



Dimensionamento de carregadores de caminhões elétricos para serviços na rede de distribuição de energia elétrica

Tema: Recursos Energéticos Distribuídos

Autores: Pablo Lopes Macedo

Co-Autores: Ana Paula Oening, Sérgio Antonio Das Graças, Carlos Alberto Mendes Dos Santos Junior, Kleber Duarte Tomaz, Débora Cintia Marcilio, Signie Laureano França Santos, Alynne Penha de Mendonça Silva

Empresa: Lactec

Resumo

Existe tendência de eletrificação das frotas de veículos no âmbito nacional, o que leva a crer que as distribuidoras também poderão utilizar esse tipo de veículo para suas operações. Nesse contexto, há necessidade de uma infraestrutura de recarga planejada. Este artigo aborda o dimensionamento de eletropostos para caminhões elétricos de serviço de manutenção da rede de distribuição da ENEL. Foram considerados quatro modelos de veículos elétricos com aplicações distintas e implementos totalmente eletrificados. Foi realizado um levantamento bibliográfico do tema e uma pesquisa de mercado acerca das opções disponíveis, e, a seguir, desenvolveu-se uma metodologia para dimensionamento de carregadores. Para isso, foi realizada a coleta de dados sobre a composição das frotas, tipos de serviços prestados e distribuição por bases, através de dados de telemetria, relatórios de serviços e entrevistas com operadores da concessionária. A análise permitiu estimar a demanda energética dos veículos elétricos em diferentes cenários operacionais, considerando a autonomia dos veículos e os tempos médios de execução das atividades. Destaca-se que a metodologia desenvolvida proporciona uma base para o planejamento eficiente do carregamento de veículos elétricos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a eficiência operacional.

1. Introdução

No contexto da mobilidade elétrica, segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico ABVE (2024), tem-se registrado, nos últimos anos, um aumento no número de veículos elétricos (VEs) em todo o território nacional, bem como uma disponibilidade cada vez maior de modelos de VEs de diversos portes e aplicações. Esse mercado em desenvolvimento oferece opções de modais que podem ser utilizados pelas distribuidoras de energia elétrica, tanto para locomoção quanto para a prestação de serviços à rede elétrica. Neste projeto de P&D, promove-se o desenvolvimento de plataformas multisserviços embarcadas em caminhões elétricos, com implementos que possam se beneficiar dessas características, a fim de averiguar a aplicabilidade e viabilidade dessas novas tecnologias.

Há vantagens na adoção de veículos elétricos para realização de serviços de manutenção na rede de distribuição como diminuição de emissão de gases poluentes, maior eficiência energética, redução de ruídos entre outras. Com a possibilidade de eletrificação de parte da frota de veículos das distribuidoras de energia

elétrica, surge a necessidade de criar uma infraestrutura de recarga planejada que garanta a disponibilidade desses veículos para a prestação de serviços. Entre as categorias de veículos elétricos na frota da distribuidora, há aqueles de porte leve, médio e pesado. Os veículos pesados, em específico, normalmente apresentam um desafio maior de planejamento devido ao espaço físico necessário, à maior potência de carregamento e à complexidade dos serviços a que se destinam e tecnologia embarcada.

O desenvolvimento deste trabalho se concentra no dimensionamento de estações de recarga para caminhões elétricos com implementos eletrificados para prestação de serviços à rede elétrica de distribuição. Nesse processo, foram levados em conta critérios relacionados ao deslocamento dos veículos e ao uso secundário da bateria do caminhão para prestação de serviços. O objetivo é determinar a potência dos eletropostos a serem instalados nas bases da distribuidora, garantindo a disponibilidade dos caminhões elétricos, considerando as escalas regulares de trabalho. Todo o desenvolvimento da metodologia é complementar a ao projeto de P&D PORTFÓLIO DE SOLUÇÕES DE ELETRIFICAÇÃO E VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA MULTISSERVIÇOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA no âmbito da ANEEL Nº PD-00390-1093-202.

2. Desenvolvimento

2.1 Levantamento teórico

Inicialmente, foi realizada uma revisão sobre a tecnologia de carregamento de veículos elétricos, com o objetivo de mapear infraestruturas, características e modelos mais utilizados. Na sequência, o levantamento bibliográfico permitiu identificar as tecnologias de vanguarda, metodologias já utilizadas e os principais aspectos do tema a ser analisado. Também foi realizado um levantamento comercial (condições técnicas e mercadológicas) acerca de caminhões elétricos do mercado nacional e de eletropostos disponíveis. Para realizar essa atividade, foram contatados fornecedores nacionais e internacionais. O levantamento dessas informações, juntamente com uma análise inicial, tem o intuito de nortear as discussões para a determinação de quais carregadores são os mais indicados para atender às necessidades do projeto. Existem diferentes formas de recarregar veículos elétricos, que se diferenciam de diversos modos, como pela forma de conexão, potência de carregamento, protocolos de comunicação entre o VE e a estação de recarga, entre outros. Segundo Charge Hub (2024), entre as formas de recarregamento de VEs mais comuns, há diferentes níveis de recarga dependendo da potência de recarregamento. Os níveis de recarga mais lentos usam carregadores que fornecem a recarga em corrente alternada (CA), enquanto os carregadores mais rápidos utilizam corrente contínua (CC). Nos carregadores em corrente alternada, a conversão é realizada internamente no veículo elétrico, e veículos leves demandam de 5 a 20 horas para uma recarga completa, dependendo da potência do carregador. Já para a recarga em corrente contínua, o processo de conversão CA/CC ocorre no carregador, sendo possível realizar a recarga completa da bateria em menos de uma hora. Veículos pesados, por outro lado, comumente possuem baterias maiores que veículos leves e, dentre os modelos disponíveis no mercado nacional, a maioria só é compatível com carregadores de corrente contínua. Existem diferentes modelos de conectores utilizados, mas foi identificado que, entre os caminhões disponíveis no mercado nacional, é quase unânime a utilização do conector comercialmente denominado CCS2.

Sequencialmente foi realizada uma busca acerca do dimensionamento e alocação de pontos de recarga para veículos elétricos, especialmente direcionada a frotas de veículos operacionais, considerando ro-

tas e trajetos. Foram acessadas bases científicas internacionais e realizadas pesquisas com as seguintes palavras-chave: “*Charging Station (EVSE)*”, “*Electric truck fleet*”, “*sizing*”, “*allocation*” e “*routes*”.

Dentre os trabalhos analisados no levantamento bibliográfico, pode-se citar o trabalho de Yi; Liu; Wei- (2022), que apresenta um modelo otimizado para alocação de pontos de recarga baseado em dados geográficos e de consumo de energia de Salt Lake City, nos Estados Unidos. O objetivo do método desenvolvido é que as estações de recarga cubram o máximo de território possível, dadas as condições de utilização da área (*CMCLP - capacitated maximal coverage location problem*). No desenvolvimento deste trabalho, buscou-se um objetivo semelhante: atender aglomerados regionais de onde as bases prestam serviço de manutenção. Dessa forma, foi possível determinar um raio de ação dos caminhões e estimar o consumo de energia com deslocamento.

A questão da dependência de combustível fóssil para transportes motorizados é tratada no trabalho de Shah; Nielsen; Reid (2014), que propõem um método de controle de carregamento de veículos elétricos comerciais a partir de machine learning, com o intuito de contribuir para a transição do setor. O método de controle selecionado busca mitigar a demanda de recarga de veículos elétricos de frota em aplicações comerciais e, assim, otimizar os custos de abastecimento. É utilizado um sistema SCADA para aquisição de dados e controle supervisão, com o objetivo de que os veículos da frota sempre estejam carregados o suficiente para cumprir as tarefas necessárias com o menor custo operacional. São avaliadas informações das estações de recarga, dados meteorológicos, curvas de carga da rede elétrica, relação entre dias de semana e feriados e dados históricos de rotas percorridas.

O artigo de Khaksari; Tsaousoglou; Makris (2021) trata sobre o dimensionamento de estações de recarga com o objetivo de minimizar os custos de investimento e operação, enquanto atende-se à necessidade de os veículos elétricos serem carregados. A aplicabilidade da solução proposta avalia o número e tipo de estações de recarga a serem instaladas, considerando a integração com tecnologias de redes elétricas inteligentes. Já o trabalho de Hussain; Musilek (2022) propõe uma solução de recarga de veículos elétricos para momentos de contingência do sistema, quando os recursos energéticos estão limitados. Os autores propõem um método baseado em régua de divisão modificadas, buscando maximizar o número de veículos que podem ser carregados durante uma operação crítica, para que esses possam se deslocar até a próxima estação de carregamento disponível. Kumar S.; Kumar K. (2022) apresentam também uma revisão sobre estações de recarga, mas no cenário indiano, que alguns autores consideram em um ponto de amadurecimento próximo ao do Brasil. São estratificados dados de veículos, carregadores e tendências de mercado. A partir dessas fontes notou-se os critérios de mais notáveis para o desenvolvimento da metodologia e coleta dos dados.

2.2 Metodologia

Após o levantamento bibliográfico e de informações técnicas e comerciais acerca do cenário de veículos elétricos nacional e internacional, partiu-se para a coleta de dados da concessionária, avaliando as fontes de informações disponíveis que poderiam ser utilizadas no processo de dimensionamento dos carregadores.

A metodologia tem como objetivo determinar a potência dos carregadores a serem fornecidos para que os veículos elétricos possam sair da base de operação, executar os serviços e retornar à base. Resumidamente, o fluxo de atividades passa pela coleta de informações acerca dos serviços executados pela concessionária e expectativas de utilização das plataformas multisserviços, posteriormente, é estimado o consumo energético para o deslocamento do veículo e ajustado conforme limites técnicos, necessidades dos operadores e opções comerciais que atendam. O fluxograma da Figura 1 apresenta as etapas da metodologia de forma ordenada:

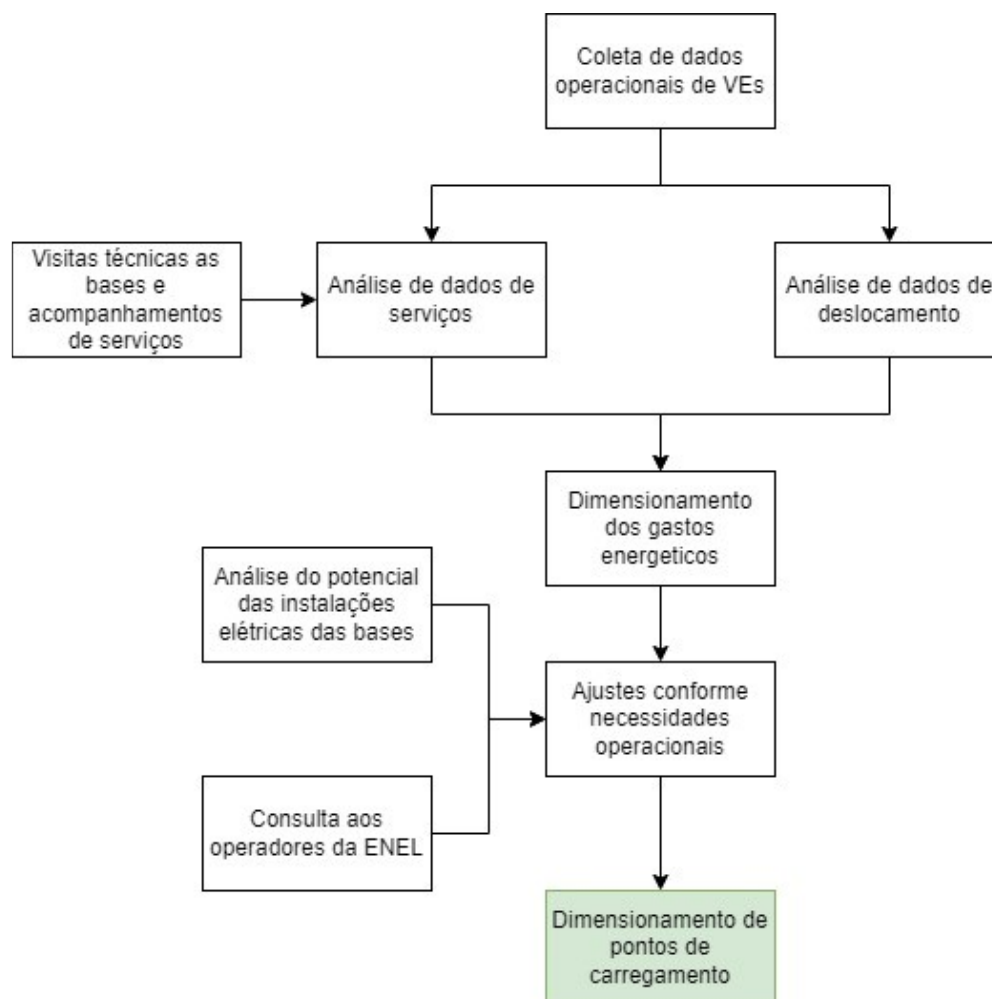


Figura 1 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento dos carregadores de veículos elétricos
As etapas da metodologia desenvolvida para o dimensionamento dos carregadores de veículos elétricos, são:

- Coleta de Informações: Nesta etapa, são coletadas informações detalhadas sobre os serviços executados pela concessionária e as expectativas de utilização das plataformas multiserviços.
- Estimativa de Consumo Energético: Com base nas informações coletadas, é estimado o consumo energético necessário para o deslocamento dos veículos elétricos, levando em consideração fatores como distância percorrida, tempo de deslocamento e serviços executados, consumo em deslocamento em dos implementos.
- Ajuste de Consumo Energético: O consumo energético estimado é ajustado conforme limites técnicos, necessidades dos operadores e opções comerciais disponíveis, garantindo uma solução que atenda aos requisitos operacionais e econômicos.
- Dimensionamento dos Carregadores: Com o consumo energético ajustado, é determinada a potência dos carregadores necessária para permitir que os veículos elétricos saiam da base de operação, executem os serviços e retornem à base dentro dos parâmetros estabelecidos.
- Implementação e Avaliação: Por fim, a metodologia é implementada e os resultados são avaliados quanto à eficácia na prática, permitindo ajustes e refinamentos conforme necessário.

Foram avaliados dados de composição das frotas da ENEL nos três estados em que ela se faz presente. Foram analisados os tipos de veículos, os tipos de serviços prestados e a distribuição por bases. Dentre as

bases, foram escolhidas aquelas que prestam serviços de manutenção relacionados aos desenvolvimentos do P&D e que, do ponto de vista estratégico, são mais adequadas para os testes das novas tecnologias. Selecionadas as bases, foi feito um segundo levantamento de dados, onde foram coletadas informações de telemetria dos veículos, serviços prestados, relatórios e planejamentos de execução de serviços, além de acompanhamento da realização de serviços pela equipe do P&D, juntamente com entrevistas aos operadores. Através dessas informações, foi possível determinar o perfil de deslocamento dos caminhões, onde estão integrados os implementos de serviço, como cesto aéreo, guindaste, ferramenta de poda e ferramenta de lavagem.

São 4 modelos de caminhões elétricos com implementos elétricos embarcados para prestação de serviços. De forma geral os modelos podem ser definidos da seguinte maneira

- Modelo 1 – caminhão elétrico para serviços de trocas de postes e transformadores com capacidade de transporte e manipulação.
- Modelo 2 - caminhão elétrico com implementos para lavagem de isoladores e operações de manutenção na rede área
- Modelo 3 - caminhão elétrico com implementos para poda de árvores e operações de manutenção na rede área
- Modelo 4 – caminhão elétrico com plataforma multisserviços como operações de manutenção aérea, poda de árvores, trocas de postes e transformadores com capacidade de transporte e manipulação.

Foram estimados modelos de caminhões para serem utilizados no projeto seguindo a sua capacidade operacional e são baseados em modelos de caminhões elétricos comercializados no Brasil. Foram coletadas informações conforme manual dos fabricantes. A Tabela 1 resume os dados de capacidade da bateria e autonomia dos caminhões estimados para cada modelo. Foi expresso o consumo médio estimado em dados de manual, mas o consumo real de energia depende de outros fatores como temperatura, velocidade de deslocamento, utilização dos freios regenerativos, elevação da rota. Considerando todos os modelos de caminhões elétricos comercializados no Brasil até o primeiro semestre de 2024 tem-se os seguintes valores médios:

- Autonomia média de 1,29 km/kWh

Esta é a média de autonomia dos veículos elétricos avaliados, indicando a distância que cada veículo pode percorrer com base em cada quilowatt-hora de energia armazenada na bateria.

- Potência média de 237 kW dos motores elétricos:

Esta é a potência média dos motores elétricos dos caminhões avaliados, representando a capacidade de fornecer energia para a propulsão dos veículos.

- Capacidade média das baterias de 209 kWh:

Valor de capacidade média de armazenamento de energia das baterias dentro os veículos analisados.

- Regime ideal de funcionamento de 20 a 80% do *State of Charge* (SoC) (126 kWh útil):

Os fabricantes de veículos elétricos geralmente recomendam a utilização dos veículos na faixa entre 20% e 80% do estado de carga da bateria com intuito de prolongar a vida útil da bateria, tanto em termos de capacidade de armazenamento de energia quanto de potência de carregamento e descarregamento. Tem-se ainda pontos a se destacar, nessa faixa do SoC é geralmente é onde pode carregar o veículo com maior potência e tem-se uma margem de segurança de 20% da bateria para eventuais contratempos de deslocamento.

Tabela 1 - Modelos de caminhões selecionados e características técnicas

Modelo	Capacidade-da-Bateria-(kWh)	Autonomia-(km)	Consumo-médio-(kwh/km)
1	229	165	1,39
2	192	250	0,77
3	192	250	0,77
4	282	350	0,81

Para cada modelo de veículo de serviço, foram selecionadas as atividades respectivas e analisados os tempos médios de execução ao longo de um ano. Dessa forma, foi possível observar o tempo de execução das atividades de forma sazonal em diferentes bases, bem como o número de ocorrências, identificando pontos críticos na operação. Considerando que os veículos elétricos irão operar de forma concomitante aos veículos a combustão, optou-se por utilizar os tempos médios de execução de serviço como referência. Recomenda-se que, para casos críticos, com grande complexidade e alta demanda de tempo, sejam utilizados caminhões convencionais. Dessa forma, foi possível calcular o gasto energético e realizar simulações de casos típicos de uso dos caminhões.

Com as considerações acerca dos veículos elétricos para cada base e o deslocamento médio previsto foi dimensionado o gasto energético diário para movimentação do veículo. São apresentadas na tabela 2, para 4 bases, o deslocamento diário e o gasto energético presumido considerando autonomia dos caminhões e o modelo de veículo designado. Na sequência foi feita a estimativa do consumo energético em serviços, considerando que as ferramentas são elétricas e os atuadores só são acionados durante o momento do serviço proporcionado maior economia de energia. Foram dimensionados os tempos de serviço, escala de trabalho, tempo de utilização da ferramenta na execução das atividades e número de atividades executadas por dia. Essas informações foram obtidas através de relatórios de serviços, visita de acompanhamento e declarações de operadores e responsáveis. A Tabela 2 também as bases com serviços analisados e energia gasta estimada. Para serviços como poda e lavagem de isoladores os caminhões realização várias movimentações sequenciais durante um turno se deslocando em um trajeto curto de poste em poste e retornando para base no fim do ciclo já para serviços de manutenção como troca de postes e transformadores tratam-se de atividades que demandam um período de tempo maior e, portanto, há um perfil diferente de gasto energético com os implementos e com deslocamento.

Tabela 2 - Gasto energético médio diário por base com deslocamento execução de serviços

Bases	Modelo	Média-de-distância-de-deslocamento-diária-(km)	Capacidade-da-bateria-consumida-com-deslocamento-(%)	Capacidade-da-bateria-consumida-execução-de-serviços-diária-(%)	Total-gasto-energético-diário-(%)
Base-1	Modelo-1	44	37	46	83
Base-2	Modelo-2	70	28	25	53
Base-3	Modelo-3	70	28	25	53
Base-4	Modelo-4	43	10	44	54

Com a informação do consumo energético por turno é possível prever o estado de carga da bateria após um período de trabalho. Sabendo o tempo que o caminhão ficara parado na base entre turnos é possível estimar o a potência necessária do carregador para recarregar a bateria até o mínimo possível para uma nova jornada de trabalho. O cálculo é feito considerando que o caminhão inicia a jornada com 100% de bateria e leva em consideração também limites como a potência máxima de carregamento do caminhão

para cada faixa de SoC. Para a base 1 foi dimensionado um carregador de 24 kW, para as bases 2 e 3 foram designados carregadores de 13 kW e para base 4 de 15 kW, considerando um tempo de recarga de 8h.

Esses valores de potência são o mínimo recomendado considerando o regime médio de serviços executados no dia. Para escolha final foram analisados outros fatores como possibilidade de expansão da frota elétrica nas bases, modelos comerciais disponíveis, possibilidade de carregamento entre serviços, entre turnos reduzidos e utilização por outros veículos. Na Figura 2 é possível observar o estado de carga diário estimado para os veículos de serviço em diferentes configurações.

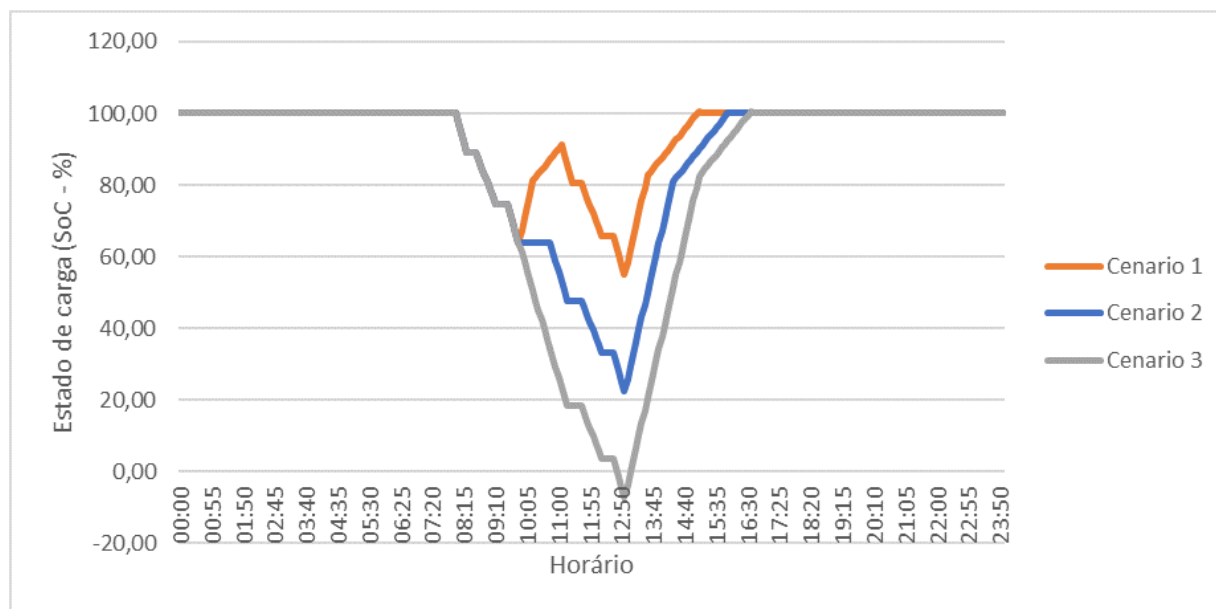


Figura 2 - Estado de carga da bateria, 3 cenários

No cenário 1, onde o caminhão retorna para uma recarga intermediária entre os serviços, a maior profundidade de descarga registrada foi de 50%. Isso indica que o veículo foi capaz de completar o primeiro serviço e ainda retornar à base com uma reserva significativa de carga, garantindo a continuidade das operações. No cenário 2, o caminhão realizou dois atendimentos consecutivos sem recarga intermediária, resultando em uma profundidade de descarga máxima de 20%. Isso demonstra uma gestão eficiente da energia, permitindo que o veículo conclua múltiplos serviços sem comprometer significativamente a carga da bateria. Por outro lado, no cenário 3, a profundidade de descarga foi maior do que a capacidade da bateria, simulando uma situação em que o caminhão elétrico não poderia ser aplicado devido à falta de carga. Isso ressalta a importância de planejar adequadamente as operações e garantir que haja infraestrutura de recarga disponível para evitar interrupções nas atividades.

Em suma, os cenários apresentados destacam a importância da gestão inteligente da energia e da infraestrutura de recarga para garantir a operação eficiente e confiável de veículos elétricos em ambientes de trabalho reais. Esses resultados podem orientar decisões futuras sobre a implementação e o uso de veículos elétricos.

3. Conclusão

Para o dimensionamento dos carregadores dos veículos elétricos no contexto das operações da concessionária foram observados dados detalhados sobre os diferentes aspectos relacionados ao dimensiona-

mento de carregadores, consumo energético dos veículos em diversas atividades, características operacionais das bases de interesse e os requisitos específicos para cada protótipo de plataforma multiserviços. A metodologia desenvolvida permitiu uma estimativa precisa da demanda energética dos VEs em diferentes cenários operacionais, levando em consideração a autonomia dos veículos, os tempos médios de execução das atividades e os deslocamentos diários previstos. Além disso, a análise cuidadosa das condições de operação em cada base, incluindo a sazonalidade das atividades, permitiu uma adaptação eficiente da infraestrutura de recarga para atender às necessidades específicas de cada local.

Foi evidenciado que a utilização de VEs na ENEL não só contribui para a redução das emissões de carbono e a sustentabilidade ambiental, mas também oferece vantagens operacionais, como a possibilidade de redução dos custos de combustível e manutenção e a melhoria da eficiência nas operações de campo.

A abordagem adotada neste relatório destaca a importância de uma análise detalhada e personalizada para o dimensionamento e planejamento da infraestrutura de recarga de VEs, levando em consideração as características específicas de cada operação e a flexibilidade necessária para lidar com diferentes cenários operacionais e requisitos sazonais.

Portanto, com base nas informações apresentadas, é possível concluir que a metodologia desenvolvida proporciona uma base para o planejamento eficiente do carregamento de veículos elétricos na ENEL, contribuindo para a transição para uma matriz energética mais sustentável e eficiente. Os valores obtidos servem como base para dimensionamento, mas existem outros fatores relevantes como potencial de expansão da frota elétrica, uso por outros VEs, e outras considerações no planejamento do uso dos caminhões.

4. Referências bibliográficas

ABVE. Elétricos crescem em todas as regiões do Brasil. Disponível em:

<<https://abve.org.br/veiculos-eletricos-crescem-em-todo-o-pais/>>. Acesso em: 15/1/2025.

CHARGE HUB. Guide On How To Charge Your Electric Car With Charging Stations. Disponível em:

<<https://chargehub.com/en/electric-car-charging-guide.html>>. Acesso em: 9/1/2025.

HUSSAIN, A.; MUSILEK, P. Fairness and Utilitarianism in Allocating Energy to EVs During Power Contingencies Using Modified Division Rules. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 13, n. 3, p. 1444–1456, 2022.

KHAKSARI, A.; TSAOUSOGLOU, G.; MAKRIS, P.; et al. Sizing of electric vehicle charging stations with smart charging capabilities and quality of service requirements. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, 2021. Elsevier Ltd.

KUMAR K, J.; KUMAR, S.; V.S, N. Standards for electric vehicle charging stations in India: A review. **Energy Storage**, v. 4, n. 1, 2022.

SHAH, J.; NIELSEN, M.; REID, A.; et al. Cost-optimal, robust charging of electrically-fueled commercial vehicle fleets via machine learning. 2014 IEEE International Systems Conference Proceedings. **Anais...** . p.65–71, 2014. IEEE.

YI, Z.; LIU, X. C.; WEI, R. Electric vehicle demand estimation and charging station allocation using urban informatics. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 106, p. 103264, 2022.