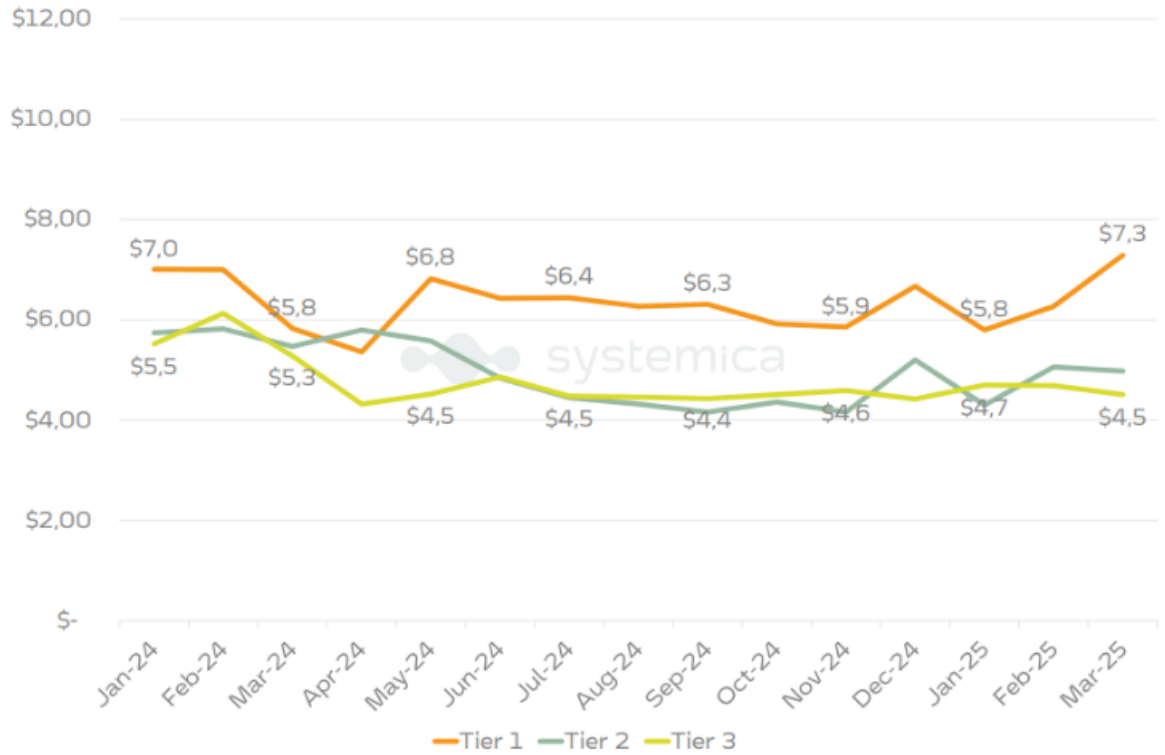
O *tier 1* refere-se a informações de alta confiabilidade, amplamente verificadas por terceiros e frequentemente disponibilizadas por fontes oficiais ou plataformas públicas, com metodologias consolidadas e auditadas. O *tier 2* abrange dados provenientes de fontes reconhecidas e metodologicamente válidas, porém com menor grau de transparência ou com restrições de acesso público, embora ainda mantenham um nível razoável de verificação. Por fim, o *tier 3* contempla dados de baixa confiabilidade, muitas vezes baseados em declarações não verificadas ou em metodologias com fragilidades técnicas e ausência de auditoria independente.

Para os fins deste estudo, adota-se como referência o valor médio de créditos de carbono correspondente ao *tier 2*, tendo em vista que nem todos os terminais analisados disponibilizam seus dados operacionais de forma pública e contínua. Os dados utilizados foram majoritariamente obtidos por meio de acesso direto a plataformas internas de gestão energética e por meio de comunicação técnica com os responsáveis operacionais dos respectivos terminais. Dada a natureza controlada, porém não inteiramente pública dessas fontes, considera-se que os dados empregados neste trabalho se enquadram adequadamente no escopo do *tier 2*.

Dessa forma, adota-se como valor de referência para o crédito de carbono a cotação média observada em março de 2025, equivalente a US\$7,30 por tonelada de CO₂, conforme apresentado na 28. Considerando a taxa de câmbio vigente no mesmo período (R\$5,88 por dólar), o valor correspondente por tonelada de CO₂ convertida em moeda nacional é de R\$42,92.

Figura 28 – Custo de referência dos créditos de carbono no mercado voluntário

Average carbon credit price by integrity tier for all project types and vintages (USD /tCO2e)



Fonte: SYSTEMICA DIGITAL, 2025.

$$Crditos_{carbono} = Vcr_{reais} \cdot Em\ anual_{CO_2} \tag{3.21}$$

- $Crditos_{carbono}$: Valor total dos créditos de carbono obtidos (em reais).
- Vcr_{reais} : Valor monetário por tonelada de CO₂ (preço do crédito de carbono, em reais/tonelada).
- $Em\ anual_{CO_2}$: Total anual de redução ou economia de emissão de CO₂ (em toneladas por ano).

No contexto de usinas fotovoltaicas, é possível determinar os créditos de carbono gerados por meio da equação 3.23. Contudo, antes disso, é necessário estimar a geração anual de energia da usina, que pode ser calculada pela expressão:

$$E_{anual} = P_{usina} \cdot 12 \tag{3.22}$$

Onde:

- E_{anual} : Energia elétrica gerada no período anual (em MWh);
- P_{usina} : Energia elétrica gerada no período mensal (em MWh);
- $Fator12$: Número de meses do ano.

A partir da estimativa da geração anual, calcula-se a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) evitada pela usina fotovoltaica utilizando a seguinte equação:

$$\text{CO}_2^{\text{evitado}} = E_{\text{anual}} \times EF_{\text{grid}} \quad (3.23)$$

Em que:

- E_{anual} : Energia elétrica gerada pela usina solar no período considerado (em MWh);
- EF_{grid} : Fator de emissão médio da matriz elétrica local, expresso em toneladas de CO_2 por megawatt-hora (tCO_2/MWh).

Ressalta-se que o fator de emissão utilizado deve ser específico para a matriz energética da região onde a usina está localizada. A seguir, estimamos esse valor para cada unidade federativa selecionada.

Os dados apresentados foram obtidos com base no Balanço Energético Nacional de 2024 (Ministério de Minas e Energia, 2024) e no Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações em 2022 (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), 2025).

Tabela 19 – Geração elétrica por estado brasileiro (GWh) — 2015 a 2023

Estado	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Média
São Paulo (SP)	62.654	73.460	72.576	66.495	68.718	68.607	57.659	59.887	75.589	67.294
Paraná (PR)	99.410	109.880	96.817	93.737	81.733	66.728	69.590	85.962	96.448	88.923
Bahia (BA)	22.285	21.279	21.827	25.911	32.342	37.867	40.490	50.368	54.197	34.063

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2024.

Tabela 20 – Emissões de CO_2 por estado brasileiro (GgCO_2) — Inventário de 2022

Estado	Total de Emissões (GgCO_2)	% do Setor de Energia	Emissão Efetiva (GgCO_2)
São Paulo (SP)	96.631,3	59%	57.012,47
Paraná (PR)	24.519,1	40%	9.807,64
Bahia (BA)	39.802,2	34%	13.532,75

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), 2025.

Com base nos dados acima, os fatores de emissão por estado foram calculados por meio da Equação 3.24, sendo os resultados apresentados na Tabela 21.

$$\text{Fator de Emissão (tCO}_2\text{/MWh)} = \frac{\text{Emissão do Setor de Energia (GgCO}_2\text{)} \times 10^6}{\text{Consumo de Energia Elétrica (kWh)} \div 10^3} \quad (3.24)$$

- **Fator de Emissão (gCO₂/kWh):** quantidade de dióxido de carbono emitida por unidade de energia elétrica consumida. É o resultado da razão entre a emissão efetiva de CO₂ do setor de energia e o consumo de energia elétrica no estado.
- **Emissão do Setor de Energia (GgCO₂):** total de emissões de dióxido de carbono atribuídas ao setor de energia no estado, em gigagramas (1 Gg = 10⁹ g).
- **Consumo de Energia Elétrica (kWh):** quantidade total de energia elétrica consumida no estado, em kilowatt-hora.
- **Fator 10⁶:** converte a unidade de Gg (gigagramas) para gramas, compatibilizando com o denominador em kWh.

Os fatores de emissão estimados estão dispostos na Tabela 21, com base nas referências supracitadas.

Tabela 21 – Estimativa dos fatores de emissão da matriz elétrica por estado

Estado	Fator de Emissão (tCO ₂ /MWh)
São Paulo (SP)	0,85
Paraná (PR)	0,11
Bahia (BA)	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Ministério de Minas e Energia, 2024) e (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), 2025).

3.4 Método de avaliação do custo benefício

A análise de custo-benefício tem como objetivo consolidar os aspectos abordados nas Seções 3.2 e 3.3, comparando-os com os custos previamente apresentados na Tabela 10.

O terminal possui outros elementos e alguns desses itens não são o foco principal deste estudo. Portanto, serão adotados valores médios estimados para o cálculo de seus custos em cada um dos terminais com base na 22. Esses valores foram obtidos a partir de orçamentos realizados com empresas do setor no mês de junho de 2025. Os resultados são apresentados de forma comparativa entre os terminais, conforme mostrado na 44.

Tabela 22 – Base de custos para elementos periféricos do terminal

Item	Base de Custo
Software de gestão	R\$ 4.000,00 (ativação) + R\$ 60,00/mês por carregador
Infraestrutura de rede + Sistema de CFTV	R\$ 150,00 por metro
Serviço de manutenção e peças de reposição	R\$ 60.000,00 por ano

Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

Dessa forma, a tabela a seguir atribui pesos específicos a cada funcionalidade considerada relevante. A partir desses pesos, é possível estimar o custo relativo de cada item em relação ao custo total do terminal. Com isso, obtém-se um indicador de custo-benefício, no qual o terminal com o menor custo por funcionalidade apresenta, proporcionalmente, a melhor eficiência econômica.

Tabela 23 – Resumo dos Custos por Terminal

Item	São José	Salvador	Cascavel
Custo infraelétrica terminal + carregadores (R\$ milhões)			
Número de carregadores			
Custo ônibus (R\$ milhões)			
Número de ônibus			
Custo usina fotovoltaica (R\$ milhões)			
Infra de rede + Software de gestão			
Serviço de manutenção + peças de reposição			
Total Estimado (R\$ milhões)			

Fonte: Criado pelo autor.

Esta é a equação que quantificará o custo por funcionalidade:

$$\text{Func}_{\text{total}} = (1 \cdot N_{\text{bus},1}) + (2 \cdot N_{\text{bus},2}) + (1 \cdot N_{\text{carregadores}}) + (1 \cdot N_{\text{software}}) + (1 \cdot N_{\text{manutencao}}) \quad (3.25)$$

$$\text{Índice}_{\text{custo-benefício}} = \frac{\text{Custo}_{\text{total}}}{\text{Func}_{\text{total}}} \quad (3.26)$$

3.5 Pontuação, Consolidação e Critérios de Avaliação Final

Para a análise comparativa entre os eletroterminais estudados, adotou-se uma abordagem baseada em *Scoring*, conforme apresentado na Seção 2.5 da fundamentação teórica. Os critérios foram organizados em três classes principais — robustez operacional, impacto ambiental e custo-benefício — e ponderados de acordo com sua relevância no contexto da transição energética assim como a metodologia aplicada na obtenção dos resultados.

A atribuição dos pesos foi realizada de forma a priorizar os aspectos ambientais, dada sua influência direta sobre a sustentabilidade urbana, a saúde pública e a mitigação das mudanças

climáticas, que constituem os principais objetivos da eletrificação do transporte público. Em segundo plano, considerou-se a robustez operacional, essencial para assegurar a continuidade e a eficiência do serviço prestado à população. Por fim, o critério de custo-benefício foi incluído para refletir o impacto econômico das soluções adotadas, com foco na viabilidade orçamentária e na eficiência do investimento público.

A atribuição das notas segue critérios distintos conforme a natureza dos parâmetros avaliados. Para os indicadores quantitativos obtidos por meio de cálculos específicos — como percentual de utilização, emissões evitadas, consumo energético e créditos de carbono — a pontuação é determinada por uma análise comparativa entre os três terminais. O terminal com melhor desempenho em cada critério recebe a pontuação máxima, o segundo melhor recebe uma pontuação intermediária e o de menor desempenho recebe nota zero.

Para os critérios qualitativos relacionados a boas práticas operacionais e de projeto — como o layout das vagas de recarga, capacidade de carga simultânea e presença de redundância elétrica — adota-se uma abordagem binária de avaliação. Nestes casos, os terminais que apresentam a funcionalidade de forma plena recebem a pontuação máxima; os que a implementam de forma parcial recebem metade da pontuação; e os que não a apresentam recebem nota zero.

Por fim, a avaliação do custo-benefício é realizada a partir da relação entre o custo total do terminal e o número total de funcionalidades efetivamente implementadas, conforme metodologia descrita anteriormente. Com base nessa análise comparativa, o terminal com melhor desempenho econômico (menor custo por funcionalidade) recebe a nota máxima, o segundo melhor recebe nota intermediária e o terceiro não pontua neste critério.

Tabela 24 – Avaliação e pesos dos critérios por terminal

Classe	Parâmetros	Peso	São José	Salvador	Cascavel
Operacional	% Utilização	6,00%			
	Carga oportunista	6,00%			
	Layout das vagas	6,00%			
	Carga simultânea	6,00%			
	Redundância elétrica	6,00%			
Ambiental	Emissões evitadas	15,00%			
	Gasto de energia	15,00%			
	Créditos de carbono	15,00%			
Custo	Índice custo-benefício	25,00%			

Fonte: Criado pelo autor.

3.6 Eletroterminais já implantados no Brasil - Visão Geral

3.6.1 Eletroterminal de São José dos Campos - São Paulo

Nos últimos três anos, o Brasil tem avançado de maneira significativa no setor de eletromobilidade, o qual apresenta tendência de crescimento contínuo. Nesse contexto, destaca-se o

município de São José dos Campos como pioneiro na implantação de um eletroterminal voltado à recarga de ônibus 100% elétricos. Conforme descrito por (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2022), o referido terminal conta com seis estações de recarga de 200 kW, cada uma equipada com dois conectores do tipo CCS2, possibilitando o atendimento simultâneo a até doze veículos articulados elétricos.

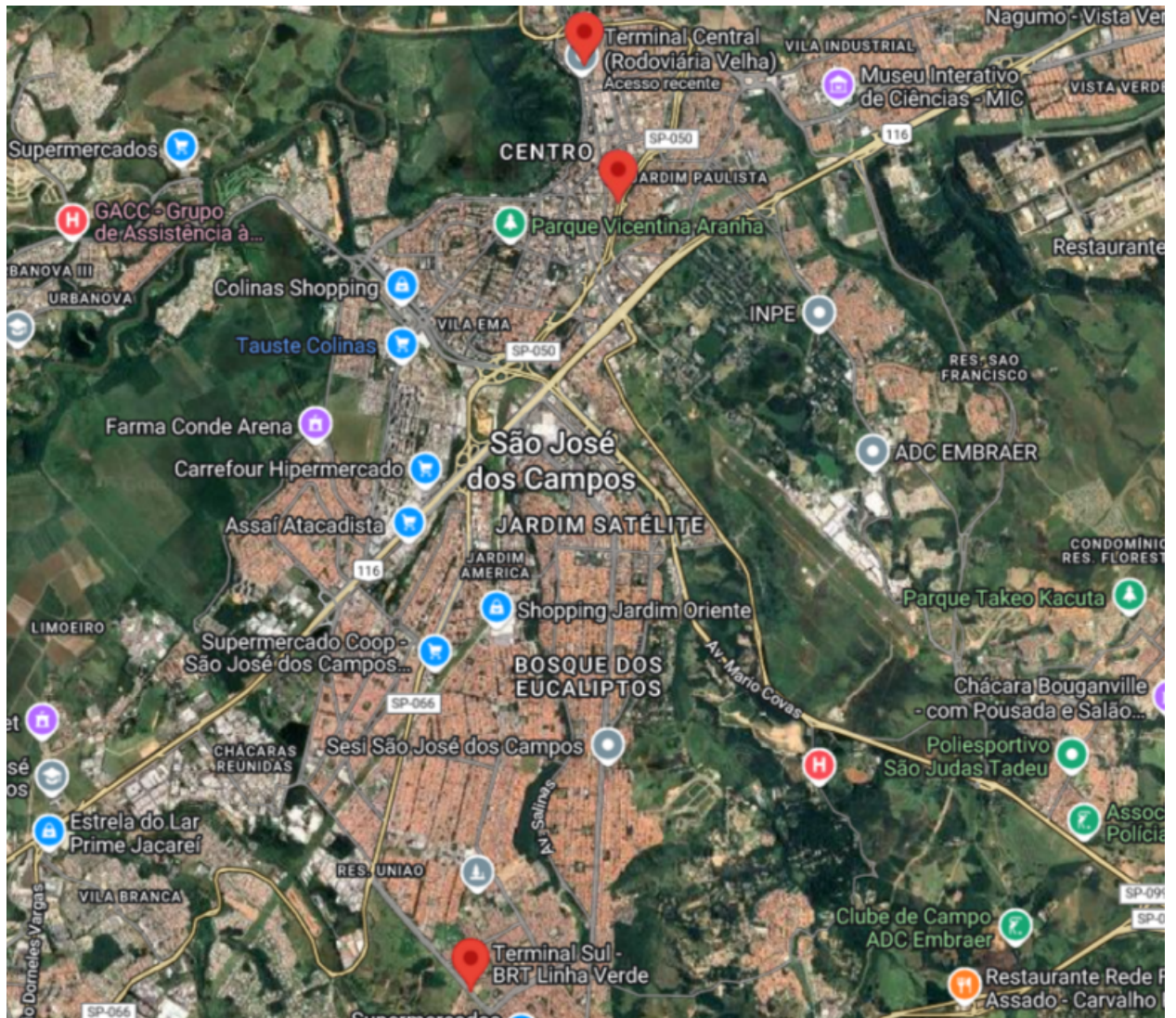
Tabela 25 – Infraestrutura do Eletroterminal de São José dos Campos

Item	Qtd	Observações
Ônibus	12	Veículos articulados com baterias de 553 kWh e autonomia de até 250 km
Carregadores do terminal principal	6	Potência individual de 200 kW, cada um com dois conectores CCS2
Carregadores de oportunidade	0	Não há estações de recarga de oportunidade
Capacidade de recarga simultânea	3	Possibilidade de recarga simultânea de até três ônibus, com tempo estimado de 3 horas
Subestação elétrica	1	Capacidade instalada de 1,5 MW, apenas 1 transformador

Fonte: DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2022.

No que tange à operação do sistema, o eletroterminal é utilizado em rotas que conectam o terminal à rodoviária municipal (localizada na Rua Itororó, 221 - Vila Piratininga, São José dos Campos - SP, CEP 12216-440) e ao centro da cidade. A Figura 29 ilustra a localização do terminal e os principais trajetos atendidos. Segundo relatos de motoristas atuantes na operação, a distância média percorrida em cada rota é da ordem de 25 km.

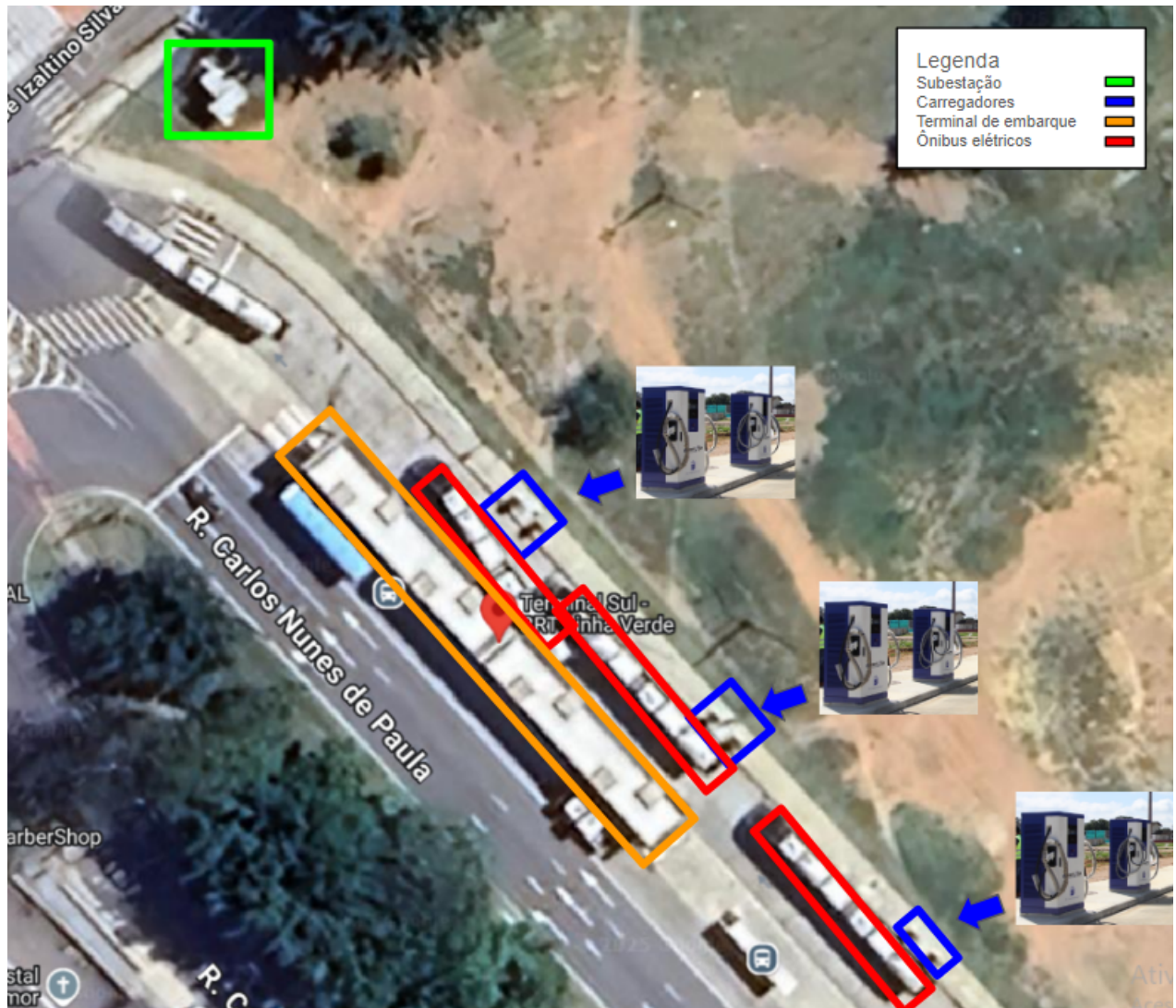
Figura 29 – Localização do terminal e suas rotas principais - São José dos Campos



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Sob a perspectiva da infraestrutura elétrica, observa-se que o terminal (Figura 30) é alimentado por uma única subestação, equipada com apenas um transformador, o qual é responsável por suprir toda a demanda energética da instalação. Tal configuração representa um ponto crítico do sistema, uma vez que não há redundância operacional: a eventual necessidade de manutenção do equipamento implica na paralisação integral das atividades. Ademais, a subestação não dispõe de seccionadoras de reserva, estando equipada com exatamente seis seccionadoras — uma para cada carregador.

Figura 30 – Vista superior do terminal



Adaptado de: Google Maps,2025.

No que diz respeito ao gerenciamento energético, observa-se que, à época da licitação e implantação do projeto, a Prefeitura Municipal de São José dos Campos não previu a implementação de uma plataforma de gestão de recargas. Essa ausência limita o monitoramento preciso do consumo elétrico e dificulta a tomada de decisões operacionais baseadas em dados.

Ainda assim, foram realizadas entrevistas com operadores e acompanhada a operação do terminal em loco ao longo de algumas semanas. Verificou-se que o tempo médio disponível para recargas é de aproximadamente 6 horas, distribuídas majoritariamente no período noturno, entre meia-noite e 5 horas da manhã. Há ainda um intervalo adicional de recarga durante o horário de almoço, que varia conforme a rota, podendo ocorrer entre 12h e 13h ou entre 13h e 14h.

Figura 31 – Estações de recarga de 200 kW com duas saídas CCS2



Fonte: DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2022.

A Tabela 26 apresenta os demais elementos e serviços complementares associados ao eletroterminal, os quais contribuem para a operação e manutenção da infraestrutura. Estes dados são retirados do acompanhamento diário do terminal e da sua operação, este é o cenário até Julho de 2025.

Tabela 26 – Escopo de serviços complementares do terminal - São José dos Campos

Item	Observações
Plataforma de gestão de recargas	Não
Usina fotovoltaica integrada	Não
Serviço de manutenção preventiva e corretiva	Sim
Serviço de internet para o terminal	Não

Fonte: Criado pelo autor.

3.6.2 Eletroterminal de Salvador - Bahia

O segundo eletroterminal público de recarga instalado no Brasil foi implantado na cidade de Salvador, na Bahia. Conforme descrito em (WRI BRASIL, 2023), o terminal conta com 10 estações de recarga de 160 kW, cada uma equipada com dois conectores do tipo CCS2, destinadas ao abastecimento de 20 ônibus elétricos articulados.

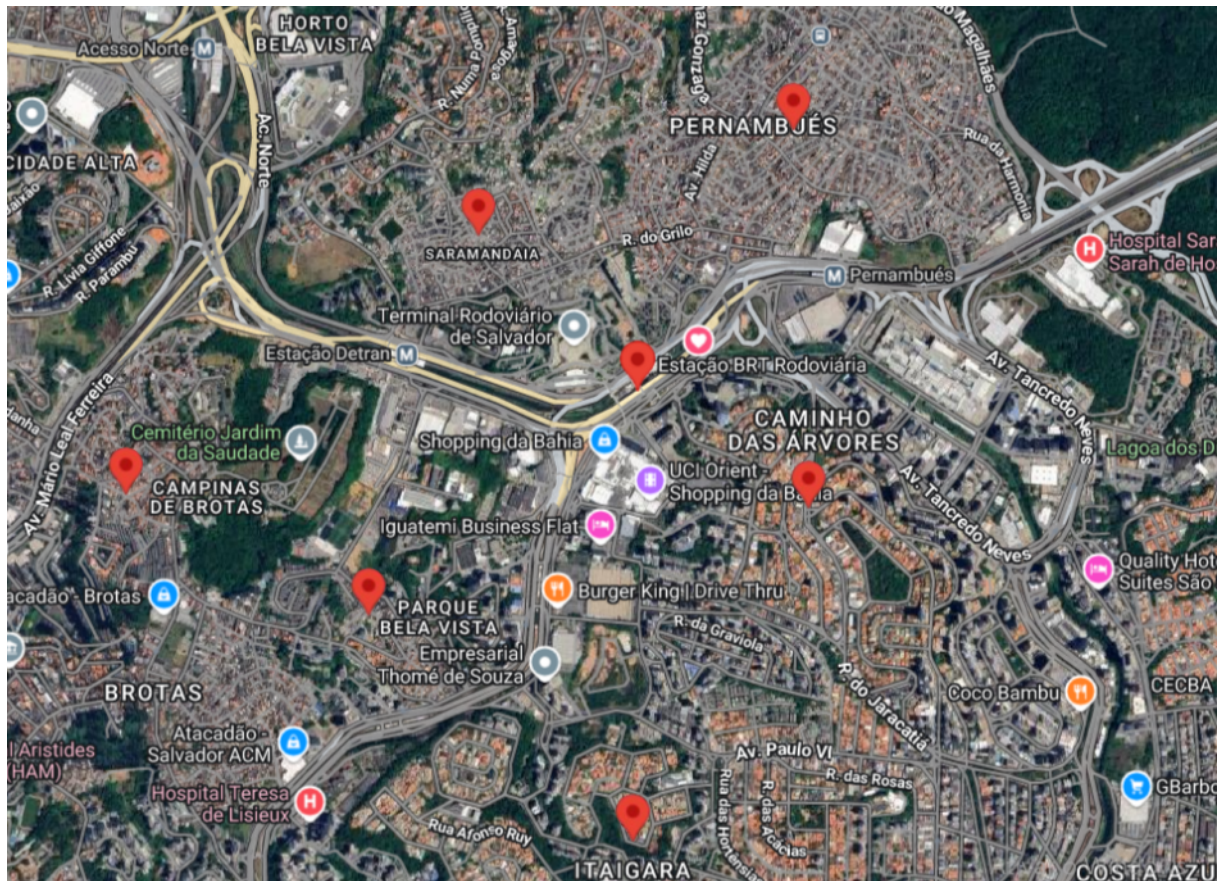
Tabela 27 – Infraestrutura do Eletroterminal de Salvador

Item	Qtd	Observações
Ônibus	20	Veículos do tipo padrão, com baterias de 300 kWh e autonomia aproximada de 220 km
Carregadores do terminal principal	10	Potência de 160 kW por unidade, cada uma com dois conectores CCS2
Carregadores de oportunidade	0	Não há estações de recarga de oportunidade
Capacidade de carga simultânea	20	Possibilidade de recarregar os 20 ônibus simultaneamente, com tempo médio de 3 horas
Subestação	1	Potência instalada de 2,0 MW, com apenas um transformador

Fonte: WRI BRASIL, 2023.

O eletroterminal de Salvador é centralizado e atende a rotas com extensões entre 10 km e 20 km, abrangendo bairros próximos ao terminal, conforme ilustra a Figura 32.

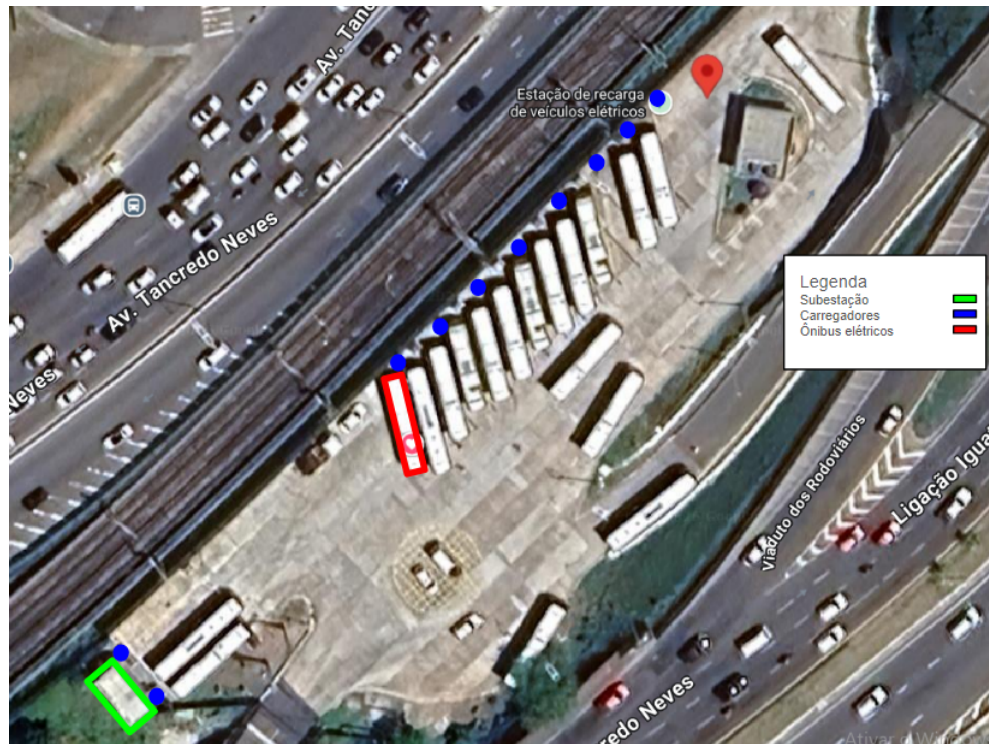
Figura 32 – Localização do terminal e suas rotas principais — Salvador



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Assim como observado no terminal de São José dos Campos, a infraestrutura elétrica de Salvador também opera com um único transformador. A cabine de distribuição possui dez saídas, cada uma com seccionadora individual para alimentar uma estação de recarga de 160 kW, conforme mostrado na Figura 33. Dessa forma, em casos de manutenção preventiva ou corretiva, é necessária a interrupção completa da operação.

Figura 33 – Vista superior do terminal — Salvador



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Para este projeto, a prefeitura contemplou a implementação de uma plataforma de gestão energética. A partir de relatórios extraídos junto aos operadores locais, foi possível obter os dados apresentados na Figura 34. Conforme esses registros, no período de cinco meses de operação (janeiro a maio de 2025), foram consumidos aproximadamente 45.764 kWh de energia elétrica, em um total de 1.286 horas, 53 minutos e 15 segundos de recarga.

Figura 34 – Relatório de recargas (jan–mai/2025) — Terminal de Salvador

Relatório de Consumo

Relatório Unificado

01/01/2025 - 30/05/2025

Dados de Operação Totalizados

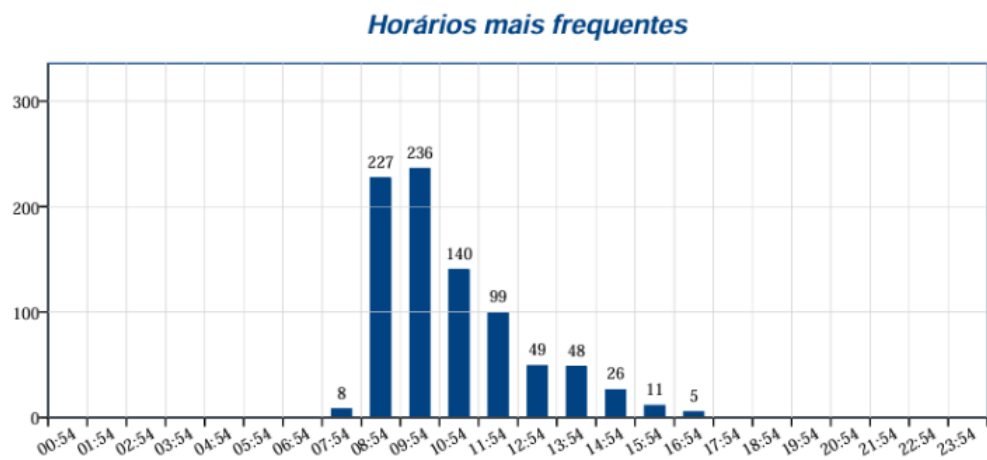
Quantidade de Recargas: **849**

Tempo Total: **1286:53:15**

Consumo Total: **45.764,72 kWh**

Custo Total: **R\$ 0,00**

Receita Total: **R\$ 0,00**



Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

Os dados da Figura 34 revelam que cerca de 71% das recargas iniciam entre 8h e 11h da manhã. Considerando uma operação contínua ao longo dos 150 dias do período analisado, é possível estimar uma média diária de recarga de aproximadamente 8 horas, 34 minutos e 45 segundos.

Com base nas informações da Figura 34, também é possível estimar a quilometragem mensal média percorrida por ônibus. Com baterias de 220 kWh e consumo energético médio de 1,1 kWh/km, conclui-se que cada veículo percorreu cerca de 416 km/mês durante o período.

A Tabela 28 apresenta os serviços e estruturas complementares disponíveis no terminal de Salvador, os quais contribuem para a operação e suporte técnico da instalação.

Tabela 28 – Serviços complementares do eletroterminal — Salvador

Item	Observações
Plataforma de gestão de recargas	Sim
Usina fotovoltaica integrada	Não
Serviço de manutenção preventiva e corretiva	Não
Serviço de internet para o terminal	Sim

Fonte: Criado pelo autor.

3.6.3 Eletroterminal de Cascavel - Paraná

O eletroterminal de Cascavel é o mais recente terminal público de recarga instalado no Brasil, tendo sido inaugurado em julho de 2024. A estrutura conta com um terminal principal de recargas (Terminal Oeste), equipado com seis estações de recarga DC de 180 kW, uma estação de 360 kW, além de dois pontos de recarga de oportunidade localizados nos Terminais Leste e Sul, cada um com uma estação de 240 kW. Todas as estações são dotadas de dois conectores CCS2.

Tabela 29 – Infraestrutura do Eletroterminal de Cascavel

Item	Qtd	Observações
Ônibus padrão	13	Equipados com baterias de 385 kWh e autonomia aproximada de 270 km
Ônibus articulados	2	Equipados com baterias de 516 kWh e autonomia aproximada de 270 km
Carregadores no terminal principal	7	Seis unidades de 180 kW e uma de 360 kW, todas com dois conectores CCS2
Carregadores de oportunidade	2	Duas unidades de 240 kW, cada uma com dois conectores CCS2
Capacidade de carga simultânea	14	Capacidade para carregamento simultâneo de até 14 veículos em aproximadamente 3 horas
Subestação	1	2,6 MW, com 8 circuitos alimentando 7 transformadores
Usina fotovoltaica integrada	1	Potência instalada de 3,3 kW, 5 mil placas solares

Fonte: DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2024.

O eletroterminal atende a região metropolitana de Cascavel e é o primeiro no país a incluir pontos de recarga de oportunidade. A localização dos terminais pode ser observada na Figura 35. O terminal principal (Oeste) está localizado na Av. Brasil, 8517 – Bairro Coqueiral, Cascavel/PR, enquanto os terminais Leste e Sul, utilizados exclusivamente para recargas de oportunidade, situam-se respectivamente na R. Rio da Paz, 329 – Nova Cidade, e na R. Maringá, 1862 – Bairro São Cristóvão.

Figura 35 – Localização dos terminais e principais rotas — Cascavel



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Diferentemente dos projetos anteriores, o eletroterminal de Cascavel adotou cubículos com transformadores individualizados (Figura 36). Essa abordagem aumenta a flexibilidade operacional, uma vez que a manutenção de um transformador não compromete a operação integral do terminal. A subestação foi projetada com um circuito adicional, permitindo a futura expansão com a adição de um novo carregador. Atualmente, estão instalados três transformadores de 300 kVA para os carregadores de 180 kW e um transformador de 500 kVA para a unidade de 360 kW, além de um slot disponível para expansão com mais um transformador de 300 kVA.

Figura 36 – Vista superior do terminal — Cascavel



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Assim como em Salvador, o terminal de Cascavel é operado por meio de uma plataforma online de gestão de recargas, permitindo o monitoramento em tempo real. A Figura 37 apresenta os dados de recarga referentes ao período de janeiro a maio de 2025. Nota-se uma distribuição mais variada dos horários de recarga, com destaque para o uso intensivo dos pontos de recarga de oportunidade durante as rotas operacionais.

Figura 37 – Relatório de recargas (jan–mai/2025) — Terminal de Cascavel

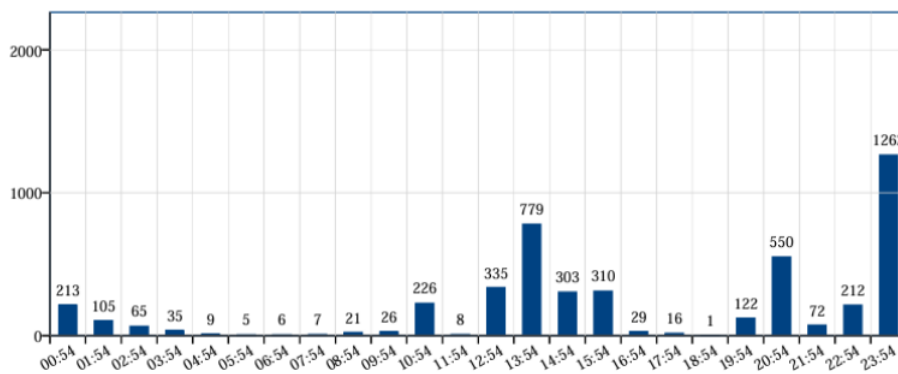
Relatório de Consumo
Relatório Unificado
01/01/2025 - 30/05/2025

Dados de Operação Totalizados

Quantidade de Recargas: **4717**
Tempo Total: **9956:11:01**

Consumo Total: **559.886,19 kWh**
Custo Total: **R\$ 0,00**
Receita Total: **R\$ 0,00**

Horários mais frequentes

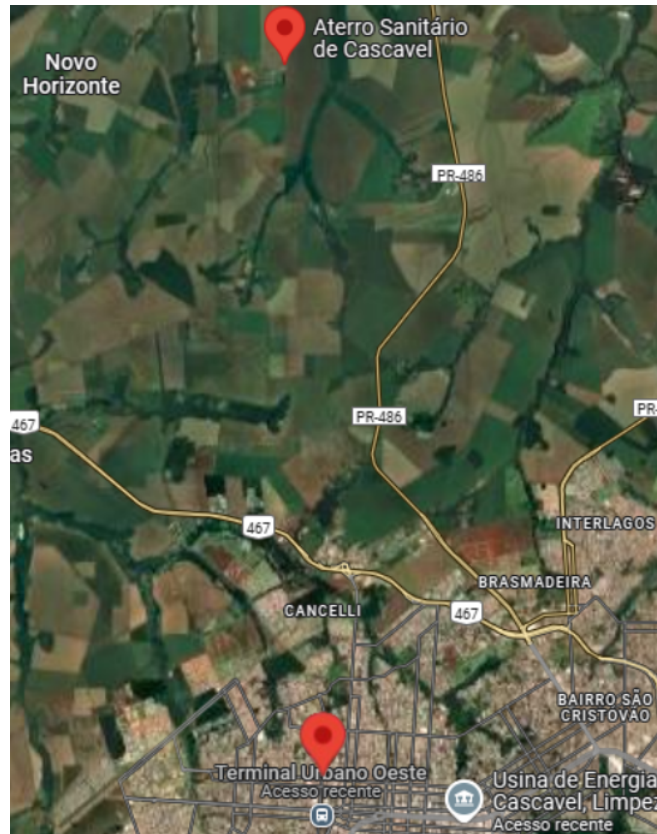


Fonte: PREFEITURA DE CASCAVEL, 2025.

Os dados da Figura 37 indicam que, ao longo do período analisado, ocorreram 4.717 recargas. Aproximadamente 27% delas foram iniciadas durante a madrugada, por volta da meia-noite, enquanto cerca de 41% ocorreram entre 11h e 17h. Com base nessa operação, estima-se que cada ônibus percorra cerca de 5.000 km por mês.

Um dos diferenciais deste terminal é a integração com uma usina fotovoltaica de grande porte, construída sobre o aterro sanitário municipal. De acordo com informações da prefeitura de Cascavel (PREFEITURA DE CASCAVEL, 2024), a usina possui 5.000 painéis solares de alta eficiência, com capacidade instalada de 3.300 kW. A produção mensal estimada é de 437.500 kWh, o que equivale ao consumo de aproximadamente 1.620 residências. O investimento deverá ser amortizado em cerca de cinco anos.

Figura 38 – Usina fotovoltaica de Cascavel



Fonte: PREFEITURA DE CASCAVEL, 2025.

A usina foi implantada sobre uma área de solo anteriormente inutilizável, o aterro sanitário da cidade, o que reforça seu papel sustentável. A Figura 39 mostra sua localização. O aterro ainda está em operação, mas a prefeitura prevê a ampliação da planta fotovoltaica à medida que o local atinja sua capacidade máxima de destinação de resíduos sólidos.

Figura 39 – Usina fotovoltaica de Cascavel sobre o aterro sanitário



Fonte: PREFEITURA DE CASCAVEL, 2025.

A Tabela 30 apresenta os serviços e estruturas complementares disponíveis no eletroterminal de Cascavel, os quais contribuem para a eficiência e confiabilidade da operação.

Tabela 30 – Serviços complementares do eletroterminal — Cascavel

Item	Observações
Sistema de segurança (CFTV)	Sim
Plataforma de gestão de recargas	Sim
Usina fotovoltaica integrada	Sim
Serviço de manutenção preventiva e corretiva	Sim
Serviço de internet para o terminal	Sim

Fonte: Criado pelo autor.

4 RESULTADOS

4.1 Eletroterminais já implantados no Brasil – Análise das infraestruturas

4.1.1 Eletroterminal de São José dos Campos - Robustez operacional

A partir dos dados apresentados na Tabela 31, procedeu-se à avaliação do percentual de utilização do terminal de São José dos Campos:

Tabela 31 – Parâmetros utilizados para o cálculo – Percentual de utilização em São José dos Campos

Parâmetro	Valor	Descrição
N_{bus}	12	Número de ônibus a serem carregados
E_{bat}	590 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus
Δ_{SOC}	80%	Variação média do estado de carga (SOC)
N_{con}	12	Número de conectores do terminal
P_{max}	100 kW	Potência máxima de cada conector
T_{disp}	5 h	Tempo disponível para recarga diária

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

$$PCU_{SJC} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot \Delta_{SOC,i})}{T_{disp} \cdot \sum_{j=1}^m (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$PCU_{SJC} = \frac{N_{bus} \cdot E_{bat} \cdot \Delta_{SOC}}{T_{disp} \cdot N_{con} \cdot P_{max}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$$PCU_{SJC} = \frac{12 \cdot 590kWh \cdot 0,8}{5 \cdot 12 \cdot 100kW} \cdot 100 \approx 94,40\% \quad (4.3)$$

Em relação às recargas de oportunidade, observa-se que o terminal não foi projetado com nenhuma estação dedicada a esse tipo de operação.

Quanto ao layout das vagas de carregamento, conforme apresentado na Figura 40, o terminal não seguiu a boa prática de disposição em “espinha de peixe” com ângulo de 45° (Figura 23). Em vez disso, optou-se por vagas dispostas a 180° (Figura 24). Essa escolha, aliada à instalação inadequada dos carregadores lado a lado e à obstrução da faixa esquerda pela plataforma de embarque de passageiros, limitou a capacidade de carregamento simultâneo a apenas três veículos.

Figura 40 – Problemas de layout no eletroterminal de São José dos Campos



Adaptado de: Google Maps,2025.

A adoção de um layout mais eficiente permitiria a instalação de até 12 vagas para recargas simultâneas, como ilustrado na Figura 41. Neste arranjo, as vagas não seriam afetadas pela presença da plataforma de embarque.

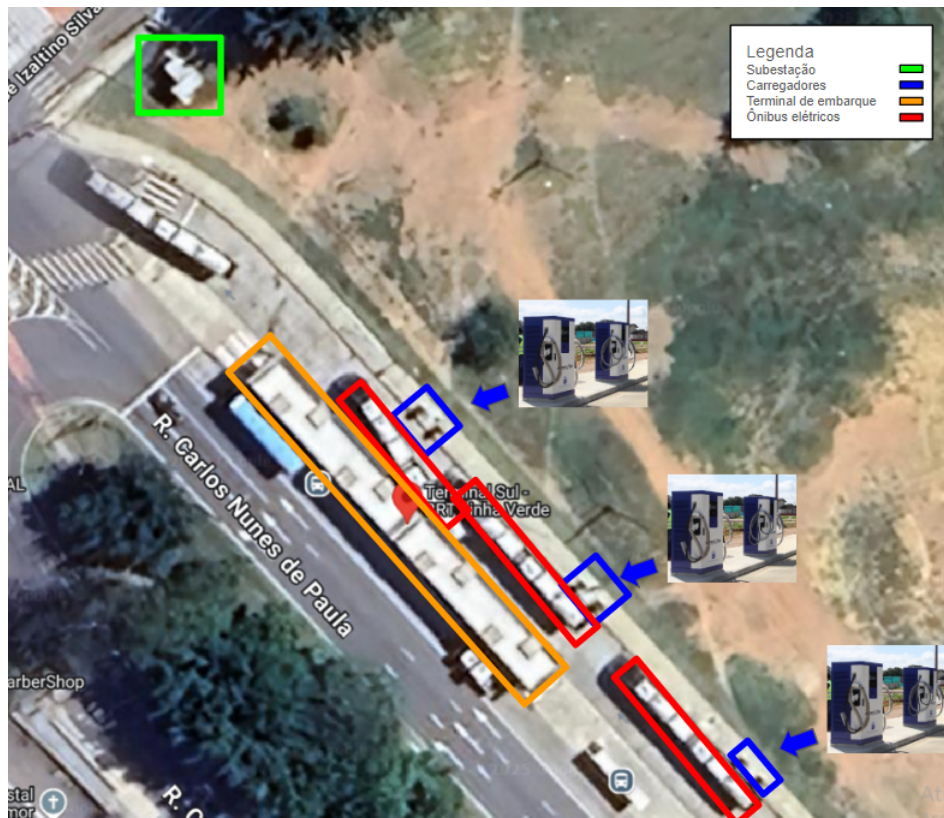
Figura 41 – Layout proposto com correção para o eletroterminal de São José dos Campos



Adaptado de: Google Maps,2025.

No que tange à infraestrutura elétrica, destaca-se que apenas uma subestação é responsável pela alimentação de todo o circuito dos carregadores, conforme ilustrado na Figura 46. Essa configuração elimina qualquer forma de redundância: intervenções para manutenção preventiva ou falhas no transformador podem causar a interrupção total das operações de recarga no terminal. Como mencionado anteriormente, a ausência de pontos de recarga de oportunidade em outros terminais agrava ainda mais esse risco, com impacto direto na operação do sistema.

Figura 42 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de São José dos Campos



Adaptado de: Google Maps, 2025.

4.1.2 Eletroterminal de São José dos Campos - Sustentabilidade

Conforme discutido na Seção 3.3.1, o terminal de São José dos Campos não dispõe de monitoramento da operação de recarga por meio de uma plataforma de gestão. Ressalta-se que os veículos utilizados no município são articulados, motivo pelo qual os dados apresentados na Tabela 16 foram adotados nesta análise. Assim, procede-se à estimativa da redução das emissões de CO₂ proporcionada pela operação com veículos elétricos, utilizando as seguintes expressões:

Tabela 32 – Parâmetros utilizados para o cálculo da redução anual de emissões de CO₂ no eletroterminal de São José dos Campos

Parâmetro	Valor	Descrição
N ^(c)	12	Frota em operação
C ^(c)	1,321 km/L	Eficiência dos ônibus a diesel
EF ^(c)	2,65 kgCO ₂ /L	Emissão por litro de diesel consumido
N ^(e)	12	Ônibus elétricos inseridos
C ^(e)	0,46 km/kWh	Eficiência dos ônibus elétricos
EF ^(e)	0,0385 kgCO ₂ /kWh	Emissão por kWh consumido
Km _{mês}	5000 km/mês	Valor estimado devido à falta de monitoramento das recargas

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

$$\text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i^{(c)} \cdot C_i^{(c)} \cdot EF_i^{(c)} \right) - \sum_{j=1}^m \left(N_j^{(e)} \cdot C_j^{(e)} \cdot EF_j^{(e)} \right) \quad (4.4)$$

$$\text{SJC Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = (N^{(c)} \cdot C^{(c)} \cdot EF^{(c)}) - (N^{(e)} \cdot C^{(e)} \cdot EF^{(e)}) \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{SJC_Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} &= (12 \cdot 1,321 \text{ km/L} \cdot 2,65 \text{ kgCO}_2/\text{L}) \\ &\quad - (12 \cdot 0,46 \text{ km/kWh} \cdot 0,0385 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}) \approx 41,8 \text{ kgCO}_2/\text{km} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\text{Km}_{\text{anual}} = \text{Km}_{\text{mês}} \cdot 12 \quad (4.7)$$

$$\text{SJC Km}_{\text{anual}} = \text{Km}_{\text{mês}} \cdot 12 \quad (4.8)$$

$$\text{SJC Km}_{\text{anual}} = 5000 \cdot 12 = 60000 \text{ km/ano} \quad (4.9)$$

$$\text{SavingCO}_2 \text{ anual} = \text{Km}_{\text{anual}} \cdot \text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} \quad (4.10)$$

$$\text{SJC SavingCO}_2 \text{ anual} = 60000 \text{ km/ano} \cdot 41,80 \text{ kgCO}_2/\text{km} \approx 2,51 \text{ tCO}_2 \quad (4.11)$$

Dessa forma, estima-se que a operação do terminal com veículos elétricos em São José dos Campos proporciona uma redução anual aproximada de **2,51 toneladas de CO₂** quando comparada à operação com veículos convencionais movidos a diesel.

O terminal de São José dos Campos não contempla geração de energia solar fotovoltaica vinculada, entretanto, é possível estimar o dimensionamento da usina necessária para suprir o consumo energético diário do terminal.

Tabela 33 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento da usina solar fotovoltaica

Parâmetro	Valor	Descrição
$N_{\text{ônibus}}$	12	Número de ônibus a serem atendidos
E_{bat}	590 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus
η	23,56%	Eficiência global da usina (incluindo perdas do sistema)
HSP	5,8 h	Horas de Sol Pleno (média diária na região)
ΔSOC	80%	Variação média do estado de carga (SOC)

Fonte: Criado pelo autor,2025.

$$P_{\text{usina}} = \frac{N_{\text{ônibus}} \cdot E_{\text{bat}} \cdot \Delta SOC}{\eta \cdot HSP \cdot 1000} \quad (4.12)$$

$$SJC P_{\text{usina}} = \frac{12 \cdot 590 \cdot \Delta SOC}{0,2356 \cdot 5,8 \cdot 1000} \approx 4,14 \text{ MWp} \quad (4.13)$$

Para suprir o consumo energético dos veículos do terminal, seria necessária a construção de uma usina fotovoltaica com capacidade aproximada de 4,14 MWp.

Agora podemos determinar os créditos de carbono gerados pelo terminal. Como o eletroterminal de São José não possui uma usina implantada, podemos estimar os créditos com as emissões evitadas pela eletrificação da frota de elétricos.

Tabela 34 – Parâmetros utilizados no cálculo dos créditos de carbono

Parâmetro	Valor	Descrição
$V_{cr_{\text{reais}}}$	R\$ 42,92 / tCO ₂	Valor de mercado do crédito de carbono por tonelada de CO ₂ evitada
$SJC SavingCO_2_{\text{anual}}$	2,51 tCO ₂ /ano	Quantidade anual de emissões evitadas de CO ₂ devido à eletrificação da frota

Fonte: Criado pelo autor,2025.

$$Crditos_{\text{carbono}} = V_{cr_{\text{reais}}} \cdot Em_{\text{anual}}_{CO_2} \quad (4.14)$$

$$SJC Crditos_{\text{carbono}} = R\$42,92 / tCO_2 \cdot 2,51 tCO_2 = R\$107,73 \text{ por ano.} \quad (4.15)$$

4.1.3 Eletroterminal de Salvador - Robustez Operacional

Com base nos dados apresentados na Tabela 27, procedeu-se à avaliação do percentual de utilização da infraestrutura de recarga do terminal de Salvador.

Tabela 35 – Parâmetros utilizados para o cálculo - % de utilização Salvador

Parâmetro	Valor	Descrição
N_{bus}	20	Número de ônibus a serem carregados
E_{bat}	300 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus
ΔSOC	80%	Varição média de estado de carga (SOC)
N_{con}	20	Número de conectores por estação
P_{max}	80 kW	Potência máxima de cada conector
T_{total}	1287 h	Tempo total acumulado de recargas no intervalo considerado
$N_{recargas}$	849	Número de recargas no período do relatório da gestão de recargas

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

Assim podemos determinar o percentual de utilização do terminal:

$$PCU = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot \Delta SOC_i)}{\left(\frac{T_{total}}{N_{recargas}} \cdot 2 \right) \cdot \sum_{j=1}^m (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \quad (4.16)$$

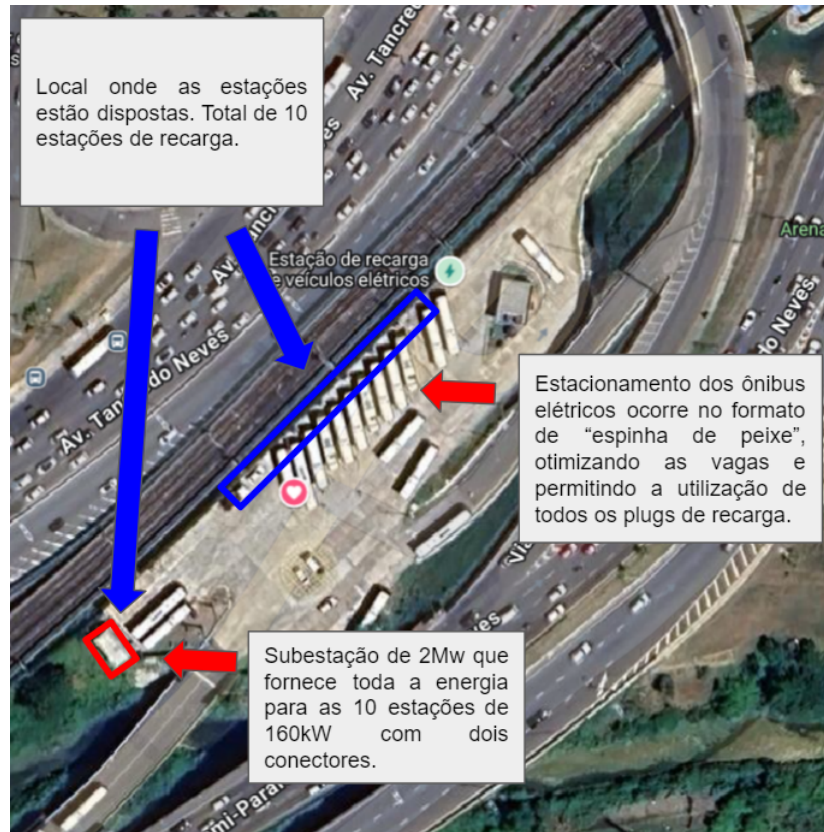
$$PCU_{SAL} = \left(\frac{N_{bus} \cdot E_{bat} \cdot \Delta SOC}{\left(\frac{T_{total}}{N_{recargas}} \cdot 2 \right) \cdot (N_{con} \cdot P_{max})} \right) \cdot 100 \quad (4.17)$$

$$PCU_{SAL} = \left(\frac{20 \cdot 300kWh \cdot 0,8}{\left(\frac{1287}{849} \cdot 2 \right) \cdot (20 \cdot 100kW)} \right) \cdot 100 \approx 98,95\% \quad (4.18)$$

No que se refere às recargas de oportunidade, observa-se que o projeto do terminal de Salvador não contemplou a implantação de pontos específicos para esse tipo de operação. Tal decisão pode ser justificada pelo fato de que, mesmo com a operação atual, o percentual de utilização da infraestrutura permanece significativamente abaixo da capacidade instalada.

Em relação ao layout das vagas de recarga, conforme ilustrado na Figura 43, o terminal adotou uma configuração em espinha de peixe com ângulo de 45°, reconhecida como uma boa prática no setor. Essa disposição garante o acesso simultâneo a todos os conectores disponíveis nas 10 estações de recarga, otimizando a utilização do espaço e a manobrabilidade dos veículos.

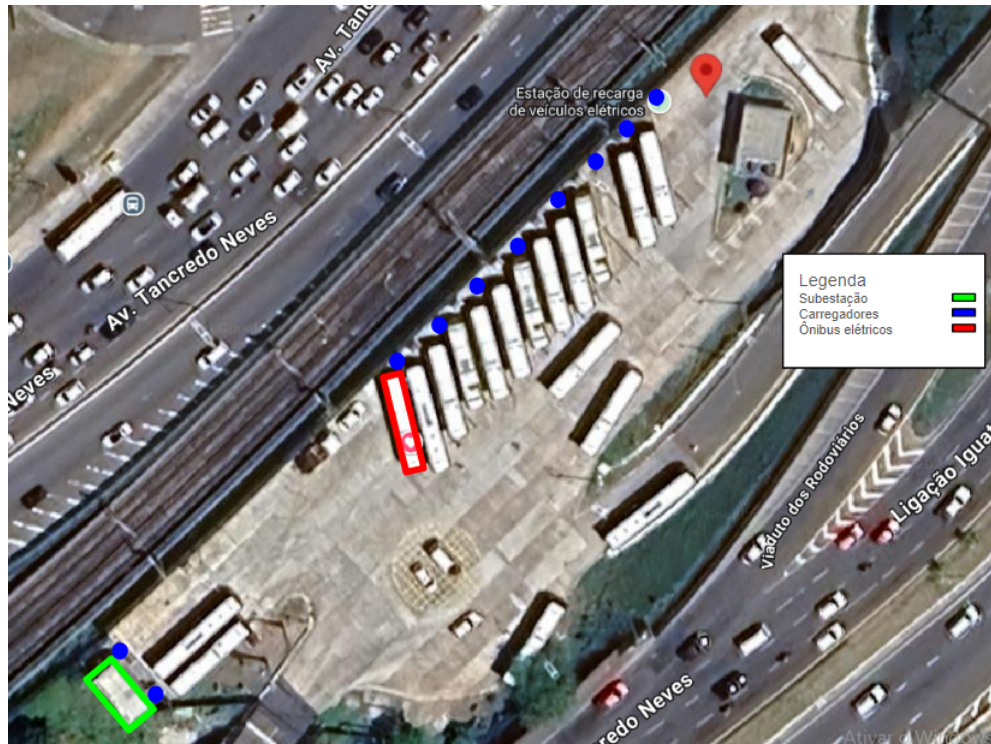
Figura 43 – Layout das vagas de recarga no eletroterminal de Salvador



Adaptado de: Google Maps, 2025.

No aspecto da infraestrutura elétrica, verificou-se que o terminal de Salvador não incorporou boas práticas associadas à redundância e à manutenção preventiva da sua rede elétrica de recarga. A instalação de apenas um único transformador na subestação representa um ponto crítico de vulnerabilidade: qualquer falha ou necessidade de manutenção nesse equipamento interromperá integralmente a operação de recarga da frota.

Figura 44 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de Salvador



Adaptado de: Google Maps, 2025.

4.1.4 Eletroterminal de Salvador - Sustentabilidade

Conforme discutido e exibido na seção de metodologia, o terminal de Salvador possui software de gestão das recargas do terminal, logo o Km médio da frota pode ser determinado de forma mais precisa. Assim temos:

Tabela 36 – Parâmetros utilizados para o cálculo da redução anual de emissões de CO₂ no eletroterminal de São José dos Campos

Parâmetro	Valor	Descrição
N ^(c)	20	Frota em operação
C ^(c)	1,931 km/L	Eficiência dos ônibus a diesel
EF ^(c)	2,65 kgCO ₂ /L	Emissão por litro de diesel consumido
N ^(e)	20	Ônibus elétricos inseridos
C ^(e)	0,90 km/kWh	Eficiência dos ônibus elétricos
EF ^(e)	0,0385 kgCO ₂ /kWh	Emissão por kWh consumido
E _{total}	45764,72 kWh	Energia total consumida pelo terminal no intervalo de 5 meses
T	5 meses	Período em meses do relatório extraído da plataforma de gestão de recargas

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

$$\text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i^{(c)} \cdot C_i^{(c)} \cdot EF_i^{(c)} \right) - \sum_{j=1}^m \left(N_j^{(e)} \cdot C_j^{(e)} \cdot EF_j^{(e)} \right) \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \text{SAL_Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} &= (20 \cdot 1,931 \text{ km/L} \cdot 2,65 \text{ kgCO}_2/\text{L}) \\ &- (20 \cdot 0,90 \text{ km/kWh} \cdot 0,0385 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}) \approx 101,65 \text{ kgCO}_2/\text{km} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$C_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (4.21)$$

$$\text{SAL } C_{\text{médio}} = \frac{N \cdot C}{N} = C = 0,9 \text{ km/kWh} \quad (4.22)$$

$$\text{Km}_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{C_{\text{médio}}} \quad (4.23)$$

$$\text{SAL } \text{Km}_{\text{total}} = \frac{45764,72 \text{ kWh}}{0,9 \text{ km/kWh}} = 50849,69 \text{ km}(5\text{meses}) \quad (4.24)$$

$$\text{Km}_{\text{mês}} = \frac{\text{Km}_{\text{total}}}{T} \quad (4.25)$$

$$\text{SAL } \text{Km}_{\text{mês}} = \frac{50849,69 \text{ km}}{5} = 10169,94 \text{ km/ms} \quad (4.26)$$

$$\text{Km}_{\text{anual}} = 10169,94 \text{ km/mês} \cdot 12 = 122039,25 \text{ km/ano} \quad (4.27)$$

$$\text{SavingCO}_2_{\text{anual}} = \text{Km}_{\text{anual}} \cdot \text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} \quad (4.28)$$

$$\text{SAL } \text{SavingCO}_2_{\text{anual}} = 122039,25 \text{ km/ano} \cdot 101,65 \text{ kgCO}_2/\text{km} = 12,4 \text{ tCO}_2/\text{ano} \quad (4.29)$$

Dessa forma, estima-se que a operação do terminal com veículos elétricos em Salvador proporciona uma redução anual aproximada de **12,4 toneladas de CO₂** quando comparada à operação com veículos convencionais movidos a diesel.

O terminal de Salvador também não contempla geração de energia solar fotovoltaica vinculada, entretanto, é possível estimar o dimensionamento da usina necessária para suprir o consumo energético diário do terminal.

Tabela 37 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento da usina solar fotovoltaica

Parâmetro	Valor	Descrição
$N_{\text{ônibus}}$	20	Número de ônibus a serem atendidos
E_{bat}	300 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus
η	23,56%	Eficiência global da usina (incluindo perdas do sistema)
HSP	8,5 h	Horas de Sol Pleno (média diária na região)
Δ_{SOC}	80%	Varição média do estado de carga (SOC)
C_{mensal}	80%	Consumo do terminal mensal em relação ao total estimado
E_{total}	45.764,72 kWh	Energia total consumida pelo terminal no intervalo de 5 meses
T	5 meses	Período do relatório extraído da plataforma de gestão de recargas

Fonte: Criado pelo autor,2025.

Assim podemos calcular uma usina capaz de compensar toda a energia gasta pelo terminal:

$$SAL C_{\text{mensal}} = \frac{E_{\text{total}}}{T} = \frac{45764,72kWh}{5} = 9152,94 kWh/ms \quad (4.30)$$

$$P_{\text{usina mwp}} = \frac{C_{\text{mensal}}}{\eta \cdot HSP \cdot 1000} \quad (4.31)$$

$$SAL P_{\text{usina mwp}} = \frac{9152,94 kWh}{23,56\% \cdot 8,5 h \cdot 1000} \approx 4,57 MWp \quad (4.32)$$

Para suprir o consumo energético do terminal, seria necessária a construção de uma usina fotovoltaica com capacidade aproximada de 4,57 MWp.

Em seguida, realiza-se o cálculo dos créditos de carbono gerados pela operação do terminal. Para Salvador, tais créditos correspondem exclusivamente às emissões evitadas pelos veículos eletrificados, uma vez que não há geração fotovoltaica integrada.

Tabela 38 – Parâmetros utilizados no cálculo dos créditos de carbono

Parâmetro	Valor	Descrição
Vcr_{reais}	R\$ 42,92 / tCO ₂	Valor de mercado do crédito de carbono por tonelada de CO ₂ evitada
T_{anualCO_2}	12,41 tCO ₂ /ano	Quantidade anual de emissões evitadas de CO ₂ devido à eletrificação da frota

Fonte: Criado pelo autor,2025.

$$Crditos_{\text{carbono}} = Vcr_{\text{reais}} \cdot Em \text{ anual}_{\text{CO}_2} \quad (4.33)$$

$$Crditos_{\text{carbono}} = 42,92 \times 12,41 tCO_2 \approx R\$532,64 /ano \quad (4.34)$$

4.1.5 Eletroterminal de Cascavel - Robustez Operacional

Com base nos dados apresentados na Tabela 29, procedeu-se à avaliação do percentual de utilização da infraestrutura de recarga do terminal de Cascavel.

Tabela 39 – Parâmetros utilizados para o cálculo – % de utilização Cascavel

Parâmetro	Valor	Descrição
N_{bus1}	13	Número de ônibus padrão a serem carregados
N_{bus2}	2	Número de ônibus articulados a serem carregados
E_{bat1}	385 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus padrão
E_{bat2}	564 kWh	Capacidade da bateria de cada ônibus articulado
Δ_{SOC}	80%	Varição média de estado de carga (SOC)
N_{con1}	12	Número de conectores por estação de 180 kW
N_{con2}	2	Número de conectores por estação de 360 kW
P_{max1}	90 kW	Potência máxima de cada conector (180 kW)
P_{max2}	180 kW	Potência máxima de cada conector (360 kW)
T_{total}	9956 h	Tempo total acumulado de recargas (01/01/2025 a 30/05/2025)
$N_{recargas}$	4717	Recargas no período (01/01/2025 a 30/05/2025)

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

$$PCU = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot \Delta_{SOC,i})}{\left(\frac{T_{total}}{N_{recargas}} \cdot 2 \right) \cdot \sum_{j=1}^m (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \quad (4.35)$$

O terminal de Cascavel possui mais de um modelo no terminal, e mais de um modelo de ônibus, aplicando no somatório os valores da tabela 39, teremos:

$$PCU_{CASC} = \left(\frac{\sum_{i=1}^2 (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot 0,8)}{\left(\frac{T_{total}}{N_{recargas}} \cdot 2 \right) \cdot \sum_{j=1}^2 (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \approx 80,71\% \quad (4.36)$$

No que diz respeito às recargas de oportunidade, destaca-se que o projeto do eletroterminal de Cascavel contemplou a instalação de carregadores especificamente destinados a esse tipo de operação. Foram implantadas duas estações de recarga de 240 kW (com potência máxima de 120 kW por conector), estrategicamente posicionadas em terminais distintos da cidade. Essas estações desempenham um papel fundamental no suporte operacional, especialmente no atendimento aos dois modelos de ônibus articulados da frota.

Em relação à configuração das vagas de recarga, conforme ilustrado na Figura 45, o terminal adotou uma disposição em espinha de peixe com ângulo de 45°, reconhecida na literatura como uma boa prática para terminais de transporte coletivo. Tal arranjo proporciona acesso

simultâneo a todos os conectores disponíveis nas sete estações de recarga, otimizando a utilização do espaço físico e favorecendo a manobrabilidade dos veículos.

Figura 45 – Layout das vagas de recarga no eletroterminal de Cascavel



Adaptado de: Google Maps, 2025.

Do ponto de vista elétrico, o layout de Cascavel apresenta uma concepção bastante eficiente e adequada às exigências operacionais. A subestação primária conta com oito saídas equipadas com seccionadoras individuais, sendo que sete delas alimentam as oito estações de recarga do terminal (seis estações de 180 kW e uma estação de 360 kW). Adicionalmente, uma oitava saída permanece disponível, permitindo a futura instalação de um novo cubículo com transformador, o que viabiliza a expansão da infraestrutura com relativa facilidade.

Cada cubículo da subestação abriga um transformador dedicado, sendo que os carregadores de 180 kW são alimentados por transformadores de 300 kVA, enquanto o carregador de 360 kW é suprido por um transformador de 500 kVA. Esta configuração modular confere ao sistema uma elevada flexibilidade operacional e proporciona margem de potência suficiente para a adição de novas cargas no futuro.

Esse sobredimensionamento planejado permitirá expandir a capacidade do eletroterminal futuramente, sem exigir novos investimentos relevantes em infraestrutura de média tensão.

Caso a opção de projeto tivesse sido por uma subestação com transformador único, a capacidade necessária seria da ordem de 2,3 MVA, o que implicaria em maiores custos iniciais e menor flexibilidade operacional.

Ademais, a arquitetura adotada facilita o controle e a execução das atividades de manutenção. Em eventuais casos de falha em algum cubículo, apenas o carregador correspondente é afetado, preservando a operacionalidade do restante da infraestrutura de recarga.

Figura 46 – Layout da infraestrutura elétrica do eletroterminal de Cascavel



Adaptado de: Google Maps,2025.

4.1.6 Eletroterminal de Cascavel - Sustentabilidade

Conforme discutido e exibido na seção de metodologia, o terminal de Salvador possui software de gestão das recargas do terminal, logo o Km médio da frota pode ser determinado de forma mais precisa. Assim temos:

Tabela 40 – Parâmetros utilizados para o cálculo da redução anual de emissões de CO₂ no eletroterminal de Cascavel

Parâmetro	Valor	Descrição
N1 ^(c)	13	Frota em operação
N2 ^(c)	2	Frota em operação
C1 ^(c)	1,931 km/L	Eficiência dos ônibus a diesel
C2 ^(c)	1,321 km/L	Eficiência dos ônibus a diesel
EF1 ^(c)	2,65 kgCO ₂ /L	Emissão por litro de diesel consumido
EF2 ^(c)	2,65 kgCO ₂ /L	Emissão por litro de diesel consumido
N1 ^(e)	13	Ônibus elétricos inseridos
N2 ^(e)	2	Ônibus elétricos inseridos
C1 ^(e)	0,70 km/kWh	Eficiência dos ônibus elétricos
C2 ^(e)	0,48 km/kWh	Eficiência dos ônibus elétricos
EF1 ^(e)	0,0385 kgCO ₂ /kWh	Emissão por kWh consumido
EF2 ^(e)	0,0385 kgCO ₂ /kWh	Emissão por kWh consumido
E _{total}	559886,19 kWh	Energia total consumida pelo terminal no intervalo de 5 meses
T	5 meses	Período em meses do relatório extraído da plataforma de gestão de recargas

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

Com isso podemos calcular com as equações as emissões evitadas anualmente pela frota de elétricos:

$$\text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i^{(c)} \cdot C_i^{(c)} \cdot EF_i^{(c)} \right) - \sum_{j=1}^m \left(N_j^{(e)} \cdot C_j^{(e)} \cdot EF_j^{(e)} \right) \quad (4.37)$$

$$\text{CASC Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = \sum_{i=1}^2 \left(N_i^{(c)} \cdot C_i^{(c)} \cdot EF_i^{(c)} \right) - \sum_{j=1}^2 \left(N_j^{(e)} \cdot C_j^{(e)} \cdot EF_j^{(e)} \right) \approx 73,14 \text{ CO}_2/\text{km} \quad (4.38)$$

$$C_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (4.39)$$

$$\text{CASC } C_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^2 N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^2 N_i} \approx 0,71 \text{ km/kWh} \quad (4.40)$$

$$\text{CASC Km}_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{C_{\text{médio}}} = \frac{559886,19 \text{ kWh}}{0,71 \text{ km/kWh}} = 789460,90 \text{ km} \quad (4.41)$$

$$\text{CASC Km}_{\text{mês}} = \frac{\text{Km}_{\text{total}}}{T} = \frac{789460,90 \text{ km}}{5} = 157892,18 \text{ km} \quad (4.42)$$

$$\text{CASC Km}_{\text{anual}} = \text{Km}_{\text{mês}} * 12 = 157892,18 \text{ km} * 12 = 1894706,16 \text{ km} \quad (4.43)$$

$$CASC \text{ SavingCO}_2_{\text{anual}} = Km_{\text{anual}} \cdot \text{Saving}_{\text{CO}_2/\text{km}} = 1894706,16 \text{ km} \cdot 73,14 \text{ CO}_2/\text{km} = 138,57 \text{ tCO}_2/\text{ano} \quad (4.44)$$

Dessa forma, estima-se que a operação do eletroterminal com veículos elétricos em Cascavel proporciona uma redução anual aproximada de 138,57 tCO₂ quando comparada à operação com veículos convencionais movidos a diesel.

O terminal de Cascavel como mencionado contempla uma geração fotovoltaica. Esta que tem uma capacidade de geração de 437.500kWh por mês. Com base nos dados de consumo do terminal podemos estimar o quanto a usina compensa do gasto energético do terminal:

$$E_{\text{usada}} = \frac{C_{\text{usina}}}{C_{\text{terminal}}} \quad (4.45)$$

$$E_{\text{usada}} = \frac{111.977,24 \text{ kWh/ms}}{437.500 \text{ kWh/ms}} = 0,2560 \approx 25,60\% \quad (4.46)$$

Assim concluímos que o terminal usa apenas 25,60% da energia gerada pela usina mensalmente.

Assim podemos determinar o saving de emissões da usina com base no fator de emissão da região do Paraná para geração de energia que é de 0,11 tCO₂/MWh.

$$CASC E_{\text{anual}} = P_{\text{usina}} \cdot 12 = 437.500 \text{ kWh} \cdot 12 = 5,25 \text{ MWh} \quad (4.47)$$

$$CASC \text{ CO}_2^{\text{evitado}} = E_{\text{anual}} \cdot EF_{\text{grid}} = 5,25 \text{ MWh} \cdot 0,11 \text{ tCO}_2/\text{MWh} = 0,58 \text{ tCO}_2 \quad (4.48)$$

Em seguida, realiza-se o cálculo dos créditos de carbono gerados pela operação do terminal. Para Cascavel, tais créditos correspondem às emissões evitadas pelos veículos eletrificados mais as emissões evitadas pela usina fotovoltaica vinculada.

Tabela 41 – Parâmetros utilizados no cálculo dos créditos de carbono

Parâmetro	Valor	Descrição
Vcr_{reais}	R\$ 42,92 / tCO ₂	Valor de mercado do crédito de carbono por tonelada de CO ₂ evitada
T _{anual} CO ₂	138,57 tCO ₂ /ano	Quantidade anual de emissões evitadas de CO ₂ devido à eletrificação da frota
T _{anual} CO ₂	0,58 tCO ₂ /ano	Quantidade anual de emissões evitadas de CO ₂ pela usina fotovoltaica

Fonte: Criado pelo autor, 2025.

$$Crditos_{\text{carbono}} = 42,92 \times 138,57 + 42,92 \times 0,58 = R\$ 5.972,21 /\text{ano} \quad (4.49)$$

Assim, o terminal de Cascavel gera aproximadamente **R\$5.972,21 por ano** em créditos de carbono, que podem ser revertidos em benefícios para o sistema de transporte público ou para o governo federal.

4.2 Comparação e análise dos resultados dos Resultados

Por fim, apresenta-se o resumo geral e o comparativo dos eletroterminais, conforme os indicadores previamente definidos.

As tabelas a seguir reúnem os principais aspectos técnicos dos terminais em uma análise consolidada.

A Tabela 42 a seguir destaca os dados operacionais e permite consolidar uma comparação entre os terminais.

Em termos de percentual de utilização, observa-se que todos os terminais foram dimensionados próximos ao seu limite máximo de carregamento. No entanto, o eletroterminal de Cascavel apresenta cerca de 20% de sua capacidade ainda disponível, indicando potencial para expansão da frota eletrificada municipal.

No que tange à redundância operacional, apenas o terminal de Cascavel adotou estações de recarga de oportunidade, conferindo maior flexibilidade e confiabilidade ao sistema. As estações de 240 kW ali instaladas permitem compensar falhas ou manutenções nas demais unidades, garantindo continuidade na operação.

Quanto ao layout da infraestrutura, destaca-se negativamente o terminal de São José dos Campos, que optou por vagas em 90°, reduzindo significativamente sua capacidade de recarga simultânea. Em contraste, Cascavel e Salvador adotaram o layout em 45°, mais eficiente para manobras e ocupação. A reorganização do layout em São José permitiria a recarga simultânea de até 9 ônibus articulados adicionais.

A redundância estrutural também é mais bem resolvida em Cascavel, onde o transformador principal foi segmentado em múltiplos cubículos. Tal configuração assegura continuidade operacional mesmo em cenários de falha parcial, além de viabilizar futuras expansões da infraestrutura.

Outro diferencial relevante de Cascavel é a adoção de carregadores com diferentes potências, adequando-se a uma frota híbrida. As estações de 240 kW, por exemplo, oferecem até 120 kW por conector, acelerando a recarga de veículos articulados com baterias superiores a 500 kWh, em comparação com as estações de 180 kW (90 kW por conector). Já o carregador de 360 kW, com 180 kW por conector, antecipa a demanda por modelos futuros com capacidade de recarga superior a 140 kW.

Tabela 42 – Comparativo da robustez operacional

Item	São José	Salvador	Cascavel
% de utilização	94,40%	98,95%	80,71%
Carregadores terminal principal	6 (200kW)	10(160kW)	6(180kW),1(360kW)
Carregadores de oportunidade	0	0	2(240kW)
Layout das vagas	180º	45º	45º
Quantidade de transformadores	1(1,5MW)	1(2MW)	6 (300kW), 1(500kW)
Veículos carregados simultaneamente	3/12	20/20	14/15

Fonte: Criado pelo autor,2025.

A tabela 43 a seguir apresenta os dados de sustentabilidade.

A análise evidencia que, embora os eletroterminais contribuam significativamente para a eliminação de emissões de CO₂, o impacto financeiro associado aos créditos de carbono ainda é modesto. O mercado internacional privilegia grandes volumes de emissões evitadas — na ordem de gigatoneladas — o que limita os benefícios financeiros imediatos para projetos de escala regional. No entanto, considerando que esses terminais representam etapas iniciais em planos mais amplos de eletrificação total do transporte público nacional, seu impacto futuro é promissor. Cidades como Cascavel, que ainda operam com uma frota de cerca de 2.000 ônibus a combustão, possuem grande potencial de redução de emissões nos centros urbanos, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar, diminuição da pegada de carbono e redução da poluição sonora.

Conforme destacado anteriormente, a compensação energética por meio de geração renovável local é uma boa prática essencial. Nesse sentido, a prefeitura de Cascavel opera seu eletroterminal com 100% da energia consumida mensalmente compensada por uma usina fotovoltaica dedicada. Mesmo sendo o terminal com maior demanda energética, a autossuficiência foi alcançada. Destaca-se, ainda, o aproveitamento de uma área anteriormente ociosa — um antigo aterro sanitário — para a instalação da usina, evitando a ocupação de áreas verdes e otimizando o uso do solo urbano.

Tabela 43 – Comparativo ambiental - Sustentabilidade

Item	São José	Salvador	Cascavel
Emissões evitadas/ano (tCO ₂)	2,51	12,41	138,57
Gasto de energia (kWh/mês)	5.664,00	9.152,94	111.977,24
Créditos de carbono/ano (R\$)	107,73	532,64	5972,21
Usina integrada (MWp)	N/A	N/A	7,37

Fonte: Criado pelo autor,2025.

Em relação aos custos, observa-se que os eletroterminais de Salvador e Cascavel, apesar de apresentarem dimensões maiores e mais funcionalidades, tiveram investimentos proporcionais mais eficientes quando comparados ao terminal de São José dos Campos. Um aspecto relevante é a tendência de redução dos custos das tecnologias associadas à eletrificação ao longo do tempo. Enquanto o terminal de São José foi implantado em 2022, o de Salvador em 2023 e o de Cascavel

em 2024, nota-se que, ano após ano, os novos projetos incorporam mais recursos por valores relativos menores, evidenciando a maturação tecnológica e econômica do setor.

Destaca-se ainda o custo relativamente baixo da implementação de sistemas de gestão online das recargas — especialmente quando comparado ao custo total da infraestrutura — e sua importância estratégica. A ausência desse recurso no terminal de São José, que não adota o protocolo OCPP para gerenciamento das estações, dificultou substancialmente a coleta de dados e a análise precisa dos impactos operacionais. Muitas estimativas foram necessárias devido à falta de informações consolidadas sobre as recargas.

Por fim, apesar de a infraestrutura de recarga representar um investimento considerável, o principal componente de custo na implantação de eletroterminais continua sendo a aquisição dos ônibus elétricos.

Tabela 44 – Resumo dos Custos por Terminal

Item	São José	Salvador	Cascavel
Custo infraelétrica terminal + carregadores (R\$ milhões)	R\$ 4,6	R\$ 4	R\$ 7,5
Número de carregadores	6	10	9
Custo ônibus (R\$ milhões)	R\$ 34,8 mi	R\$ 44,8 mi	R\$ 32,0 mi
Número de ônibus	13	20	15
Custo usina fotovoltaica (R\$ milhões)	R\$ NA	R\$ NA	R\$ 19,9
Infra de rede + Software de gestão	NA	R\$ 4.600	R\$ 4.540
Serviço de manutenção + peças de reposição	R\$ 60.000/ano	NA	R\$ 60.000/ano
Total Estimado (R\$ milhões)	117,35	149,2	144,43

Fonte: Criado pelo autor,2025.

Com base na Tabela 44, é possível avaliar a relação custo-benefício dos eletroterminais por meio da análise do custo por funcionalidade implementada. A Tabela 45 consolida essa comparação, permitindo uma avaliação mais precisa da eficiência econômica de cada projeto.

Os dados indicam que, de modo geral, os terminais apresentam custos por funcionalidade relativamente próximos. No entanto, destaca-se o eletroterminal de Cascavel, que alia o menor custo por funcionalidade ao maior número de funcionalidades implementadas, configurando-se como o projeto com melhor relação custo-benefício.

Tabela 45 – Custo versus componentes do terminal

Parâmetros	Pontos	São José	Salvador	Cascavel
Software de gestão	1pt x carregador	0	10	9
Serviço Manutenção + peças reposição	1pt	1	0	1
Nº ônibus 1 (padron)	1pt x ônibus	0	20	13
Nº ônibus 2 (articulado)	2pt x ônibus	24	0	4
Nº carregadores até 180kW	1pt x carregador	6	10	6
Nº carregadores acima 180kW	2pt x carregador	0	0	6
Usina fotovoltaica integrada	3pt	0	0	3
Total Estimado(R\$ milhões)	—	117,35	149,2	144,43
Pontuação Total do terminal	—	31	40	42
Custo por funcionalidade (R\$ milhões)	—	3,79	3,73	3,44

Fonte: Criado pelo autor,2025.

A Tabela 46 apresenta a pontuação atribuída a cada eletroterminal com base no método de scoring, considerando todos os critérios avaliados. Em parâmetros como custo-benefício, percentual de utilização e capacidade de recarga simultânea, os terminais apresentaram desempenhos semelhantes, resultando em pequenas variações nas notas finais.

Ainda assim, o eletroterminal de Cascavel obteve a melhor pontuação global, destacando-se por integrar o maior número de funcionalidades e por adotar integralmente as boas práticas recomendadas para projetos dessa natureza.

multirow

Tabela 46 – Avaliação e pesos dos critérios por terminal

Classe	Parâmetros	Peso	São José	Salvador	Cascavel
Operacional	Percentual Utilização	6,00	3	6	1
	Carga de oportunidade	6,00	0	0	6
	Layout das vagas	6,00	0	6	6
	Carga simultânea	6,00	1	6	5
	Redundância elétrica	6,00	0	0	6
Ambiental	Emissões evitadas	15,00	1	8	15
	Gasto de energia	15,00	8	1	15
	Créditos de carbono	15,00	1	8	15
Custo	Índice custo-benefício	25,00	23	23	25
Pontuação Total do terminal	—	—	37	58	94

Fonte: Criado pelo autor,2025.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão Comparativa dos Terminais

A análise comparativa entre os três eletroterminais — São José dos Campos, Salvador e Cascavel — permitiu avaliar o desempenho de cada projeto com base em três critérios principais: robustez operacional, sustentabilidade ambiental e custo-benefício. As respostas às perguntas norteadoras desta avaliação são apresentadas a seguir.

Qual dos terminais demonstra maior robustez operacional?

Em termos de **robustez operacional**, o eletroterminal de **Cascavel** destaca-se como o mais robusto entre os casos analisados. Esse desempenho resulta da combinação de diversos fatores, como a presença de uma infraestrutura elétrica com redundância, dois carregadores de oportunidade estrategicamente posicionados e uma elevada capacidade de recarga simultânea (16 veículos). O layout elétrico modular do terminal, que permite a operação parcial mesmo durante manutenções, também contribui significativamente para essa avaliação.

Ademais, a adoção de boas práticas no posicionamento das vagas de recarga assegurou a plena disponibilidade dos conectores, permitindo que praticamente 100% da frota possa ser recarregada simultaneamente no terminal principal.

Qual apresenta o melhor desempenho em termos de sustentabilidade?

No que se refere à **sustentabilidade**, os resultados indicam que o eletroterminal de **Cascavel** apresenta o melhor desempenho ambiental entre os casos analisados. O terminal registrou uma redução anual de **138,57 toneladas de CO₂** e geração estimada de créditos de carbono no valor de **R\$ 5.972,21**, superando os demais terminais nesse aspecto.

Ressalta-se que a ausência de dados consolidados em São José dos Campos — onde foi necessário estimar o consumo de energia devido à falta de gestão via OCPP — pode ter influenciado negativamente na análise desse terminal. Ainda assim, mesmo em comparação com Salvador, que possui uma frota maior e dados operacionais transparentes, Cascavel manteve desempenho superior.

Outro fator determinante é a usina fotovoltaica associada ao terminal, que compensa **100%** do consumo energético mensal. A instalação foi estrategicamente realizada sobre um antigo aterro sanitário na área periférica da cidade, promovendo o aproveitamento de uma área anteriormente improdutiva e evitando o uso de zonas verdes para a geração de energia renovável.

Qual oferece o melhor custo-benefício?

Em relação ao **custo-benefício**, observa-se que, mesmo com um maior número de funcionalidades, o eletroterminal de **Cascavel** apresenta o menor custo por funcionalidade entre os casos analisados. Embora esse resultado favoreça Cascavel, é importante considerar que parte dessa vantagem decorre da redução progressiva dos custos das tecnologias associadas à

eletromobilidade. Tal redução é resultado do aumento da competitividade no mercado — com o ingresso de novos fornecedores de infraestrutura e veículos — e da evolução tecnológica, que tem tornado as soluções mais acessíveis ao longo do tempo.

Ademais, os eletroterminais de São José dos Campos e Salvador merecem algumas considerações adicionais. O terminal de São José, pioneiro no Brasil, desempenhou um papel fundamental como base de aprendizado e benchmarking para os projetos subsequentes. Atualmente, a prefeitura já possui um plano de expansão visando à eletrificação total da frota municipal, incorporando soluções mais modernas em termos de funcionalidades e boas práticas.

Em relação a Salvador, trata-se de um terminal com infraestrutura robusta e potencial para melhorias. Os resultados deste trabalho indicam que seu desempenho geral é comparável ao de Cascavel. No entanto, observam-se algumas limitações, como a ausência de uma usina fotovoltaica dedicada e a menor quilometragem percorrida pelos veículos elétricos, o que impacta negativamente a geração de créditos de carbono e a redução efetiva de emissões de CO₂.

Em síntese, os resultados da avaliação indicam que, apesar das diferentes estratégias de implantação, o terminal de **Cascavel** apresenta o melhor equilíbrio geral entre os critérios analisados. O terminal de **Cascavel** se destaca pela sua robustez operacional e pelo melhor desempenho ambiental.

5.1.1 Consolidação da Metodologia e aplicação em projetos

A discussão conduzida ao longo deste trabalho também possibilitou a consolidação de um conjunto de indicadores e diretrizes que fundamentam a proposta de uma metodologia para o planejamento de futuros eletroterminais. Essa metodologia visa otimizar os aspectos ambientais, operacionais e sustentáveis dos projetos, contribuindo para um dimensionamento mais preciso, eficiente e racional da infraestrutura de recarga.

A seguir, apresenta-se a **seqüência de passos para o correto e enxuto dimensionamento de eletroterminais de recarga**.

Dados iniciais:

1. **Dados da frota de veículos:** A empresa ou autarquia responsável pelo projeto do eletroterminal deve fornecer informações detalhadas sobre a frota de veículos que será eletrificada. Dados como a quilometragem média percorrida pelos ônibus a combustão são fundamentais para o dimensionamento preciso das estações de recarga e para a seleção adequada dos modelos de veículos elétricos a serem adquiridos.
2. **Planta baixa do terreno:** Este dado é essencial para a aplicação eficaz das boas práticas de layout elétrico e organização das vagas de recarga. Uma planta detalhada permite a otimização do espaço disponível, garantindo a disposição adequada dos equipamentos e o uso integral dos conectores de recarga.

3. **Identificação de pontos para recarga de oportunidade:** A autarquia deve mapear e propor a implantação de pontos de recarga de oportunidade distribuídos estrategicamente pela cidade, preferencialmente em terminais auxiliares ao principal. Esses pontos são importantes para atender demandas emergenciais e ampliar a flexibilidade operacional da frota elétrica.
4. **Escolha do modelo dos ônibus:** A definição dos modelos de ônibus elétricos deve considerar fatores como autonomia, capacidade da bateria, tipo de operação (convencional ou articulado), padrão de conectores e compatibilidade com as rotas da frota. Essa escolha influencia diretamente o dimensionamento das estações, a infraestrutura elétrica necessária e os ciclos de recarga.
5. **Escolha do modelo dos carregadores:** A seleção dos carregadores deve levar em conta a potência nominal, o número de conectores por equipamento, a compatibilidade com o protocolo OCPP e a flexibilidade para recarga simultânea. Carregadores com diferentes potências podem ser aplicados conforme a estratégia operacional, combinando recarga lenta em pátios e recarga rápida em pontos de oportunidade.

Aspectos operacionais e cálculos relevantes para o projeto:

- **Percentual de utilização do terminal:** A fórmula apresentada abaixo foi adaptada neste trabalho e permite estimar com maior precisão a utilização da infraestrutura de recarga, especialmente quando o operador fornece as janelas disponíveis para recarga. Com esses dados, o dimensionamento das estações pode ser ajustado de forma mais realista.

$$PCU = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (N_{bus,i} \cdot E_{bat,i} \cdot \Delta SOC_{i})}{(T_{disprecargas}) \cdot \sum_{j=1}^m (N_{con,j} \cdot P_{max,j})} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

- **Infraestrutura de rede:** É fundamental contemplar a disponibilidade da rede elétrica local e o ponto de conexão com a distribuidora, avaliando a viabilidade de atender à demanda de potência do terminal sem comprometer a estabilidade do sistema elétrico urbano.
- **Circuito elétrico com redundância de transformadores:** A adoção de transformadores redundantes ou modularizados é uma boa prática que aumenta a confiabilidade do sistema. Essa configuração permite a continuidade parcial da operação em situações de falha ou manutenção, garantindo maior disponibilidade da infraestrutura.

5.2 Trabalhos Futuros

Sugestões para Trabalhos Futuros

Diante dos resultados obtidos e das limitações inerentes ao escopo deste estudo, algumas oportunidades para aprofundamento e continuidade da pesquisa podem ser destacadas.

Primeiramente, recomenda-se o desenvolvimento de um estudo detalhado sobre o **projeto de expansão dos terminais analisados**, considerando diferentes cenários de crescimento da frota e aumento da demanda por transporte público. Tal estudo deve contemplar tanto os aspectos técnicos de infraestrutura quanto os impactos financeiros, com a elaboração de modelos de estimativa de custo e de projeções operacionais para diferentes horizontes de planejamento.

Além disso, sugere-se a realização de uma **análise mais aprofundada da eficiência operacional dos ônibus elétricos**, a partir da coleta sistemática de dados reais de operação e manutenção. Essa análise permitiria validar os parâmetros assumidos nas simulações e avaliações ambientais deste trabalho, além de fornecer subsídios para o aperfeiçoamento de estratégias de gestão da frota, identificação de gargalos operacionais e otimização dos custos de manutenção.

Por fim, uma linha de pesquisa de grande relevância consiste na elaboração de um **estudo de caso voltado à integração de sistemas de armazenamento de energia (BESS – Battery Energy Storage System) aos eletroterminais avaliados**. Tal integração tem o potencial de aumentar a flexibilidade da operação elétrica, reduzir os custos com demanda de ponta e melhorar a utilização da energia proveniente de fontes renováveis, como a geração fotovoltaica já presente em alguns dos terminais. A análise de viabilidade técnica e econômica desta solução representa uma oportunidade importante para o avanço da mobilidade elétrica urbana no Brasil.

Tais iniciativas podem contribuir significativamente para o aprimoramento das políticas públicas, para a otimização dos investimentos em infraestrutura de transporte sustentável e para o fortalecimento da eficiência operacional dos sistemas de ônibus elétricos em centros urbanos.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. [S.l.], 2005. Norma técnica brasileira. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ABNT NBR10295. **NBR 10295: Transformadores de potência — Ensaio e características**. 2019. Rio de Janeiro: ABNT. 57 p. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ABNT NBR14039. **NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV**. 2005. Rio de Janeiro: ABNT. 32 p. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ANEEL. **PRODIST – Módulo 1: Introdução (versão 1.0)**. 2018. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2018842_prodist_modulo_1_v10.pdf>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 30.
- ANTP. **Custos dos serviços de transporte público por ônibus elétrico – método de cálculo**. [S.l.], 2023. 60 p. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/2023/10/30/metodo-de-calculo-da-prestacao-de-servico-por-onibus-eletrico-a-bateria.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- _____. **Rotas tecnológicas de descarbonização do transporte coletivo no Brasil**. [S.l.], 2024. 202 p. Disponível em: <https://files.antp.org.br/2024/7/29/caderno-tecnico-29-rotas-tecnologidas-de-descarbonizacao-para-transporte-publico_2.pdf>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 15.
- BLOOMBERGNEF. **Investimento em eletrificação do transporte global**. 2023. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/global-clean-energy-investment-jumps-17-hits-1-8-trillion-in-2023-according-to-bloombergnef-report/>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 17.
- BYD Brasil. **Ônibus Elétricos**. 2025. Disponível em: <<https://bydbrasil.com.br/produtos/onibus/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 34.
- Canadian Solar. **Placa Solar modelo TOPBiHiKu7 N-type Bifacial TOPCon 690–720W**. 2024. Disponível em: <<https://www.wxguanji.com/products/Canadian/TOPBiHiKu7-N-type-Bifacial-TOPcon-Technology-690-W-720-W.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 63.
- CASCAVEL. **Licitação para a construção de eletroterminal é lançada em Cascavel**. 2023. Disponível em: <<https://www.licitacao.net/noticias/licitacao-para-a-construcao-de-eletroterminal-e-lancada-em-cascavel>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 38.
- Climate-Data.org. **Clima: Cascavel - Paraná**. 2024. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/cascavel-2687/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 62.
- COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE TRANSPORTE DE CARGA (LTC). **Rendimento energético e emissão de CO de combustíveis fósseis: relatório técnico final**. 2024. Disponível em: <https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/rel_final_rend_ener_03_03_16.pdf?utm_source>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- DIÁRIO DO TRANSPORTE. **São José dos Campos instala estação de carregamento dos VLPs no Terminal Sul**. 2022. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2022/02/15/>>

sao-jose-dos-campos-sp-instala-estacao-de-abastecimento-dos-vlps-no-terminal-sul/>. Acesso em: maio 2025. Citado 3 vezes nas páginas 38, 70 e 73.

_____. **Confira como é o interior do primeiro ônibus elétrico da Scania**. 2024. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2024/06/24/video-confira-como-e-o-interior-do-primeiro-onibus-eletrico-da-scania/>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

_____. **Eletroterminal de Cascavel – como funcionam os ônibus elétricos do Terminal Oeste**. 2024. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2024/11/03/video-especial-diario-do-transporte-conferiu-com-exclusividade-como-funcionam-os-onibus-eletricos-o-ole>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 77.

Diário do Transporte. **História: o primeiro ônibus elétrico no Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2017/07/16/historia-o-primeiro-onibus-eletrico-no-brasil/>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 27.

_____. **Avaliação Técnico-Econômica de Ônibus Elétrico no Brasil**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/wp-content/uploads/2020/09/NT-SEE-SDB-Avaliacao-Tecnico-Economica-de-Onibus-Eletrico-no-Brasil.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 23.

_____. **Prefeitura libera R\$ 62 milhões para compra de ônibus elétricos para a Norte Buss**. 2024. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2024/12/13/prefeitura-libera-r-62-milhoes-para-compra-de-onibus-eletricos-para-a-norte-buss/>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

EAF0 - Observatório Europeu de Combustíveis Alternativos. **Recharging systems: connector types and charging point classification**. 2024. Relatório online. Acesso em: jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

Electrical Technology. **Solar Power Plant – Types, Components, Layout, Working & Applications**. 2021. Disponível em: <<https://www.electricaltechnology.org/2021/07/solar-power-plant.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 40.

Eletra. **Elétrico Puro**. 2025. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 34.

Estadão Mobilidade. **8 dados mostram o impacto da mobilidade urbana nas nossas vidas**. 2024. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/dia-a-dia/8-dados-mostram-o-impacto-da-mobilidade-urbana-nas-nossas-vidas/>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.

FISHER, I. **Mathematical Investigations in the Theory of Value and Prices**. New Haven: Yale University Press, 1896. Citado na página 44.

Governo Federal do Brasil. **Ministério das Cidades: Mobilidade Urbana Sustentável – Renovação de Frota**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/novo-pac-selecoes/mobilidade-urbana-sustentavel-renovacao-de-frota>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 18.

GREENER. **Estudo Estratégico de Geração Distribuída - Brasil 2024 - Versão 1.0**. 2024. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Estudo-GD-2024-V1.0-3.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 62.

GREENPEACE BRASIL. **7 motivos para investir já nos ônibus elétricos**. 2024. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/brasil/blog/7-motivos-para-investir-ja-nos-onibus-eletricos/>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 19.

ICCT. **Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Route-Level Energy Consumption and Driving Range Analysis**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2023/03/Deploying-zero-emission-bus-fleets-jun2021.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

_____. **Análise operacional de ônibus elétricos em São Paulo: Lições do projeto ZEBRA**. 2022. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/brazil-hvs-zebra-analise-operacion-onibus-eletricos-sao-paulo-nov22/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 26.

INITIATIVE, G. R. **GRI Standards**. 2021. Disponível em: <<https://www.globalreporting.org/standards/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 47.

INMET. **2023 é o mais quente em 174 anos, confirma relatório da OMM**. 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/2024-e-o-ano-mais-quente-da-serie-historica-no-brasil>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 14.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **Análise operacional de ônibus elétricos em São Paulo - Projeto ZEBRA**. 2024. Disponível em: <<https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/brazil-hvs-ZEBRA-analise-operacion-onibus-eletricos-Sao-Paulo-nov22-1.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

IPDSA. **Parâmetros Geométricos Mínimos para Áreas de Estacionamento**. 2025. Disponível em: <<https://ipdsa.org.br/dados/link/150/arquivo/Parametros20Geometricos20minimos20para20areas20de20estacionamento.pdf>>. Acesso em: maio 2025. Citado 5 vezes nas páginas 51, 52, 53, 54 e 55.

JA SOLAR. **JAM78D40 MB 625–650W Monofacial Módulo Monocristalino**. 2024. Disponível em: <<https://www.wxguanji.com/products/JA/JAM78D40-MB-625-650W.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 63.

JINKOSOLAR. **Tiger Neo N-Type 78HL4-BDV 625–650W**. 2024. Disponível em: <<https://www.wxguanji.com/products/Jinko/78HL4-BDV-625-650W.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 63.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action**. [S.l.]: Harvard Business Press, 1996. ISBN 9780875846514. Citado na página 44.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs**. New York: John Wiley & Sons, 1976. ISBN 9780471465104. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

LONGI SOLAR. **Hi-MO X6 LR7-72HVH 630–650M**. 2024. Disponível em: <<https://www.wxguanji.com/products/Longi/HiMo-X10-LR7-72HVH630-650M.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 63.

MCTI. **Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Queima de Combustíveis**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/5304/1/2020_setor_energia_subsetor_queima_combustiveis_abordagem_setorial.pdf>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 57.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). **Fator de emissão de CO na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos?utm_source>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 58.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Decenal de Expansão da Energia - 2032: Caderno de Eletromobilidade**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-epe-lancam-caderno-do-pde-2032-sobre-a-eletrificacao-do-transporte-no-brasil/copy_of_CadernodeEletromobilidade_PDE2032002.pdf>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). **LO_GIZ_RESULTADOINVENTARIO_00_PAGINASINDIVIDUAIS compactado .pdf**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/LO_GIZ_RESULTADOINVENTARIO_00_PAGINASINDIVIDUAIScompactado.pdf>. Acesso em: jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.

Ministério de Minas e Energia. **Capítulo 8 – Dados Estaduais, Balanço Energético Nacional 2024**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024/series-historicas-e-matrizes/capitulo-8-dados-estaduais.xlsx/view>>. Acesso em: jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Best Research-Cell Efficiencies**. 2024. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.

O Tempo. **O crescimento da tarifa de ônibus em Belo Horizonte na última década**. 2025. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/politica/passagem-de-onibus-em-bh-cresceu-98-em-uma-decada-com-oito-reajustes-1.3302172>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

PREFEITURA DE CASCAVEL. **Cascavel dá um salto gigantesco na sustentabilidade e inaugura usina fotovoltaica**. 2024. Disponível em: <<https://cascavel.atende.net/cidadao/noticia/cascavel-da-um-salto-gigantesco-na-sustentabilidade-e-inaugura-usina-fotovoltaica>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 80.

Prefeitura de Cascavel. **Cascavel inaugura eletroterminal Nansen e inicia operação da maior frota elétrica do Sul do Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2024/08/06/cascavel-pr-inaugura-eleetroterminal-nansen-e-inicia-operacao-da-maior-frota-eletrica-do-sul-do-brasil-com>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 16.

PREFEITURA DE CASCAVEL. **Dados recarga Janeiro a Maio**. 2025. Material coletado com os operadores, não publicado. Citado 3 vezes nas páginas 80, 81 e 82.

PREFEITURA DE CURITIBA. **Motoristas de Curitiba têm treinamento para dirigir ônibus elétrico da BYD em período de testes.** 2024. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/motoristas-de-curitiba-tem-treinamento-para-dirigir-onibus-eletrico-da-byd-em-periodo-de-testes/68307>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 19.

SALVADOR. **Prefeitura inaugura maior terminal de eletrocarga do país com capacidade para carregar 20 ônibus simultaneamente.** 2023. Disponível em: <<https://mobilidade.salvador.ba.gov.br/prefeitura-inaugura-maior-terminal-de-eletrocarga-do-pais-com-capacidade-para-carregar-20-onibus-simultaneamente>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 38.

SEBRAE. **Eletrificação do setor de transporte – futuro das cidades sustentáveis.** 2023. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/eletrificacao-do-setor-de-transporte-futuro-das-cidades-sustentaveis,15d4b542c5bb5810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 15.

Silva, Carlos. **O impacto do Termo de Ajustamento de Conduta no transporte coletivo urbano por ônibus do município do Rio de Janeiro.** 2020. Disponível em: <<https://1library.org/document/yde68ogq-o-impacto-do-termo-de-ajustamento-de-conduta-no-transporte-coletivo-urbano-por-onibus-do-municipio-do-rio-de-janeiro>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 26.

SIMON, H. A. A behavioral model of rational choice. **The Quarterly Journal of Economics**, Oxford University Press, v. 69, n. 1, p. 99–118, 1955. Citado na página 44.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.** 2nd. ed. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2003. Citado na página 45.

SYSTEMICA DIGITAL. **1Q2025 VCM Report.** 2025. Disponível em: <https://systemica.digital/wp-content/uploads/2025/05/1Q2025-VCM_Report-1.pdf>. Acesso em: maio 2025. Citado na página 65.

TEVX. **Tecnologia em Mobilidade Elétrica.** 2025. Disponível em: <<https://tevx.com.br/>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 34.

Time and Date AS. **Sunshine Hours in Salvador.** 2024. Disponível em: <<https://www.timeanddate.com/sun/brazil/salvador>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 62.

_____. **Sunshine Hours in São José.** 2024. Disponível em: <<https://www.timeanddate.com/sun/brazil/sao-jose>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 62.

Trina Solar. **N-type i-TOPCon Bifacial Dual Glass Monocrystalline TSM-NEG21C.20 695–720W.** 2024. Disponível em: <<https://www.wxguanji.com/products/Trina/N-type-i-TOPcon-bifacial-dual-glass-Monocrystalline-module-TSM-NEG21C-20-695-720W.html>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 63.

WRI BRASIL. **Salvador inaugura eletroterminal para recarga de ônibus elétricos do BRT.** 2023. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/atividades/salvador-inaugura-eletroterminal-para-recarga-de-onibus-eletricos-do-brt>>. Acesso em: maio 2025. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.