

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Caio Cesar Amorim Silva

**Estações de Carregamento de Veículos Elétricos Ultrarrápidas em Redes de
Distribuição: Impactos e Capacidade de Hospedagem**

Juiz de Fora

2026

Caio Cesar Amorim Silva

**Estações de Carregamento de Veículos Elétricos Ultrarrápidas em Redes de
Distribuição: Impactos e Capacidade de Hospedagem**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Henriques Dias

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Caio Cesar Amorim.

Estações de Carregamento de Veículos Elétricos Ultrarrápidas em Redes de Distribuição: Impactos e Capacidade de Hospedagem / Caio Cesar Amorim Silva. – 2026.

67 f. : il.

Orientador: Bruno Henriques Dias

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2026.

1. Capacidade de Hospedagem. 2. Estações de Carregamento de Veículos Elétricos. 3. Sistemas de Distribuição. 4. Base de Dados Geográfica da Distribuidora. 5. Qualidade de Energia. I. Dias, Bruno Henriques, orient. II. Título.

Caio Cesar Amorim Silva

Estações de Carregamento de Veículos Elétricos Ultrarrápidas em Redes de Distribuição: Impactos e Capacidade de Hospedagem

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em 13 de Março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Henriques Dias - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues Coelho
Universidade Federal de São João del Rei

Prof. Dr. Igor Delgado de Melo
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo de Arruda Bitencourt
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Henriques Dias, Professor(a)**, em 13/03/2026, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo de Arruda Bitencourt, Usuário Externo**, em 13/03/2026, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Rodrigues Coelho, Usuário Externo**, em 13/03/2026, às 18:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Delgado de Melo, Professor(a)**, em 13/03/2026, às 18:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caio Cesar Amorim Silva, Usuário Externo**, em 13/03/2026, às 21:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2878382** e o código CRC **C83246D5**.

Dedico este trabalho a Deus e a todas as pessoas que
contribuíram com a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades que tem colocado em minha vida. Agradeço aos meus pais, Rogéria e Vicente, pois sem eles eu jamais teria chegado até aqui. Agradeço à minha esposa, Flávia Neiva, pelo apoio durante toda minha trajetória acadêmica e por estar sempre ao meu lado. Agradeço à minha tia, Maria Aparecida, por ter me acolhido durante esses anos.

Agradeço ao meu orientador, Bruno Dias, por todos os aprendizados nesses mais de 5 anos juntos no universo das pesquisas. Agradeço à minha amiga, Walquíria do Nascimento, por todo apoio neste projeto. Agradeço à banca avaliadora pela atenção a este trabalho. E por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora pelas oportunidades de aprendizado e financiamento deste trabalho.

"Há mais pessoas que desistem, do que pessoas que fracassam."
Henry Ford.

RESUMO

A eletrificação do setor de transportes gera diversos benefícios ambientais, sendo assim um dos principais pilares da transição energética no Brasil e no mundo. Nas últimas décadas, a substituição de veículos à combustão interna por veículos elétricos está alinhada aos compromissos internacionais de mitigação das mudanças climáticas. Apesar de contribuir com a busca pela sustentabilidade energética e preservação do meio ambiente, a inserção de veículos elétricos impõe novos desafios às redes de distribuição, principalmente com o advento de estações de carregamento ultrarrápidas que apresentam potências elevadas. A alta penetração de carregadores ultrarrápidos em sistemas de distribuição pode levá-lo a atingir seus limites operacionais, colocando em risco sua integridade e a segurança das pessoas. Sendo assim, o conhecimento da capacidade de hospedagem ajuda a garantir que os sistemas de distribuição operem de forma segura e confiável, dentro dos limites definidos por norma. No Brasil, a análise da viabilidade técnica da integração de estações de carregamento ultrarrápidas, por exemplo, na ordem de 1.000 kW ainda é pouco explorada, representando uma lacuna de pesquisa. Neste contexto, o presente trabalho objetiva apresentar uma metodologia para o cálculo da capacidade de hospedagem de estações de carregamento ultrarrápidas por meio de ferramentas computacionais (*Python* e *OpenDSS*), sendo tal metodologia baseada no método determinístico do cálculo da capacidade de hospedagem. Além disso, objetiva-se mensurar os impactos gerados pela inserção massiva destes carregadores na rede. A fim de validar a metodologia proposta, esta foi aplicada em dois estudos de caso, o sistema de distribuição de Poços de Caldas (MG) e a rede elétrica do *campus* universitário da UFJF. Por fim, avaliou-se como a geração solar fotovoltaica pode contribuir para a integração dos veículos elétricos à rede de distribuição. Os resultados desta dissertação foram obtidos considerando os horários mais críticos de simulação, que correspondem ao pico de carga às 18:00 e ao pico de geração às 13:00. Considerando o cenário mais conservador (18hrs), encontrou-se uma capacidade de hospedagem de 1.000 kW para o Campus da Universidade Federal de Juiz de Fora e uma CH de 4.000 kW para a rede de distribuição de Poços de Caldas.

Palavras-chave: Capacidade de Hospedagem; Estações de Carregamento de Veículos Elétricos; Sistemas de Distribuição; Base de Dados Geográfica da Distribuidora; Qualidade de Energia.

ABSTRACT

The electrification of the transportation sector generates several environmental benefits, thus being one of the main pillars of the energy transition in Brazil and worldwide. In recent decades, the replacement of internal combustion vehicles with electric vehicles has aligned with international commitments to mitigate climate change. Despite contributing to the pursuit of energy sustainability and environmental preservation, the integration of electric vehicles imposes new challenges on distribution networks, especially with the advent of ultra-fast charging stations with high power outputs. The high penetration of ultra-fast chargers in distribution systems can lead them to reach their operational limits, jeopardizing their integrity and the safety of people. Therefore, knowledge of the hosting capacity helps ensure that distribution systems operate safely and reliably, within the limits defined by regulations. In Brazil, the analysis of the technical feasibility of integrating ultra-fast charging stations, for example, on the order of 1,000 kW, is still poorly explored, representing a research gap. In this context, the present work aims to present a methodology for calculating the hosting capacity of ultra-fast charging stations using computational tools (*Python and OpenDSS*), with this methodology based on the deterministic method of calculating hosting capacity. Furthermore, it aims to measure the impacts generated by the massive insertion of these chargers into the grid. In order to validate the proposed methodology, it was applied in two case studies: the distribution system of Poços de Caldas (MG) and the electrical grid of the UFJF university *campus*. Finally, it evaluated how photovoltaic solar generation can contribute to the integration of electric vehicles into the distribution network. The results of this dissertation were obtained considering the most critical simulation times, which correspond to the peak load at 6:00 PM and the peak generation at 1:00 PM. Considering the most conservative scenario (18 hours), a hosting capacity of 1,000 kW was found for the Federal University of Juiz de Fora Campus and a capacity of 4,000 kW for the Poços de Caldas distribution network.

Keywords: Hosting Capacity; Electric Vehicle Charging Stations; Distribution Systems; Distributor's Geographic Database; Power Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vendas de veículos leves eletrificados no Brasil: BEV + PHEV + HEV + HEV FLEX.	14
Figura 2 – Tipos de veículos elétricos.	22
Figura 3 – Fluxograma da metodologia proposta.	29
Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição da UFJF.	33
Figura 5 – Alimentador 14_PC3_1: Subestação saturnino - Poços de Caldas.	35
Figura 6 – Evento de lançamento da Super e-Platform da BYD de 1000 kW.	37
Figura 7 – Modelos compatíveis: Han L e Tang L.	37
Figura 8 – Curva de carga típica do Campus - Dia útil.	39
Figura 9 – Perfil de tensão: Caso Base (18 hrs).	41
Figura 10 – Perfil de tensão: Inserção massiva (18 hrs).	44
Figura 11 – Perfil de tensão: Caso limítrofe de hospedagem (18 hrs).	46
Figura 12 – Perfil de geração solar da Universidade Federal de Juiz de Fora.	47
Figura 13 – Curva de carga típica do alimentador 14_PC3_1: Dia útil de verão.	50
Figura 14 – Perfil de tensão: Caso Base (21 hrs).	52
Figura 15 – Pontos de alocação das estações de carregamento ultrarrápidas.	53
Figura 16 – Perfil de tensão: Inserção massiva (21 hrs).	54
Figura 17 – Perfil de tensão: Caso limítrofe de hospedagem (21 hrs).	57
Figura 18 – Perfil de geração solar de Poços de Caldas.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação das cargas e geradores do campus e potência dos respectivos transformadores.	34
Tabela 2 – Limites operacionais da rede da UFJF.	35
Tabela 3 – Limites operacionais do alimentador 14_PC3_1.	36
Tabela 4 – Especificações técnicas do carregador Super e-Platform da BYD.	37
Tabela 5 – Resultados sem estações de carregamento ultrarrápidas.	39
Tabela 6 – Índice da barra em estudo: Caso base.	40
Tabela 7 – Quantidade de carregadores alocados: Inserção massiva (UFJF).	42
Tabela 8 – Resultados da inserção massiva de estações de carregamento ultrarrápidas.	42
Tabela 9 – Índices das barras em estudo: Inserção massiva.	43
Tabela 10 – Resultado da capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos: UFJF.	44
Tabela 11 – Resultados da inserção de carregadores: Caso limítrofe de hospedagem (UFJF).	45
Tabela 12 – Índices das barras em estudo: Caso limítrofe de hospedagem (UFJF).	45
Tabela 13 – Resultados de capacidade de hospedagem com e sem fotovoltaica (UFJF).	48
Tabela 14 – Quantidade de carregadores alocados: Sem e com fotovoltaica.	48
Tabela 15 – Resultados do caso limítrofe de hospedagem: Sem e com fotovoltaica.	49
Tabela 16 – Resultados sem estações de carregamento ultrarrápidas.	51
Tabela 17 – Índices das barras em estudo: Caso base.	51
Tabela 18 – Quantidade de carregadores alocados: Inserção massiva (Poços de Caldas).	53
Tabela 19 – Resultados da inserção massiva de estações de carregamento ultrarrápidas.	54
Tabela 20 – Índices das barras em estudo: Inserção massiva.	54
Tabela 21 – Resultado da capacidade de hospedagem de estações de recarga ultrarrápidas.	55
Tabela 22 – Resultados da inserção de estações de recarga: Caso limítrofe de hospedagem.	56
Tabela 23 – Índices das barras em estudo: Caso limítrofe de hospedagem.	56
Tabela 24 – Resultados de hospedagem com e sem fotovoltaica (Poços de Caldas).	58
Tabela 25 – Quantidades de carregadores alocados: Sem e com fotovoltaica.	59
Tabela 26 – Resultados do caso limítrofe de hospedagem: Sem e com fotovoltaica.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira de Veículos Elétricos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDGD	Base de Dados Geográfica da Distribuidora
BEV	Battery Electric Vehicles
BYD	Build Your Dreams
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CH	Capacidade de Hospedagem
CRITT	Centro Regional de Inovação e Transferência de Tecnologia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
E-REV	Extended Range Electric Vehicle
F	Falso
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FD	Fator de Desequilíbrio
FOB	Função Objetivo
GD	Geração Distribuída
HEV	Híbrido Electric Vehicles
HEV FLEX	Híbrido Electric Vehicles Flex
LABSOLAR	Laboratório Solar Fotovoltaico
MG	Minas Gerais
MMDG	Micro e Minigeração Distribuída
MT	Média Tensão
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
PDE	Plano Decenal de Expansão
PEV	Plug-in Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
p.u.	Por Unidade
RPEV	Road Powered Electric Vehicle
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
V	Verdadeiro
VEs	Veículos Elétricos

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivos Gerais	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS À PESQUISA	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	BREVE HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	19
2.2	ASPECTOS TÉCNICOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	20
2.2.1	Tecnologias de veículos elétricos	21
2.2.2	Tecnologias de baterias	22
2.2.3	Classificação técnica das estações de carregamento	23
2.3	IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO	24
2.4	CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM	26
2.4.1	Geração distribuída fotovoltaica: Recurso de maximização da CH de VEs	28
3	METODOLOGIA	29
4	ESTUDOS DE CASOS	33
4.1	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA	33
4.2	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS DE CALDAS (MG)	34
4.3	ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO ULTRARRÁPIDA	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	ESTUDO DE CASO 1: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA UFJF	38
5.1.1	Simulação 01: Caso base	38
5.1.2	Simulação 02: Inserção massiva de VEs	41
5.1.3	Simulação 03: Capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos	44
5.1.4	Simulação 04: Aumentando a capacidade de hospedagens com fontes renováveis	46
5.2	ESTUDO DE CASO 2: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS DE CALDAS	50
5.2.1	Simulação 01: Caso base	50
5.2.2	Simulação 02: Inserção massiva de VEs	52
5.2.3	Simulação 03: Capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos	55

5.2.4	Simulação 04: Aumentando a capacidade de hospedagens com fontes renováveis	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.1	CONCLUSÕES	60
6.2	TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, é inevitável notar os impactos gerados pela humanidade no meio ambiente. As últimas décadas foram marcadas por diversas consequências que têm sido relacionadas às mudanças climáticas, tais como: aumento da temperatura global, ondas de calor, chuvas intensas, enchentes, furacões, degelo polar e aumento do nível do mar.

Diante de tal cenário, as nações têm se conscientizado e tomado ações visando mitigar tais impactos. A primeira ação em nível global resultou na Conferência de Estocolmo em 1972, onde 113 países se reuniram para definir a agenda ambiental internacional. E desde então os países unem esforços no intuito de mitigar os impactos no planeta.

Neste contexto, alinhado ao mesmo propósito, o setor elétrico apresenta como principal pauta a transição energética, que consiste na mudança do atual sistema energético, ancorado em combustíveis fósseis, para um modelo limpo e renovável. Entre as principais mudanças, destaca-se o uso de fontes renováveis não poluentes, como: solar, eólica e biomassa [1].

Um dos principais pilares da transição energética está consolidado na eletrificação do setor de transportes. A mudança de carros a combustíveis fósseis por veículos elétricos, apresenta-se como uma rota promissora para uma mobilidade limpa e sustentável.

No Brasil, já foram adotadas algumas medidas de políticas públicas visando alavancar a transição no setor de transportes, tais como: redução ou isenção de impostos, isenção de pedágios, benefícios em sistemas de rodízio e financiamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento associados a mobilidade elétrica.

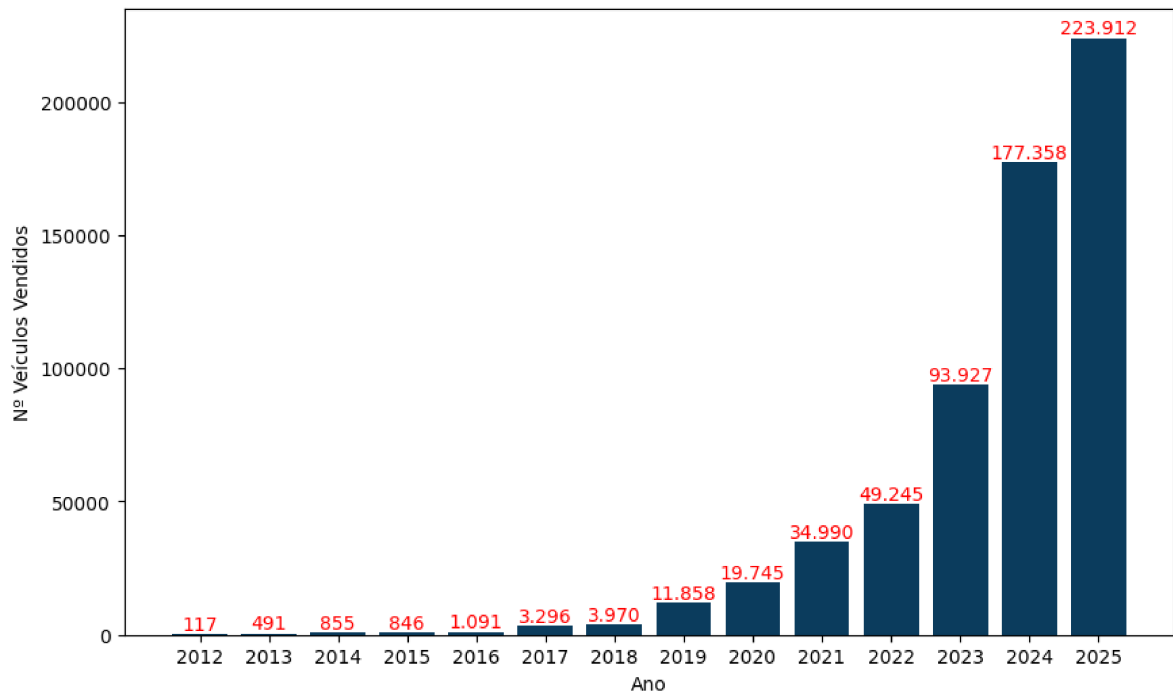
Segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), a frota nacional de veículos leves eletrificados atingiu 621.701 unidades em 2025 [2], enquanto a frota total de automóveis nesta mesma época era de aproximadamente 64 milhões de unidades [3]. Deste modo, a frota de veículos elétricos brasileira ainda é insignificante perante os de combustão interna, entretanto, de acordo com a ABVE, o mercado de eletrificados tem apresentado um crescimento constante nos últimos anos, e em Dezembro de 2025 atingiu 13% de participação no mercado total das vendas domésticas de veículos leves [4].

A comercialização de veículos elétricos no Brasil iniciou-se em 1974, através da montadora brasileira Gurgel, com o lançamento de um modelo 100% elétrico conhecido como "Gurgel Itaipu". O Gurgel Itaipu E150 foi o primeiro veículo elétrico fabricado em território nacional, sendo assim, o ponto de partida das vendas de eletrificados no país. Apesar da ideia promissora, o Gurgel Itaipu não teve uma boa adesão no mercado, tendo algumas poucas unidades vendidas para empresas e órgãos públicos.

Até o ano de 2015 a venda de veículos elétricos no Brasil era incipiente, com poucas centenas de unidades vendidas por ano. Somente a partir da segunda metade da década de

2020, as vendas começaram a crescer de forma mais consistente, batendo recordes ano após ano. A Figura 1 apresenta o histórico de vendas de veículos leves eletrificados no Brasil de Janeiro de 2012 a Dezembro de 2025, mostrando um crescimento expressivo nos últimos anos e indicando assim, os novos rumos e tendências da mobilidade no país [5, 6, 7].

Figura 1 – Vendas de veículos leves eletrificados no Brasil: BEV + PHEV + HEV + HEV FLEX.



Fonte: Dados baseados em ABVE (2026) [2].

Conforme o Plano Decenal de Expansão 2034 (PDE 2034), o Brasil ainda enfrenta barreiras à entrada de veículos elétricos, tais quais, altos custos de veículos, tempo de recarga elevado e infraestrutura de carregamento precária. Porém, apesar das barreiras existentes, projeta-se uma penetração progressiva de eletrificados, elevando-se rapidamente na próxima década [8].

Em uma projeção considerando um cenário de adoção massiva de veículos elétricos, a demanda de energia nacional aumentaria em grande escala, ocasionando grandes impactos nas redes de distribuição. No estudo desenvolvido por Ashish et al [9], abordaram-se os impactos gerados por estações de carregamento na qualidade da energia elétrica. Neste estudo foram observados impactos negativos como, aumento das distorções harmônicas, distúrbios de tensão e elevação das perdas elétricas em transformadores.

Com objetivo de mitigar os impactos gerados pelas estações de carregamento de veículos elétricos, o artigo [10] apresenta um algoritmo que determina os pontos ótimos para alocar tais estações, minimizando as perdas nas linhas e os desvios de tensão.

Outra forma de mitigar os impactos gerados é por meio da incorporação de fontes

de geração distribuída (GD) e sistemas de armazenamento de energia junto a estação de recarga. Em [11] é proposta uma metodologia para otimizar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e de baterias integrados a estações de carregamento ultrarrápidas, visando maximizar a lucratividade de tais empreendimentos.

Atualmente, os principais desafios para uma elevada adoção de VEs no Brasil está em seu custo inicial de aquisição elevado, no alto tempo de recarga e na infraestrutura de recarga insuficiente. Diante de tais desafios, montadoras como a BYD e Tesla têm se empenhado em aprimorar a infraestrutura de recarga em alguns países, além de investirem em melhorias no tempo de carga de seus carregadores. No Brasil, a BYD promete instalar 1.000 carregadores ultrarrápidos até 2027, trazendo assim, melhorias para infraestrutura de recarga existente [12].

Em março de 2025, a BYD lançou uma plataforma de carregamento chamada Super e-Platform, cuja potência de carregamento atinge 1000 kW, sendo capaz de fornecer uma autonomia de 400 km para um VE em apenas 5 minutos [13]. Este tipo de carregamento pode ter uma adoção significativa por parte dos usuários e mesmo o desenvolvimento de equipamentos semelhantes pelas outras empresas.

Neste contexto, o presente trabalho visa: (i) analisar os impactos gerados pelos carregadores ultrarrápidos com base na maior potência anunciada até o momento, (ii) analisar se as redes elétricas brasileiras estão preparadas para receber essa tecnologia de alta potência e (iii) determinar a capacidade de acomodação da rede elétrica para esse modelo de carregador.

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Em meio às preocupações ambientais da sociedade moderna, a eletrificação do setor de transportes tem se consolidado como uma das principais estratégias para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Neste contexto, há uma grande perspectiva de crescimento do uso de veículos elétricos no Brasil e no mundo. Assim, se torna necessário uma adaptação na infraestrutura das cidades, expandindo a infraestrutura de recarga.

Durante décadas, os veículos elétricos foram considerados inviáveis diante dos veículos de combustão interna. Porém, nos últimos anos, mudanças tecnológicas e metas de sustentabilidade tem mudado esta realidade. Os principais desafios para adoção dos veículos elétricos no mercado já foram superados, tais como: alto custo de aquisição, baixa autonomia e elevado tempo de recarga.

A principal barreira para uma boa aceitação dos veículos elétricos por parte dos usuários era o elevado tempo de carregamento das baterias, porém as estações de carregamento rápidas, e as ultrarrápidas recentemente, representam um grande marco tecnológico na difusão de veículos elétricos, ao viabilizar um tempo de carregamento similar

ao abastecimento de um carro à combustão.

Entretanto, a alta penetração de estações de carregamento ultrarrápidas em redes de distribuição de energia elétrica impõem novos desafios técnicos ao planejamento e operação da rede, especialmente se forem consideradas as estações ultrarrápidas, uma vez que essas instalações demandam potências elevadas. O excesso de estações de carregamento ultrarrápidas podem resultar em afundamentos de tensão na rede, sobrecarga nos condutores, sobrecarga nos transformadores e aumento das perdas técnicas.

Considerando os pontos anteriormente apresentados, o presente trabalho de pesquisa torna-se essencial para garantir a operação segura e confiável das redes de distribuição perante a inserção das novas tecnologias de carregamento ultrarrápidas que estão chegando ao mercado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um modelo computacional para a análise dos impactos e capacidade de hospedagem (CH) de estações de carregamento de veículos elétricos ultrarrápidas em redes de distribuição de energia elétrica brasileiras.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar uma coleta de dados das redes de distribuição brasileiras em estudo, por meio da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD). Esta coleta de dados tem como objetivo levantar os dados necessários para a modelagem computacional das redes de distribuição no Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Como exemplo dos dados levantados, pode-se citar: (i) Perfil de carga e geração; (ii) Parâmetros de linhas; (iii) Parâmetros de transformadores e (iv) Topologia da rede de distribuição.
- Modelar as redes de distribuição em estudo no *software OpenDSS*, por meio do pacote *Python* "bdgd2opendss"[14], para simular os impactos e a capacidade de hospedagem das estações de carregamento de veículos elétricos ultrarrápidas.
- Modelar as estações de carregamento de veículos elétricos ultrarrápidas no *OpenDSS*, levando em consideração: (i) Ponto de alocação na rede, (ii) Potência de carregamento, (iii) Número de fases e (iv) Perfil de carregamento.

- Modelar geradores fotovoltaicos no *OpenDSS* e analisar como estes influenciam nos impactos e capacidade de acomodação das estações de carregamento de veículos elétricos. Para tal modelagem, considerou-se: (i) Ponto de alocação na rede, (ii) Potência de pico dos geradores, (iii) Número de fases e (iv) Perfil de geração de acordo com a irradiação no local da instalação.

1.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS À PESQUISA

As publicações relacionadas ao presente trabalho foram apresentadas em revista e congressos internacionais, sendo estas referenciadas a seguir:

SILVA, Caio Cesar Amorim; SILVA, Walquíria Nascimento; DIAS, Bruno Henriques; HERNÁNDEZ, Jesús de la Casa. Ultra-Fast EV Charging Stations in Distribution Grids: Impacts and Hosting Capacity Assessment. In: **VIII Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2025)**. Puebla, Mexico, 10–12 nov. 2025.

C. C. Amorim Silva, W. N. Silva and B. H. Dias, "Photovoltaic Hosting Capacity: An Approach Based on Optimal Power Flow," **2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**, Brasilia, Brazil, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNPS65035.2024.10814476.

C. C. Amorim Silva, W. N. Silva, B. H. Dias, L. W. De Oliveira, M. C. De Almeida and R. F. Teixeira, "Minimization of Electrical Losses in Distribution Transformers on a University Campus," **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, São Bernardo do Campo, Brazil, 2023, pp. 164-171, doi: 10.1109/INDUSCON58041.2023.10374739. keywords: Electric potential;Costs;Decision making;Microgrids;Transformers;Minimization;Loss measurement;Distribution transformers;Electrical losses;Microgrids.

HENRIQUE, Leticia Fritz et. al. Optimal siting and sizing of distributed energy resources in a Smart *campus*. **Electric Power Systems Research**, Volume 217, 2023, 109095, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109095>.

SILVA, Caio Cesar Amorim et.al. Avaliação técnica e econômica da alocação de geração distribuída fotovoltaica em universidade pública: um estudo de caso. In: **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, pp. 46-52, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529490.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo o primeiro um capítulo introdutório, no segundo é apresentada a fundamentação teórica do trabalho. O terceiro capítulo apresenta a metodologia proposta para o cálculo da capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos, bem como a análise dos impactos gerados por tais carregadores. O quarto capítulo apresenta em detalhes as redes de distribuição usadas como estudo de caso. O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos e o sexto capítulo expõe as conclusões obtidas com o presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Apesar de parecer uma ideia inovadora, os veículos elétricos existem há quase 200 anos, antes mesmo dos carros a combustão interna se popularizarem. O primeiro veículo elétrico da história foi desenvolvido pelo inventor e engenheiro húngaro Ányos Jedlik em 1828, logo após a criação do primeiro motor elétrico do mundo, sendo este também de sua autoria [15].

Entre os pioneiros no desenvolvimento dos veículos elétricos, destacaram-se também o ferreiro americano Thomas Davenport e o empresário e químico escocês Robert Anderson. Thomas Davenport construiu em 1834 um veículo elétrico que era aplicado em uma pista circular eletrificada, semelhante a uma pista de autorama. E Robert Anderson apresentou um protótipo de uma carroça com propulsão elétrica. Ambas as invenções funcionavam com baterias não recarregáveis [16].

Nos anos posteriores, devido a limitações na bateria (não recarregáveis), os veículos elétricos não tiveram grandes avanços. O verdadeiro avanço ocorreu em 1859, quando o cientista francês Gaston Planté inventou as baterias recarregáveis de chumbo-ácido, o que significava que o veículo não precisaria estar conectado à rede [15].

Em 1881, o engenheiro francês Gustave Trouvé apresentou um triciclo elétrico na Exposição Internacional de Eletricidade em Paris. O inventor e empresário Andreas Flocken, criou em 1888, na Alemanha, uma charrete elétrica de 4 rodas que atingia uma velocidade de 10 km/h e uma autonomia de cerca de 40 quilômetros [17].

Um grande avanço no desempenho dos veículos elétricos ocorreu entre 1890 e 1900 com o desenvolvimento de duas tecnologias: a frenagem regenerativa, uma tecnologia capaz de recarregar as baterias durante a frenagem do veículo, e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade. Na virada do século XIX, três tecnologias de propulsão concorriam no mercado de automóveis: o veículo elétrico, a vapor e a gasolina [18].

No início do século XX, os veículos elétricos tornaram-se um grande sucesso nas cidades, devido ao advento das baterias recarregáveis. De acordo com os registros históricos da época, os primeiros usuários foram os taxistas da cidade de Nova York. E conforme alguns historiadores, em 1900 um terço dos carros nas estradas americanas eram elétricos [15].

Em 1913, com a introdução da linha de montagem por Henry Ford, alinhado aos avanços na exploração do petróleo, iniciou-se a produção em massa de veículos movidos a gasolina, mudando momentaneamente o foco no setor de transportes. Assim, momentaneamente os veículos elétricos perderam espaço no mercado automobilístico.

Após a Segunda Guerra Mundial, ressurgiu o interesse por veículos elétricos, devido

à escassez de combustíveis durante e após a guerra. Em 1941, a montadora Peugeot lançou seu primeiro modelo de veículo elétrico na França, o Peugeot VLV. E em 1947, foi lançado pela Nissan, no Japão, o Tama: veículo elétrico com baterias removíveis [15].

Após a guerra, os veículos elétricos ganharam força novamente somente nas crises do petróleo entre 1973 e 1979, motivado pela necessidade de reduzir a dependência excessiva dessa fonte energética. Apesar de ter sido o centro das atenções em vários momentos da história, o veículo elétrico ganhou um impulso significativo apenas nas últimas duas décadas, com avanços tecnológicos em baterias de íon-lítio e a conscientização global sobre questões ambientais [17].

A partir de 2010, os veículos elétricos voltaram para o foco do mercado automobilístico, com o lançamento do primeiro carro 100% elétrico de produção em massa mundial, o Nissan Leaf. A partir de 2016, os veículos elétricos passaram a ter um crescimento exponencial, e hoje as vendas de veículos elétricos mundiais já representam 25% das vendas.

2.2 ASPECTOS TÉCNICOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

"Veículo Elétrico é um tipo de veículo propulsionado por um ou mais motor(es) elétrico(s), para transportar ou conduzir pessoas, objetos ou uma carga específica". Diferenciam-se dos veículos usuais pelo fato de utilizarem um sistema de propulsão elétrica e a forma de propulsão tradicional, usa apenas um motor de combustão interna [24].

Os veículos à propulsão elétrica possuem uma mecânica mais simples do que os veículos à combustão interna, pois o mesmo possui muito menos peças móveis e componentes mecânicos complexos. Os veículos elétricos são compostos por quatro componentes básicos, sendo eles:

- **Bateria:** É considerada o "coração" do veículo elétrico, sendo responsável por armazenar a energia elétrica que movimenta o carro, ou seja, é a fonte de alimentação dos motores de indução. Geralmente são fabricadas com células de íons de lítio e possuem uma vida útil estimada pelos fabricantes de 15 a 20 anos, tendo uma degradação anual de aproximadamente 1,8% nos veículos mais modernos.
- **Inversor:** É um dispositivo de conversão, responsável por converter a corrente contínua (CC) da bateria em corrente alternada (CA) para alimentar o motor elétrico, controlando sua velocidade e torque. Os inversores são componentes de eletrônica de potência de alta confiabilidade, tendo uma vida útil estimada pelos fabricantes de 10 a 15 anos.
- **Motor Elétrico:** É uma máquina elétrica responsável por converter a energia elétrica da bateria em energia mecânica, gerando torque e fazendo o carro se mover. Os

motores elétricos são equipamentos de alta eficiência, chegando a atingir rendimentos de 97% de acordo com os fabricantes. Diferente dos carros à combustão, os veículos elétricos possuem uma operação silenciosa e dispensa as caixas de câmbio tradicionais.

- **Sistema de Frenagem Regenerativa:** É um sistema responsável por converter a energia cinética da frenagem do veículo em energia elétrica, usada para recarregar a bateria em tempo real. A frenagem regenerativa aumenta a autonomia do veículo elétrico e reduz o desgaste das pastilhas/disco de freio.

Conhecendo os quatro componentes básicos de um veículo elétrico, torna-se fácil entender seu princípio de funcionamento. Um veículo elétrico funciona através da conversão da energia química armazenada nas baterias em energia elétrica, sendo esta por sua vez usada para alimentar os motores de indução, que são responsáveis por converter a energia elétrica em energia mecânica, possibilitando que o carro se mova.

2.2.1 Tecnologias de veículos elétricos

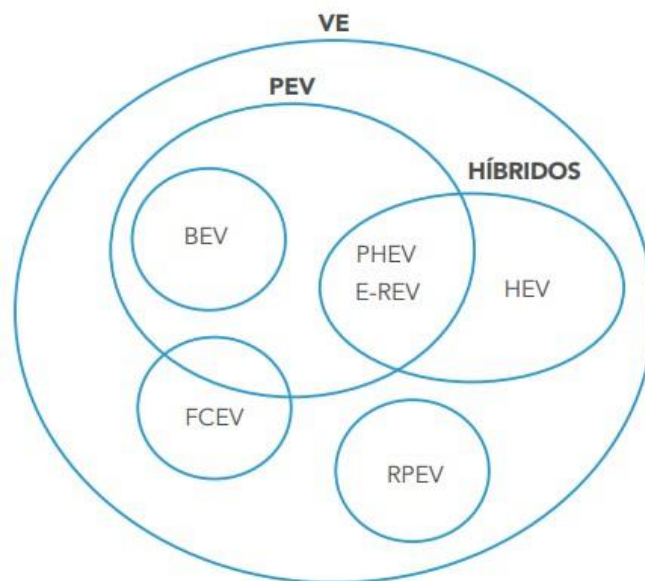
Os veículos elétricos podem ser classificados em seis tipos diferentes, sendo eles: *Battery Electric Vehicles* (BEV), *Híbrid Electric Vehicles* (HEV), *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEV), *Extended Range Electric Vehicle* (E-REV), *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) e *Road Powered Electric Vehicle* (RPEV). A Figura 2 sintetiza as classes e subclasses dos veículos elétricos de acordo com seus tipos.

No contexto do presente trabalho, VEs representam veículos elétricos plug-in (PEVs) de qualquer tipo, ou seja, veículos elétricos alimentados por energia elétrica. Existem três tipos de veículos elétricos plug-in: ***Battery Electric Vehicles***, ***Plug-in Hybrid Electric Vehicles*** e ***Extended Range Electric Vehicle***. Sendo estes detalhados a seguir:

- **Battery Electric Vehicles (BEVs):** São os veículos puramente elétricos, cuja fonte principal de energia é a eletricidade proveniente de fontes externas (a rede elétrica, por exemplo). Os BEVs também podem recarregar suas baterias por meio de frenagem regenerativa. Neste tipo de veículo, a energia é armazenada em uma bateria interna, que alimenta o motor elétrico e propulsiona as rodas [25].
- **Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs):** São os veículos alimentados por gasolina e eletricidade, ou seja, possuem motores elétricos e motor à combustão interna. Este tipo de veículo pode receber eletricidade por meio da frenagem regenerativa ou por meio da conexão a uma fonte externa. Como os PHEVs utilizam eletricidade e os combustíveis convencionais, geralmente garantem uma elevada autonomia [25].

- **Extended Range Electric Vehicle (E-REV):** São os veículos alimentados por gasolina e eletricidade, ou seja, possui motor elétrico e motor à combustão interna. Neste tipo de veículo, o motor principal é o elétrico, que é alimentado diretamente por uma fonte elétrica externa. E o motor à combustão interna fornece energia a um gerador que mantém um nível mínimo de carga na bateria, fazendo com que o E-REV tenha um alcance estendido [25].

Figura 2 – Tipos de veículos elétricos.



Fonte: FGV [25]

2.2.2 Tecnologias de baterias

As baterias são consideradas o "coração" dos veículos elétricos, pois são responsáveis por armazenar a energia e definir a autonomia dos veículos. Além disso, o desempenho e a viabilidade econômica dos veículos elétricos estão diretamente ligados às características das baterias utilizadas em seus sistemas de armazenamento de energia.

Desde a invenção do veículo elétrico em 1828, diferentes tecnologias de baterias vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas. Atualmente, as baterias de íons de lítio são o grande destaque no mercado de veículos elétricos. Este destaque se deve a três fatores principais: Elevada densidade energética, alta eficiência e capacidade de suportar um grande número de ciclos de carga e descarga.

As tecnologias de baterias de íon de lítio para veículos elétricos têm evoluído significativamente nos últimos anos, impulsionando a popularização e a viabilidade desses veículos. Algumas das tecnologias mais comuns e emergentes incluem [26]:

- Íon de Lítio Cobalto (LiCoO₂);

- Íon de Lítio Ferrofosfato (LiFePO_4);
- Íon de Lítio Manganês (LiMn_2O_4);
- Íon de Lítio Níquel Cobalto Alumínio (NCA);
- Íon de Lítio Níquel Manganês Cobalto (NMC).

Além dessas tecnologias estabelecidas, as baterias de estado sólido e as baterias de íon de sódio têm surgido no mercado com a proposta de melhorias significativas em termos de densidade de energia, segurança e vida útil. Essas tecnologias estão destinadas a impulsionar ainda mais a adoção de veículos elétricos ao torná-los mais acessíveis, seguros e eficientes [26].

2.2.3 Classificação técnica das estações de carregamento

As estações de carregamento de veículos elétricos podem ser classificadas de acordo com três critérios: Nível de potência, tipo de corrente e tipo de aplicação. A seguir, são apresentadas em detalhes as classificações das estações de recarga de VEs.

- **Classificação por Nível de Potência:**

- **Estação de Recarga Nível 1:** Esta estação de carregamento é ideal para pequenos veículos elétricos, pois ela proporciona uma recarga lenta, que pode variar de 8 a 20 horas. A tensão nominal nessas estações de carregamento pode ser de 127 ou 220 volts e a potência típica é de até 3,7 kW. As estações de Nível 1 proporcionam um carregamento do tipo AC para os veículos elétricos e possuem aplicações residenciais por meio de tomadas comuns [27].
- **Estação de Recarga Nível 2:** Esta estação de carregamento proporciona uma carga do tipo CA semi-rápida para os veículos elétricos e possui aplicações em residências, condomínios, comércios e estacionamentos. O tempo de recarga pode variar de 2 a 6 horas, a tensão nominal dessas estações podem ser de 220 ou 480 volts e a potência típica é de até 22 kW [27].
- **Estação de Recarga Nível 3:** Esta estação de carregamento proporciona uma carga do tipo CC rápida e ultrarrápida para os veículos elétricos e possui aplicações em rodovias e estações de recarga urbanas. O tempo de recarga pode variar de 5 a 40 minutos, a tensão nominal de carregamento dessas estações podem chegar até 1000 volts CC e a potência típica é de até 1000 kW ou mais.

- **Classificação por tipo de Corrente:**

- **Estações de Recarga CA:** Esta estação de carregamento é alimentada por corrente alternada e a conversão CA/CC é feita internamente no veículo. Este tipo de estação possui um menor custo de infraestrutura.
 - **Estações de Recarga CC:** Esta estação de carregamento é alimentada por corrente alternada e a conversão CA/CC é feita na própria estação, ou seja, no próprio carregador. Esse tipo de estação permite o uso de potências mais elevadas, porém são mais complexas e geram um maior impacto na rede elétrica.
- **Classificação por tipo de Aplicação**
 - **Estações Residenciais:** As estações de recarga residenciais são em sua grande maioria instalações de baixa potência e de uso individual, tendo um perfil de carga bem previsível devido as rotinas sociais.
 - **Estações Comerciais e Públicas:** As estações de recarga comerciais e públicas são em sua grande maioria instalações de potência intermediária e de uso coletivo, tendo assim uma elevada simultaneidade nas recargas.
 - **Eletropostos:** Os eletropostos são instalações de potência elevada e uso instensivo, gerando assim uma alta demanda instantânea da rede elétrica. Ou seja, um eletroposto consiste em um conjunto de estações de recarga com potências elevadas.

2.3 IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Nos últimos anos, o surgimento de tecnologias como geração distribuída, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia trouxeram diversos desafios e mudaram de forma definitiva a maneira em que era concebida o setor elétrico. Os avanços tecnológicos colocaram o setor elétrico diante de uma quebra de paradigmas, em que se mudaram as formas de produção, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica [28].

Hoje o setor elétrico brasileiro, apesar de se manter com geração centralizada, apresenta um alto percentual de geração distribuída (MMGDs). Possuindo ainda consumidores que produzem sua própria energia e com possibilidade de produção remota [28]. Além disso, com o aumento da inserção de veículos elétricos, há um aumento significativo das incertezas de demanda, pois a recarga do veículo depende dos hábitos e comportamentos do consumidor, não tendo locais e horários previsíveis de recarga. Assim, o setor elétrico brasileiro caminha para uma nova caracterização de carga, com maior aleatoriedade.

Os veículos elétricos podem trazer diversos benefícios para a sociedade, tais como: (i) redução na emissão de poluentes, (ii) redução nos custos de manutenção e (iii) redução nos custos de abastecimento. Porém, do ponto de vista do setor elétrico, um elevado nível de penetração deste tipo de tecnologia pode causar inúmeros impactos nas redes de distribuição, afetando de forma severa a qualidade de energia da rede.

A inserção de poucos veículos elétricos nas redes de distribuição normalmente não gera impactos. Entretanto, níveis mais elevados de penetração podem trazer diversos impactos aos sistemas de distribuição, tais como:

- Queda dos níveis de tensão (Subtensão);
- Aumento do desequilíbrio de tensão;
- Flutuação dos níveis de tensão;
- Aumento dos níveis de distorções harmônicas;
- Aumento das perdas elétricas;
- Sobrecarga de linhas (Condutores);
- Sobrecarga de transformadores.

A qualidade da energia elétrica é um dos critérios mais importantes para determinar os impactos dos veículos elétricos nas redes de distribuição, sendo tais critérios definidos através do Módulo 08 dos procedimentos de distribuição, o PRODIST. Tal procedimento é um conjunto de normas elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que visa estabelecer regras técnicas e operacionais para o funcionamento seguro das redes de distribuição no Brasil. O Módulo 08 do procedimento de distribuição trata da qualidade da energia elétrica, definindo os padrões que a energia fornecida deve atender.

No caso de subtensão, a tensão da rede viola a tolerância da faixa crítica definida por norma (Módulo 8 - PRODIST [29]), ocasionando assim, o mau funcionamento de equipamentos, redução da vida útil ou até mesmo a queima. A subtensão é um dos principais efeitos associados à elevada penetração de veículos elétricos em redes de distribuição. E isso ocorre pois, com uma elevada penetração de veículos elétricos na rede há um aumento da corrente que circula pelos alimentadores, ou seja, aumenta a corrente que flui pela impedância equivalente do sistema, logo aumenta também a queda de tensão na rede de distribuição [30].

O desequilíbrio de tensão é causado por estações de recarga monofásicas e bifásicas. Normalmente esse desequilíbrio de tensão é causado por estações de recarga residenciais e comerciais, pois são tipicamente monofásicas ou bifásicas, fazendo com que o desequilíbrio de tensão sofra variações quando os PEVs estão conectados à rede [31].

A flutuação dos níveis de tensão é caracterizada por variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas da tensão instantânea, resultantes do comportamento variável das recargas dos veículos elétricos, especialmente em ambientes com alta simultaneidade e carregamentos de elevada potência. Resumidamente, as flutuações são geradas pelas variações da carga, ou seja, é gerada pela aleatoriedade da conexão dos VEs a rede. O principal efeito da

flutuação de tensão consiste no aparecimento de flickers, que são cintilações de iluminação que provocam uma sensação desagradável para a visão humana [32].

As estações de carregamento de veículos elétricos utilizam conversores baseados em eletrônica de potência para carregar a bateria do veículo. Deste modo, os carregadores são classificados como cargas não-lineares, resultando na injeção de correntes harmônicas na rede elétrica. O nível de emissão harmônica do carregamento do VE depende da topologia do circuito do carregador, da potência, da tensão de alimentação e da impedância da rede [33].

A conexão de veículos elétricos aumenta significativamente a corrente demandada nos alimentadores, elevando assim de forma não linear as perdas elétricas por efeito joule nos condutores e transformadores de distribuição [34].

No caso de sobrecarga, a corrente nominal de operação dos condutores e transformadores são violadas, causando assim, um aumento da temperatura dos materiais isolantes, levando-o a deterioração e podendo ocasionar curto-circuitos ou incêndios [28]. Sendo essa sobrecarga causada pela inserção massiva de veículos elétricos na rede de distribuição.

2.4 CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM

De acordo com Bollen [35], a capacidade de hospedagem pode ser definida como: "A quantidade de geração ou carga que pode ser conectada à rede elétrica sem comprometer a confiabilidade ou a qualidade da energia elétrica fornecida aos demais consumidores". A capacidade de hospedagem está associada a indicadores e parâmetros de qualidade de energia, tais como: subtensões, sobretensões, sobrecarga de transformadores, sobrecarga de alimentadores, desequilíbrios de corrente e tensão, distorções harmônicas, perdas elétricas, entre outros.

Deste modo, a CH de veículos elétricos em redes de distribuição, refere-se ao volume máximo de carregadores que a rede suporta sem violar seus limites operacionais, não colocando em risco sua integridade e a segurança das pessoas.

O primeiro passo no cálculo da capacidade de hospedagem consiste em definir os índices de desempenho que serão utilizados. A escolha destas métricas, assim como a definição de seus limites, impactarão diretamente na quantidade de carregadores suportada pela rede [36].

Na literatura é apresentado um passo a passo para o cálculo da capacidade de hospedagem de estações de recarga em sistemas de distribuição de energia elétrica. Sendo este apresentado a seguir [37]:

1. Definição dos índices de desempenho adotados;
2. Determinação dos limites dos índices de acordo com as regulações e leis vigentes;

3. Cálculo do índice escolhido em função da quantidade de carregadores alocados;
4. Obtenção da capacidade de acomodação da rede.

Atualmente, diversas metodologias são utilizadas para determinar a capacidade de hospedagem de estações de recarga de veículos elétricos em redes de distribuição [38, 39, 40]. Dentre elas, destacam-se: (i) método determinístico, (ii) método estocástico, (iii) método baseado em séries temporais e (iv) métodos baseados em otimização.

De acordo com [46], a metodologia determinística utiliza dados de entrada conhecidos, predefinidos e fixos (carga, geração e perfil de carregamento dos VEs), para produzir um único resultado de capacidade de hospedagem. Essa abordagem é simples, porém amplamente utilizada na literatura clássica, fornecendo uma estimativa conservadora da capacidade de acomodação da rede elétrica. Tal estimativa é considerada conservadora pois a metodologia determinística leva em consideração os piores cenários para o cálculo da capacidade de hospedagem.

A utilização de dados fixos e pré-definidos representam uma desvantagem da metodologia determinística, pois não modelam adequadamente as incertezas reais associadas ao carregamento dos veículos elétricos, tais como: localização imprevisível dos VEs na rede, tipos de carregadores utilizados e a variação no perfil de recarga. Neste contexto, surge a metodologia estocástica, que permite modelar as incertezas de forma probabilística, obtendo-se uma distribuição de valores possíveis para a capacidade de hospedagem. As avaliações estocásticas são frequentemente realizadas em simulações de Monte Carlo, exigindo mais tempo e um esforço computacional maior [47].

Segundo Vicente [48], a metodologia baseada em séries temporais é uma evolução do método determinístico. Este método substitui os valores fixos do método determinístico por medições reais dos sistemas de cargas e gerações para a estimativa da capacidade de acomodação da rede. Os dados de medição podem ser perfis de séries temporais históricas ou sintéticas com uma longa escala temporal e alta resolução. Em resumo, a metodologia baseada em séries temporais consiste na execução de simulações sequenciais de fluxo de potência para uma série de instantes discretos, sendo o resultado de capacidade de hospedagem obtido através do pior caso temporal.

A metodologia baseada em otimização é uma abordagem que formula o problema de capacidade de hospedagem de veículos elétricos através de um modelo matemático de otimização (função objetivo (FOB) e restrições), cujo objetivo pode ser: maximizar a potência de recarga integrada ou o número de veículos elétricos conectados a rede, sem violar as restrições técnicas definidas em norma [49].

2.4.1 Geração distribuída fotovoltaica: Recurso de maximização da CH de VEs

A crescente penetração de veículos elétricos impõem desafios técnicos significativos às redes de distribuição, exigindo estratégias para mitigar os impactos e ampliar a capacidade de hospedagem sem comprometer a confiabilidade e a qualidade da energia. Na literatura são citadas diversas alternativas para maximizar a capacidade de hospedagem em redes de distribuição, tais como [50, 51]:

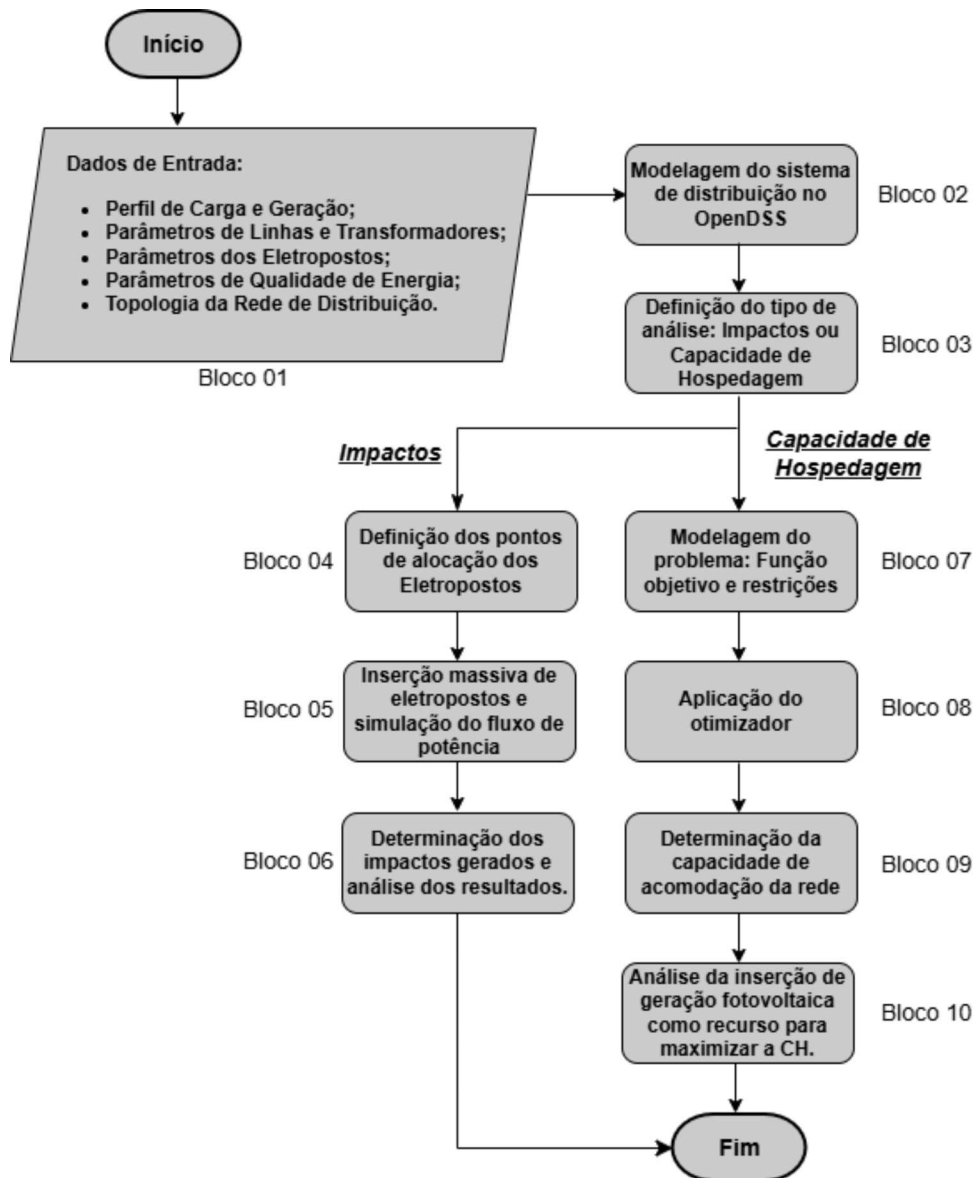
- Recapacitação da rede elétrica;
- Uso de bancos de baterias;
- Uso de filtros harmônicos;
- Uso de banco de capacitores;
- Integração de geração fotovoltaica.

A geração distribuída fotovoltaica tem sido amplamente investigada na literatura como um recurso para aumentar a capacidade de hospedagem de veículos elétricos nas redes de distribuição. A principal contribuição da geração fotovoltaica está associada à redução da demanda líquida vista pela rede elétrica. Do ponto de vista elétrico, a geração solar fotovoltaica local compensa parcialmente o aumento da corrente causado pela recarga dos veículos elétricos, reduzindo assim as quedas de tensão ao longo dos alimentadores e mitigando as sobrecargas em transformadores e condutores. Deste modo, a presença de sistemas fotovoltaicos podem ampliar a margem operacional da rede, permitindo a conexão de um maior número de veículos elétricos antes que os limites técnicos sejam violados [52, 53, 54].

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo principal mensurar os impactos gerados por estações de carregamento ultrarrápidas, a mais avançada do mercado atualmente, e determinar a capacidade de hospedagem das mesmas na rede. A Figura 3 ilustra o fluxograma da metodologia proposta.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por meio da Figura 3, pode-se observar que a metodologia divide-se em 10 blocos, sendo estes:

- **Bloco 01 - Dados de entrada:** O primeiro passo da metodologia proposta consiste em definir os dados de entrada, que incluem informações das cargas, geradores,

condutores, transformadores, estações de recarga, métricas de qualidade de energia e topologia da rede de distribuição em análise. Tais dados são de suma importância para modelagem e simulação da rede no OpenDSS.

- **Bloco 02 - Modelagem da rede de distribuição em software:** Após a definição dos dados de entrada, cria-se um ambiente de simulações por meio do software OpenDSS. Esta modelagem será a base para o estudo de pesquisa proposto.
- **Bloco 03 - Definição do tipo de análise:** Nesta etapa define-se o tipo de análise desejada. Para o presente trabalho foram propostas dois tipos de análise, sendo: Análise dos impactos da inserção massiva de estações de recarga do tipo Super e-Platform e análise da capacidade de acomodação destas estações na rede em estudo.
- **Bloco 04 - Definição dos pontos de alocação das estações de recarga:** A primeira vertente de simulação objetiva determinar os impactos gerados pelas estações de carregamento ultrarrápidas da BYD, e para tal análise, é necessário definir inicialmente os pontos de alocação das estações de recarga. De modo geral, a escolha dos pontos de alocação levam em consideração diversos critérios, tais como: taxa de circulação da região, fatores sociais como equidade de uso e limitações da infraestrutura elétrica disponível. Para este trabalho, a determinação dos pontos de alocação será realizada de modo a considerar os critérios de utilização do Campus por parte dos potenciais usuários e critérios de distribuição de carga da própria rede.
- **Bloco 05 - Inserção massiva de estações de recarga e simulação do fluxo de potência:** Após a definição dos pontos de alocação, aumenta-se progressivamente o número de estações de carregamento de VEs em cada barra até se atingir a saturação da rede. E para obter os resultados desta simulação é realizado sucessivos fluxos de potência por meio do *software* OpenDSS.
- **Bloco 06 - Determinação dos impactos gerados e análise dos resultados:** Realizada a simulação do fluxo de potência, os impactos da inserção massiva de estações de recarga são mensurados e apresentados no bloco 06. Além disso, uma análise dos resultados também é realizada nessa etapa.
- **Bloco 07 - Modelagem do problema: Função objetivo e restrições:**
Nesta etapa é realizada a modelagem matemática do problema, onde define-se a função objetivo (FOB) e as restrições. No problema proposto, a FOB visa maximizar a capacidade de hospedagem de estações de recarga ultrarrápidas na rede de distribuição, enquanto as restrições incluem os limites operacionais da rede elétrica, sendo eles: (i) limites de tensão nas barras, (ii) limites de corrente nos segmentos de linhas e (iii) limites de potência nos transformadores. As equações

de fluxo de potência compõem o conjunto de restrições do problema, porém estas são modeladas intrinsecamente no *software* OpenDSS pelo método de injeção de correntes.

A variável de decisão do problema proposto é a potência demandada pelas estações de recarga ($P_{D,k}^s$), sendo esta uma variável discreta que é definida pelo número de estações alocadas em cada barra.

A função objetivo do problema é apresentada por meio da equação (3.1), enquanto as restrições são representadas pelas equações (3.2), (3.3) e (3.4).

$$\max \sum_{s \in \{a,b,c\}} \sum_{k=1}^{N_{EP}} P_{D,k}^s \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$V_j^{min} \leq V_j^s \leq V_j^{max} \quad (3.2)$$

$$I_l^s \leq I_l^{nom} \quad (3.3)$$

$$P_t \leq P_t^{nom} \quad (3.4)$$

Na equação (3.1), $P_{D,k}^s$ é a potência demandada pela estação de recarga k na fase s, N_{EP} é o número total de estações de recarga alocadas e s é a fase. Na equação (3.2), V_j^s é a tensão da barra j na fase s, V_j^{min} é a tensão mínima permitida por norma na barra j e V_j^{max} é a tensão máxima permitida por norma na barra j.

No equacionamento apresentado em (3.3), I_l^s é a corrente de linha na fase s e I_l^{nom} é a corrente nominal do trecho de linha. Por fim, no equacionamento (3.4), P_t é a potência aparente do transformador e P_t^{nom} é a potência aparente nominal do transformador.

- **Bloco 08 - Aplicação do otimizador:** Realizada a modelagem matemática do problema, necessita-se aplicar uma técnica de otimização para resolução do mesmo. Na presente dissertação considerou-se uma abordagem de busca exaustiva para a resolução do problema de otimização, em virtude de análises iniciais subjetivas, como os critérios sociais. Essa técnica foi escolhida, pois devido aos critérios sociais de alocação das estações de recarga, o espaço de busca fica reduzido. E além disso, para garantir a otimalidade do problema.

- **Bloco 09 - Determinação da capacidade de acomodação da rede:** Após a aplicação do otimizador no problema proposto, encontra-se como resultado a capacidade de hospedagem de estações de recarga ultrarrápidas na rede de distribuição. Nesta etapa é realizada também uma discussão dos resultados obtidos.
- **Bloco 10 - Análise da inserção de geração fotovoltaica como recurso para maximizar a CH:** Nesta etapa é realizada a inserção de geradores fotovoltaicos nas barras onde foram alocadas as estações de recarga, com objetivo de reduzir a demanda líquida vista pela rede de distribuição, aumentando assim, a capacidade de acomodação de estações de recarga nos sistemas de distribuição. Para realizar esta análise da máxima capacidade de hospedagem, repete-se os passos definidos nos blocos 7, 8 e 9, considerando uma nova função objetivo e novas restrições, conforme apresentado nas equações (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10).

De modo análogo, a variável de decisão do problema proposto é a potência demandada pelas estações de recarga ($P_{D,k}^s$), sendo esta uma variável discreta que é definida pelo número de estações alocadas em cada barra.

$$\max \sum_{s \in \{a,b,c\}} \sum_{k=1}^{N_{EP}} P_{liq,k}^s \quad (3.5)$$

Sujeito a:

$$P_{liq,k}^s = P_{D,k}^s - P_{G,k}^s \quad (3.6)$$

$$P_{G,k}^s \leq P_{D,k}^s \quad (3.7)$$

$$V_j^{min} \leq V_j^s \leq V_j^{max} \quad (3.8)$$

$$I_l^s \leq I_l^{nom} \quad (3.9)$$

$$P_t \leq P_t^{nom} \quad (3.10)$$

Na equação (3.5), $P_{liq,k}^s$ é a potência líquida na barra da estação de recarga k na fase s e na restrição apresentada em (3.6), $P_{G,k}^s$ é a potência fotovoltaica gerada na barra da estação de recarga k na fase s.

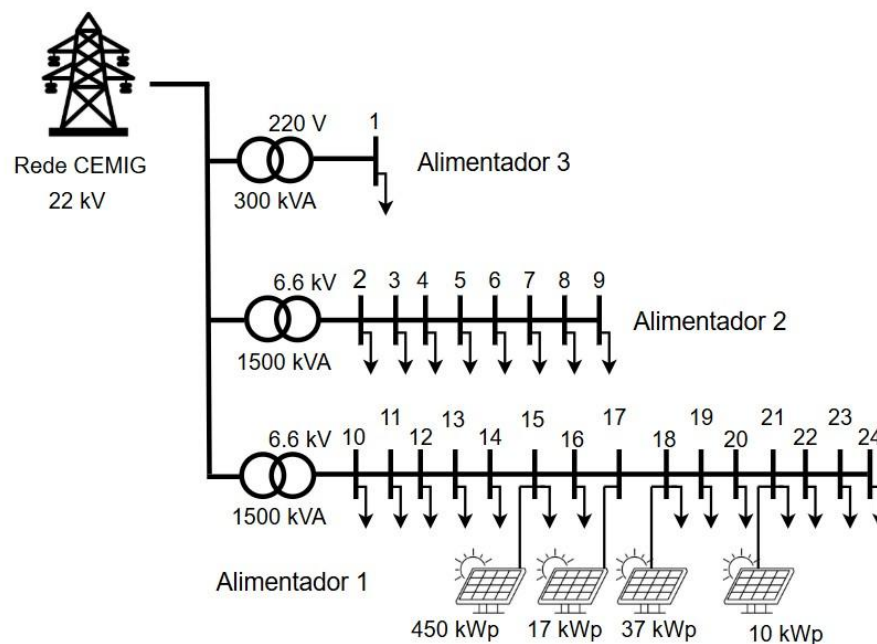
4 ESTUDOS DE CASOS

Afim de validar a metodologia proposta nesta dissertação, adotou-se como estudo de caso duas redes de distribuição reais: (i) a rede elétrica de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e (ii) a rede elétrica de distribuição da cidade de Poços de Caldas, MG. As subseções 4.1 e 4.2 apresentam em detalhes as redes elétricas em estudo.

4.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

Criada em 1960 e localizada no município de Juiz de Fora - MG, a UFJF, conta com 16 unidades acadêmicas e aproximadamente 19 mil alunos [55]. O diagrama unifilar da rede elétrica do campus universitário da UFJF é ilustrado por meio da Figura (4), sendo este, objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição da UFJF.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sistema de distribuição da UFJF é composto por uma subestação principal de 22 kV, com dois alimentadores radiais em nível de tensão de 6,6 kV e um alimentador radial de pequeno porte em 220 V, conforme ilustrado na Figura (4). Tal subestação é atendida pela rede de média tensão (MT) da Companhia Energética de Minas Gerais, a CEMIG.

Para atender a demanda elétrica do campus, a subestação principal conta com três transformadores de potência, totalizando uma capacidade nominal de 3300 kVA. Atualmente, o sistema de distribuição do campus é constituído por: 23 barras de carga, 26 transformadores de potência e 4 usinas fotovoltaicas. A Tabela (1) apresenta o nome

das cargas e geradores, com o número dos seus respectivos barramentos e potência dos transformadores (P_T) associados em kVA.

Tabela 1 – Identificação das cargas e geradores do campus e potência dos respectivos transformadores.

Barra	Nome	P_T	Barra	Nome	P_T
1	Reitoria	300	13	Computação	300
2	Meteorologia	45	14	Modelagem Computacional	112.5
3	ICH	225	15	Engenharia	500
4	Estudos Sociais	225	16	RU	300
5	Planetário	500	17	LABSOLAR	45
6	Iluminação Pública	15	18	Biblioteca	225
7	Odontologia	500	19	CBR	75
8	Comunicação	300	20	IAD	300
9	Bombeiros	150	21	CRITT	300
10	ICB	500	22	FAEFID1	300
11	CGCO1	500	23	FAEFID2	300
12	CGCO2	225	24	FAEFID3	300

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Universidade Federal de Juiz de Fora possui atualmente uma capacidade de geração fotovoltaica de 516,26 kWp divididos entre o Labsolar, Engenharia, Biblioteca e CRITT, cujas potências individualizadas são, respectivamente, 17,3 kWp, 450,45 kWp, 37,73 kWp e 10,78 kWp.

Os dados utilizados para a modelagem do presente estudo de caso foram obtidos por meio de medições in loco. As curvas de demanda e geração foram obtidas por meio da instalação de qualímetros nos pontos de conexão das cargas e geradores com a rede. O monitoramento foi realizado por seis dias completos, sendo disponibilizado no diagnóstico energético do campus [56]. Os dados dos transformadores foram retirados do datasheet do fabricante, enquanto os condutores de média tensão seguem o padrão da concessionária CEMIG. A topologia da rede de distribuição foi levantada por meio de observação e medições in loco.

Por fim, a Tabela (2) apresenta os limites operacionais da rede de distribuição da UFJF, sendo estes, considerados como critérios de convergência para as simulações propostas.

4.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS DE CALDAS (MG)

Poços de Caldas é um município brasileiro do estado de Minas Gerais, localizado na região sudeste do país. Segundo a estimativa do IBGE para 2024, possui 171.533

Tabela 2 – Limites operacionais da rede da UFJF.

Limites Operacionais	Limite Inferior	Limite Superior
Tensão (p.u.)	0,93	1,05
Corrente (A)	0	Capacidade Condutor ($I_{max.}$)
Potência Subestação (kVA)	0	3300

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

habitantes, sendo o 15º município mais populoso do estado e o mais populoso do sul de Minas [57]. O fornecimento de energia elétrica do município é realizado pela distribuidora DME Distribuição (DMED), uma empresa pública 100% municipal que atua na cidade desde 1955.

A distribuidora DMED em Poços de Caldas conta com quatro subestações principais no seu sistema elétrico, sendo elas: (i) subestação de interligação, (ii) subestação saturnino, (iii) subestação osório e (iv) subestação distrito industrial. Essas quatro subestações são compostas por 29 alimentadores de distribuição, sendo o '14_PC3_1' objeto de estudo do presente trabalho. A topologia do alimentador avaliado é ilustrado através da Figura 5.

Figura 5 – Alimentador 14_PC3_1: Subestação saturnino - Poços de Caldas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A rede elétrica em estudo consiste em um alimentador de 14,4 kV com 23.944 unidades consumidoras, 208 transformadores de potência, 93 chaves seccionadoras e 133 geradores fotovoltaicos. Todas as unidades consumidoras são alimentadas através de uma única subestação, representada por um ponto preto na Figura 5. Além disso, a rede em estudo possui uma carga nominal de 5,45 MW.

Por fim, a Tabela (3) apresenta os limites operacionais do alimentador '14_PC3_1', sendo estes, considerados como critérios de convergência para as simulações propostas.

Tabela 3 – Limites operacionais do alimentador 14_PC3_1.

Limites Operacionais	Limite Inferior	Limite Superior
Tensão (p.u.)	0,93	1,05
Corrente (A)	0	Capacidade Condutor ($I_{max.}$)
Potência Subestação (kVA)	0	10.000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3 ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO ULTRARRÁPIDA

A estação de recarga utilizada para as simulações deste trabalho é conhecida como BYD Super e-Platform, lançada oficialmente em 17 de março de 2025 pela BYD em um evento realizado na sede da empresa em Shenzhen na China. A Figura 6 apresenta a Super e-Platform e inaugura a era de 1MW de recarga de veículos elétricos no mundo, um feito que marca a história da eletromobilidade mundial. Com este lançamento, a BYD conseguiu romper a barreira do "Tempo de abastecimento" dos veículos elétricos, tornando o tempo de recarga equiparável ao tempo de abastecimento de um veículo a combustão. Este carregador possui potência suficiente para fornecer uma autonomia de 400 km em apenas 5 minutos de recarga [58].

A compatibilidade com o carregamento de 1000 kW não depende apenas de um plug, mas de uma arquitetura interna específica que a BYD introduziu no mercado em 2025. Atualmente apenas dois modelos de veículos elétricos são compatíveis com o carregamento ultrarrápido da Super e-Platform, que são: Han L e Tang L. Os modelos de carros compatíveis são apresentados através da Figura 7.

Figura 6 – Evento de lançamento da Super e-Platform da BYD de 1000 kW.



Fonte: CANAL VE [58].

Figura 7 – Modelos compatíveis: Han L e Tang L.



Fonte: R7 [59].

A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas do carregador de 1000 kW, o Super e-Platform. Esta tabela traz os dados necessários para o cálculo da capacidade de hospedagem dos carregadores ultrarrápidos em sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo assim, dados de entrada para o estudo de caso do presente trabalho.

Tabela 4 – Especificações técnicas do carregador Super e-Platform da BYD.

Parâmetro Técnico	Especificação
Potência de Pico (kW)	1.000
Tensão de Saída - Vcc (V)	1.000
Corrente de Saída - Icc (A)	1.000
Velocidade máx. de Recarga (km/s)	2
Taxa de carregamento	10C

Fonte: Dados baseados em BYD (2025) [60].

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos impactos associados à elevada penetração de carregadores ultrarrápidos nas redes de distribuição em estudo, bem como os resultados do cálculo da capacidade de hospedagem dos mesmos.

As simulações deste trabalho foram realizadas por meio da integração do software OpenDSS e da linguagem de programação Python, sendo a comunicação entre eles estabelecida por meio do pacote `py-dss-interface`. O algoritmo desenvolvido em Python para as simulações segue o passo a passo descrito na metodologia proposta.

5.1 ESTUDO DE CASO 1: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA UFJF

Nas simulações a seguir, considerou-se: curvas de carga e geração obtidas por meio de medições *in loco*, carregadores ultrarrápidos modelados com potência constante (conservador ou pior cenário) e parâmetros de qualidade de energia definidos por meio dos procedimentos de distribuição, tais como: Níveis de tensão e Desequilíbrio de tensão.

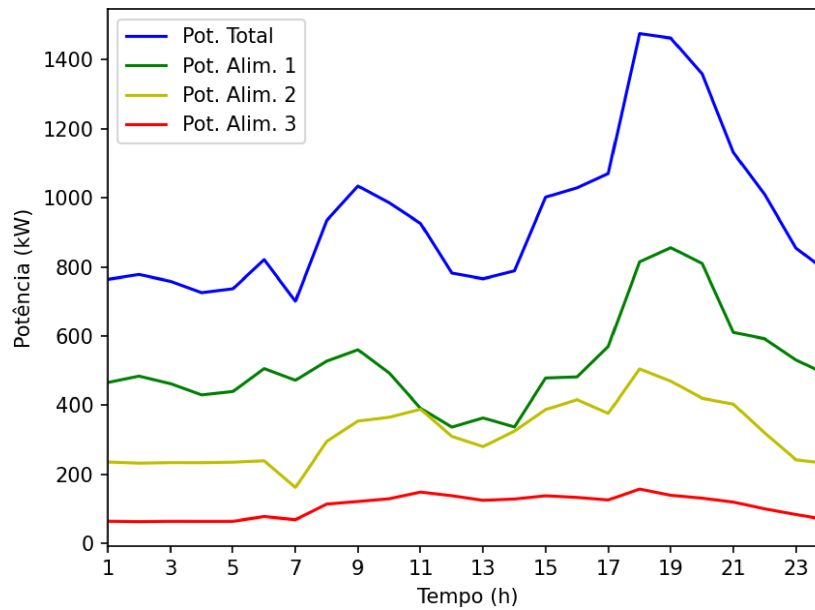
5.1.1 Simulação 01: Caso base

A primeira simulação realizada na rede de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora consiste em um fluxo de potência do caso base (simulação do estado atual da rede). A simulação em questão foi conduzida com o propósito de conhecer o comportamento da rede antes da inserção de carregadores ultrarrápidos. Para isto, considerou-se a curva de carga típica de um dia útil do Campus, conforme apresentada na Figura 8. Tal curva de carga foi obtida por meio de medição *in loco*, através de uma campanha de medição. Esta curva de carga foi medida nos alimentadores da subestação e já consideram o abatimento da geração solar presente no Campus.

Com o propósito de reduzir o tempo computacional das simulações, adotou-se o cenário mais conservador, ou seja, o horário de maior carga na rede. Sendo assim, os resultados foram obtidos para o horário de 18:00.

Os resultados obtidos para o caso base são apresentados por meio das Tabelas (5), (6) e por meio da Figura 9. Dentre os resultados obtidos, observa-se: (i) Tensões máximas e mínimas da rede por fase, (ii) Correntes no início do alimentador, (iii) Potência demandada na subestação, (iv) Perdas totais do circuito, (v) Perdas nas linhas, (vi) Perdas elétricas nos transformadores, (vii) Desequilíbrio de tensão nas barras onde serão alocadas as estações de recarga e (viii) Magnitude de tensão em p.u. nas barras onde serão alocadas as estações de recarga.

Figura 8 – Curva de carga típica do Campus - Dia útil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 5 – Resultados sem estações de carregamento ultrarrápidas.

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9705		0,9997	
B	0,9712		0,9997	
C	0,9732		0,9997	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
1	73,9606	71,0551	74,1170	225
2	46,1372	44,4585	44,0802	225
3	430,5418	414,1668	406,0934	700
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
1.505,9525			3.300	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
15,6347 kW		10,9913 kW		4,6434 kW
1,06 %		0,74 %		0,31 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 6 – Índice da barra em estudo: Caso base.

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
8	0,10	0,9811	0,9818	0,9829
16	0,07	0,9823	0,9831	0,9836
25	0,07	0,9915	0,9919	0,9928
26	0,07	0,9916	0,9919	0,9928

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

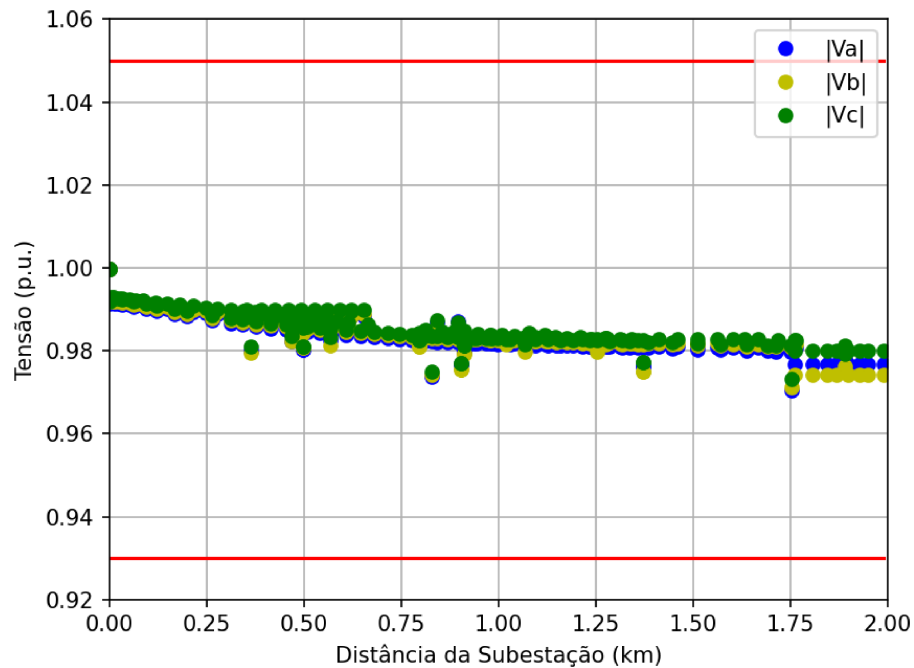
Os resultados apresentados nas Tabelas (5) e (6), demonstram que sob condições de pico de carga, os alimentadores da Universidade Federal de Juiz de Fora operam dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST. Tendo todas as tensões de regime permanente dentro da faixa de 0,93 a 1,05 p.u., não possuindo sobrecarga em linhas e transformadores e com níveis de desequilíbrio de tensão abaixo de 2%, conforme estabelecido nos procedimentos de distribuição. O fator de desequilíbrio (FD) de todas as barras são apresentados por meio da Tabela (6).

De acordo com a Tabela (5), observa-se que para o caso base, a subestação encontra-se em um nível de carregamento de 45,63%, tendo espaço para integração de mais cargas na rede. Além disso, a Tabela (5) mostra que no caso base, os alimentadores da Universidade Federal de Juiz de Fora apresentam perdas técnicas de aproximadamente 15,63 kW, o equivalente a 1,06% da demanda total no momento de carga máxima. Essa porcentagem está dentro dos níveis aceitáveis para redes de distribuição em média tensão.

As barras escolhidas para a alocação das estações de carregamento ultrarrápidas foram: "Barra 8", "Barra 16", "Barra 25" e "Barra 26". A Barra 8 corresponde à faculdade de comunicação, a barra 16 corresponde ao restaurante universitário e as barras 25 e 26 foram criadas para os carregadores alocados no estacionamento central do Campus. Sendo a barra 25 criada no início do alimentador 1 (saída da subestação) e a barra 26 criada no início do alimentador 2. O motivo da escolha será abordado em detalhes na simulação 2. Na atual simulação, essas barras são consideradas apenas para conhecer as condições iniciais de tensão e desequilíbrio de tensão.

Por fim, obteve-se também como resultado o perfil de tensão do caso base para o horário de 18:00. Sendo este gráfico apresentado por meio da Figura 9.

Figura 9 – Perfil de tensão: Caso Base (18 hrs).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.2 Simulação 02: Inserção massiva de VEs

No estudo de caso da Universidade Federal de Juiz de Fora, os pontos de alocação dos carregadores ultrarrápidos foram definidos de modo a gerar uma maior acessibilidade para os potenciais usuários. Deste modo, adotou-se três pontos para a alocação dos carregadores, sendo eles: (i) Reitoria, (ii) Restaurante Universitário e (iii) Faculdade de Comunicação.

A Reitoria é um ponto central da Universidade, sendo assim, de fácil acesso a todas as pessoas. O Restaurante Universitário, apesar de não estar na região central do Campus, apresenta um alto fluxo de pessoas principalmente nos horários de almoço e jantar. E por fim, a faculdade de comunicação foi escolhida para que todas as regiões do Campus fossem cobertas por pelo menos um carregador ultrarrápido.

Para mensurar os impactos gerados pelas estações de carregamento ultrarrápidas, adotou-se uma linha de simulação com uma inserção massiva desta nova tecnologia de carregamento. Para realizar tal simulação, alocou-se uma potência de carregadores ultrarrápidos equivalentes a 265% da demanda máxima do alimentador em estudo. Deste modo, acomodou-se um carregador ultrarrápido em cada barra, totalizando uma potência de 4.000 kW, conforme apresentado na Tabela (7).

Tabela 7 – Quantidade de carregadores alocados: Inserção massiva (UFJF).

Estações de carregamento alocadas		
Barra	Nº Carregadores	Potência Total Alocada (kW)
8	1	1.000
16	1	1.000
25	1	1.000
26	1	1.000

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na presente simulação obteve-se os seguintes resultados: (i) Tensões e correntes de regime permanente do alimentador, (ii) Potências na subestação, (iii) Perdas elétricas da rede, (iv) Índices das barras em estudo e (v) Perfil de tensão ao longo do alimentador. Tais resultados são apresentados nas Tabelas (8), (9) e na Figura 10.

Através das Tabelas (8), (9) e da Figura 10, pode-se observar que sob condições de inserção massiva de carregadores ultrarrápidos, os alimentadores de média tensão da Universidade Federal de Juiz de Fora operam fora dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 8 – Resultados da inserção massiva de estações de carregamento ultrarrápidas.

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9366		0,9988	
B	0,9341		0,9989	
C	0,9379		0,9988	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
1	255,9799	253,1862	256,3819	225
2	227,4635	225,6865	225,6343	225
3	430,9093	414,5186	406,4399	700
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
5.655,6521			3.300	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
138,3896 kW		95,7053 kW		42,6843 kW
2,48 %		1,72 %		0,77%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 9 – Índices das barras em estudo: Inserção massiva.

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
8	0,10	0,9410	0,9419	0,9427
16	0,08	0,9507	0,9518	0,9520
25	0,07	0,9763	0,9768	0,9775
26	0,07	0,9761	0,9767	0,9774

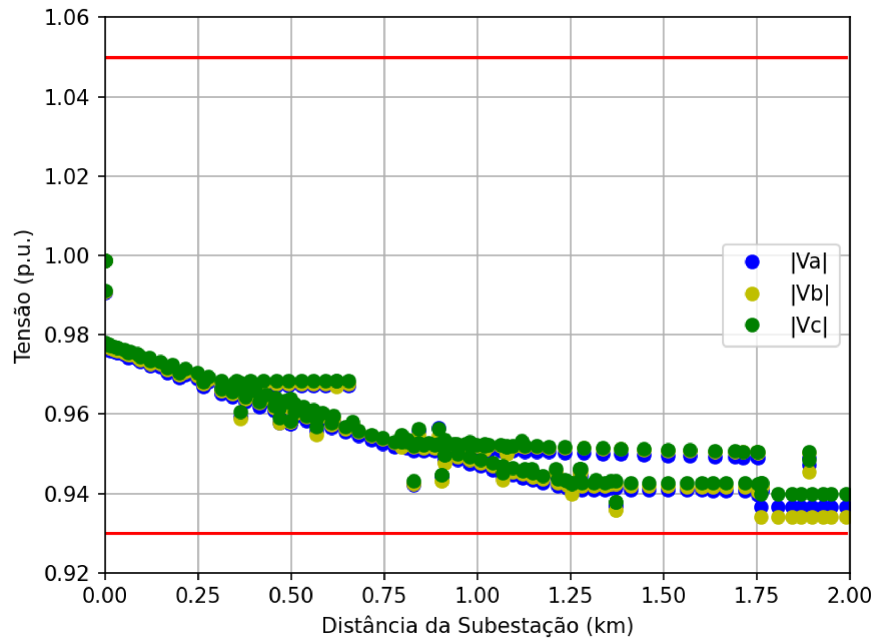
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com a Tabela (8), observa-se que para o caso de inserção massiva de carregadores ultrarrápidos, a rede elétrica apresenta problemas de sobrecarga nas linhas e transformadores. Os transformadores da subestação atingiram um nível de sobrecarga de aproximadamente 71,38%, enquanto os condutores de média tensão dos alimentadores atingiram um nível de sobrecarga de até 13,94%.

Analisando o perfil de tensão ao longo do alimentador (Figura 10), pode-se observar que a alocação dos carregador ultrarrápidos impactaram de maneira significativa os níveis de tensão das barras, levando-os a valores próximos do limite aceitável por norma (0,93 p.u.). Deste modo, conclui-se que a alocação dos quatros carregadores não fez a rede operar fora dos limites operacionais de tensão definidos nos procedimentos de distribuição, porém a inserção de mais carregadores pode levar a rede a condições inadequadas de operação.

Um outro impacto gerado pela inserção massiva de carregadores ultrarrápidos foi o aumento das perdas elétricas. Nesta simulação observou-se um aumento de 785,14% das perdas totais do alimentador quando comparado ao caso base. Por fim, observa-se por meio da Tabela (9) que o desequilíbrio de tensão sofreu impactos mínimos quando comparado ao caso base. E isso se deve ao fato das estações de carregamento alocadas serem trifásicas e equilibradas.

Figura 10 – Perfil de tensão: Inserção massiva (18 hrs).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.3 Simulação 03: Capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos

Esta simulação visa determinar a capacidade de hospedagem de estações de carregamento ultrarrápidas na rede de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora, ou seja, o número máximo de carregadores que podem ser conectados sem violar os limites operacionais estabelecidos nos procedimentos de distribuição.

Seguindo a metodologia proposta e adotando o cenário mais conservador (Pico de carga do alimentador), obteve-se os resultados de capacidade de hospedagem da rede, sendo estes apresentados por meio da Tabela (10). O algoritmo desenvolvido para a simulação convergiu quando o limite de potência da subestação foi excedido, sendo escolhido o número de estações da simulação anterior.

Tabela 10 – Resultado da capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos: UFJF.

Capacidade de Hospedagem da Rede				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
18:00	1.000	F	F	V

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Apesar da escolha de quatro barras para a alocação das estações de recarga ultrarrápidas, o algoritmo desenvolvido mostrou que a rede de distribuição do Campus é capaz de acomodar um único carregador de 1.000 kW, sendo este alocado na barra 26, ou seja, no estacionamento central da Universidade (Reitoria).

Conforme apresentado na Tabela (10), o sistema de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora pode acomodar uma única estação de carregamento ultrarrápida, sendo o fator limitante de alocação a potência na subestação principal. Pode-se observar também que para a rede elétrica do Campus nenhuma violação de tensão e correntes foi observada. Com a solução encontrada, executou-se um fluxo de potência na rede para determinar o estado operacional dos alimentadores com a unidade do carregador ultrarrápido alocado. Tais resultados são apresentados por meio das Tabelas (11), (12) e da Figura 11.

Tabela 11 – Resultados da inserção de carregadores: Caso limítrofe de hospedagem (UFJF).

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9678		0,9995	
B	0,9686		0,9995	
C	0,9706		0,9995	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
1	74,1566	71,2442	74,3141	225
2	134,4560	132,5985	132,3521	225
3	430,6142	414,2362	406,1616	700
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
2.511,5331			3.300	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
21,1369 kW		11,5166 kW		9,6203 kW
0,85 %		0,46 %		0,39 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 12 – Índices das barras em estudo: Caso limítrofe de hospedagem (UFJF).

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
8	0,10	0,9782	0,9790	0,9800
16	0,07	0,9797	0,9806	0,9810
25	0,07	0,9890	0,9894	0,9902
26	0,07	0,9888	0,9892	0,9900

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

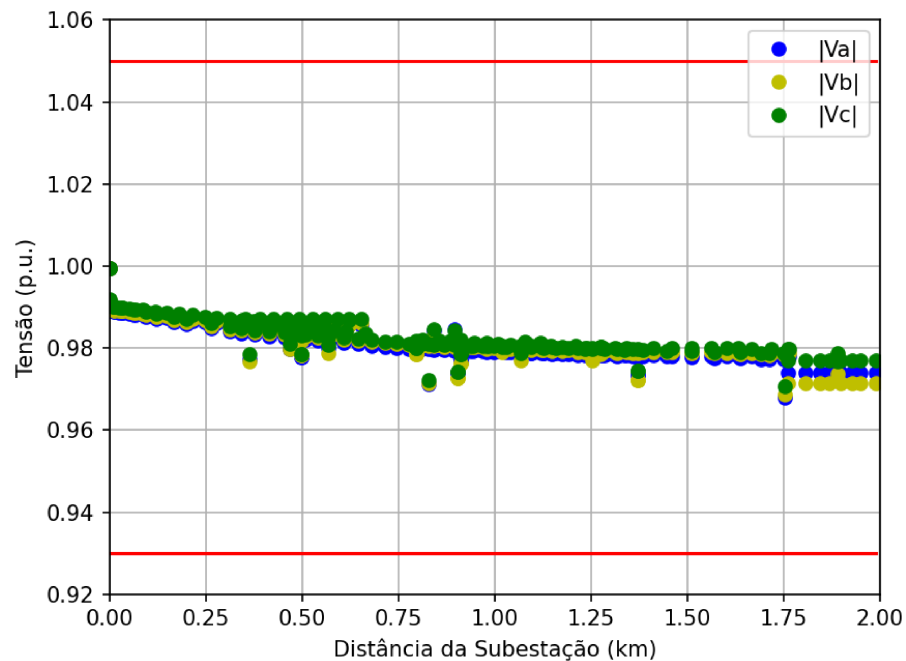
De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas (11) e (12), ao alocar o carregador ultrarrápido no Campus, os alimentadores da rede elétrica operam dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST.

Observando o perfil de tensão (Figura 11) e comparando com o caso base, pode-se concluir que a estação de recarga ultrarrápida gerou um impacto nas tensões de regime

permanente, reduzindo as tensões em algumas barras do circuito. Tal impacto deve ser considerado, porém não teve uma grande relevância devido a proximidade entre a estação de recarga e a subestação do Campus, não acarretando em quedas de tensões significativas. Ainda é válido destacar que a faixa admissível pelo PRODIST ficou longe de ser violada.

As correntes e potência na subestação tiveram um aumento significativo devido a inserção da estação de recarga no Campus, porém nenhuma delas atingiu seus valores limites com a conexão do carregador. As perdas técnicas também sofreram impactos com a conexão do carregador no Campus, aumentando de 15,6347 kW para 21,1369 kW, o que corresponde a um aumento de 35,19%.

Figura 11 – Perfil de tensão: Caso limítrofe de hospedagem (18 hrs).

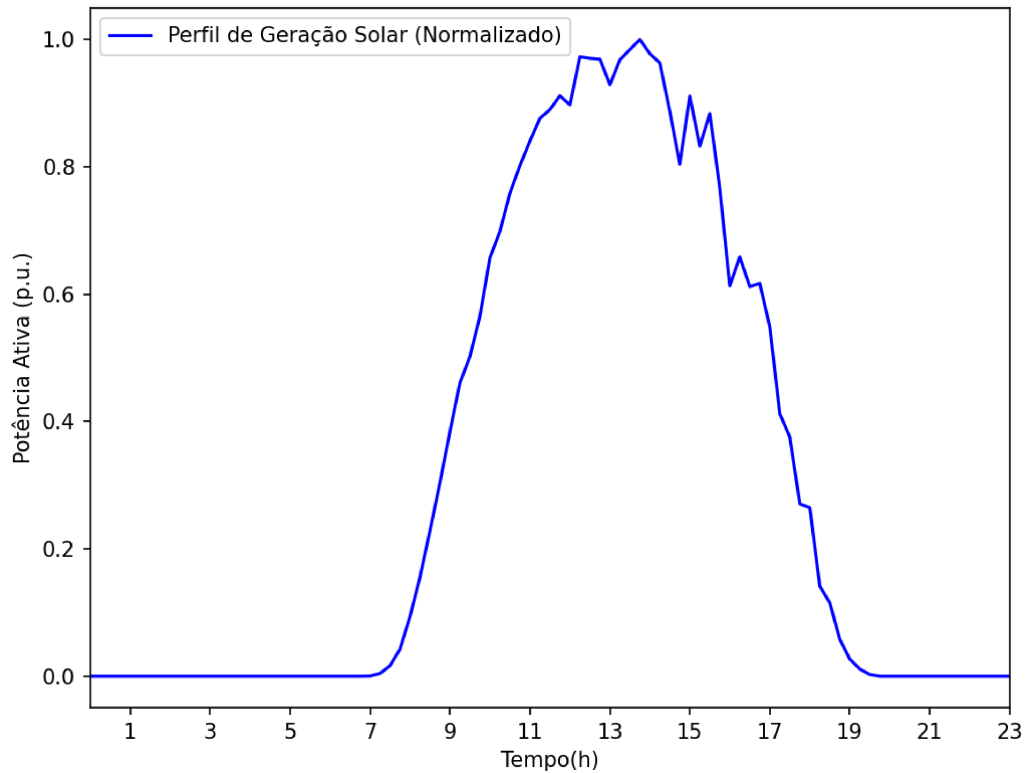


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.4 Simulação 04: Aumentando a capacidade de hospedagens com fontes renováveis

Com objetivo de avaliar como a geração solar fotovoltaica pode contribuir para a integração de veículos elétricos às redes de distribuição, executou-se um fluxo de potência na rede em estudo, considerando a inserção de geradores fotovoltaicos nas barras onde serão alocados os carregadores ultrarrápidos. Para tal simulação, considerou-se a curva de geração solar apresentada na Figura 12. Esta curva de geração solar foi obtida por meio de medição in loco, através do Laboratório Solar Fotovoltaico (LABSOLAR).

Figura 12 – Perfil de geração solar da Universidade Federal de Juiz de Fora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Através da Figura 12, pode-se observar que para o horário de 18:00 a geração solar fotovoltaica no Campus da UFJF é muito baixa, sendo praticamente insignificante como ferramenta de maximização de capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos. Portanto, neste contexto só faz sentido avaliar a integração de geração solar fotovoltaica em outros horários.

Sendo assim, se faz necessário migrar a análise de capacidade de acomodação do cenário mais conservador para um outro conceito definido na literatura: "Capacidade de Hospedagem Flexível". Essa abordagem utiliza de tecnologias inteligentes para gerenciar a potência dos carregadores dinamicamente em tempo real, ajustando a potência do carregador com base no consumo do alimentador, evitando assim sobrecarga de condutores e transformadores. Nesta nova abordagem, cada horário do dia tem um valor de capacidade de hospedagem.

Afim de explorar a capacidade de hospedagem flexível de carregadores ultrarrápidos, calculou-se a capacidade de acomodação da rede com e sem geração solar fotovoltaica para o horário de 13:00. E os resultados obtidos são apresentados por meio da Tabela (13). Para as simulações com geração solar fotovoltaica, considerou-se que a potência de geradores alocados não pode superar a demanda contratada do Campus, considerada como 1.400 kW.

Tabela 13 – Resultados de capacidade de hospedagem com e sem fotovoltaica (UFJF).

Capacidade de Acomodação da Rede: Sem Fotovoltaica				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
13:00	2.000	F	F	V
Capacidade de Acomodação da Rede: Com Fotovoltaica				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
13:00	3.000	F	F	V

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nas simulações sem geração solar fotovoltaica, obteve-se como solução uma capacidade de hospedagem de duas estações de carregamento ultrarrápidas, sendo uma delas alocada na Reitoria e a outra alocada no Restaurante Universitário, conforme apresentado na Tabela (14). E na simulação com geração solar fotovoltaica, obteve-se como resultado uma capacidade de acomodação de três carregadores, sendo eles alocados na Reitoria, Restaurante Universitário e Faculdade de Comunicação. Em cada um destes três pontos alocou-se também 295 kWp de geradores fotovoltaicos.

Tabela 14 – Quantidade de carregadores alocados: Sem e com fotovoltaica.

Estações de carregamento alocadas: Sem Fotovoltaica			
Barra	Nº Carregadores	Potência de Carregador Alocada (kW)	Potência Fotovoltaica Alocada (kWp)
16	1	1.000	-
26	1	1.000	-
Estações de carregamento alocadas: Com Fotovoltaica			
Barra	Nº Carregadores	Potência de Carregador Alocada (kW)	Potência Fotovoltaica Alocada (kWp)
8	1	1.000	295
16	1	1.000	295
26	1	1.000	295

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por meio da Tabela (15), pode-se observar que para ambos os casos (Sem e com geração solar), ao alocar as estações de recarga ultrarrápidas, os alimentadores do Campus Universitário operaram dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST. Ou seja, para ambos os casos, os limites de tensão, corrente e potência não foram violados.

Tabela 15 – Resultados do caso limítrofe de hospedagem: Sem e com fotovoltaica.

Tensões					
Simulação		V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
Sem Fotovoltaica		0,9678		0,9995	
Com Fotovoltaica		0,9630		0,9994	
Correntes					
Simulação	Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
Sem Fotovoltaica	1	124,1035	123,0028	124,7323	225
Sem Fotovoltaica	2	114,0691	112,6874	113,3432	225
Com Fotovoltaica	1	98,3231	97,1925	98,9057	225
Com Fotovoltaica	2	154,0127	152,5636	153,2460	225
Potências					
Simulação		$P_{subestacao}$ (kVA)		P_{max} (kVA)	
Sem Fotovoltaica		2.831,6114		3.300	
Com Fotovoltaica		2.988,8242		3.300	
Perdas Técnicas					
Simulação		Perdas Totais			
Sem Fotovoltaica		36,8583 kW		1,32 %	
Com Fotovoltaica		49,8309 kW		1,69 %	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

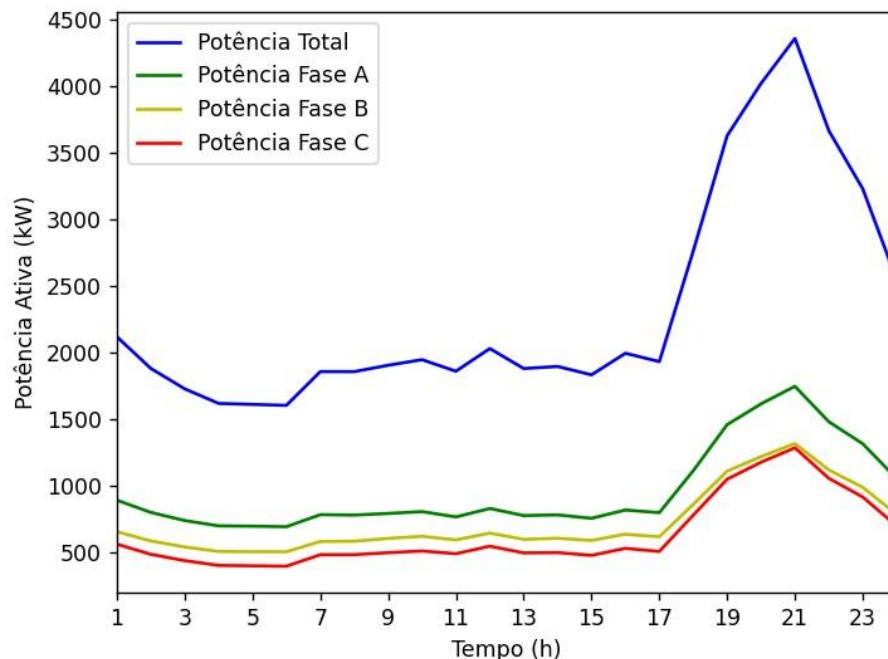
5.2 ESTUDO DE CASO 2: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS DE CALDAS

Nas simulações a seguir, considerou-se: curvas de carga e geração obtidas por meio dos dados da Base de Dados Geográfica da Distribuidora, estações de carregamento ultrarrápidas com potência constante e parâmetros de qualidade de energia definidos por meio dos procedimentos de distribuição.

5.2.1 Simulação 01: Caso base

Com objetivo de conhecer o comportamento da rede antes da inserção das estações de carregamento ultrarrápidas, executou-se um fluxo de potência no sistema de distribuição em análise. Para tal simulação, considerou-se a curva de carga típica de um dia útil de verão do alimentador 14_PC3_1, apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Curva de carga típica do alimentador 14_PC3_1: Dia útil de verão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com o propósito de reduzir o tempo computacional das simulações, adotou-se o cenário mais conservador, ou seja, o horário de maior carga na rede. Sendo assim, os resultados foram obtidos para o horário de 21:00.

Para o caso base, obteve-se os seguintes resultados: (i) Tensões máximas e mínimas da rede por fase, (ii) Correntes no início do alimentador, (iii) Potência demandada na subestação, (iv) Perdas totais do circuito, (v) Perdas nas linhas, (vi) Perdas elétricas nos transformadores, (vii) Desequilíbrio de tensão nas barras onde serão alocadas as estações de recarga e (viii) Magnitude de tensão em p.u. nas barras onde serão alocadas as estações de recarga. Todos esses resultados são apresentados através das Tabelas (16) e (17).

Tabela 16 – Resultados sem estações de carregamento ultrarrápidas.

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9550		1,0000	
B	0,9565		1,0000	
C	0,9690		1,0000	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
14_PC3_1	220,8115	188,2447	159,8970	400
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
4.686,6319			10.000	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
218,4643 kW		152,3389 kW		66,1254 kW
5,01 %		3,49 %		1,52 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 17 – Índices das barras em estudo: Caso base.

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
179941	0,51	0,9708	0,9734	0,9793
656631	0,45	0,9742	0,9768	0,9817

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados apresentados nas Tabelas (16) e (17), demonstram que sob condições de pico de carga, o alimentador 14_PC3_1 de Poços de Caldas opera dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST.

De acordo com a Tabela (16), observa-se que para o caso base a tensão máxima registrada na rede é de 1,00 p.u, enquanto o nível mínimo de tensão é de 0,95 p.u. Deste modo, é notável um funcionamento adequado da regulação de tensão da rede antes da integração das estações de carregamento ultrarrápidas. Além disso, a Tabela (16) mostra que no caso base, a subestação encontra-se em um nível de carregamento de 46,86%, tendo um espaço significativo para integração de mais cargas na rede.

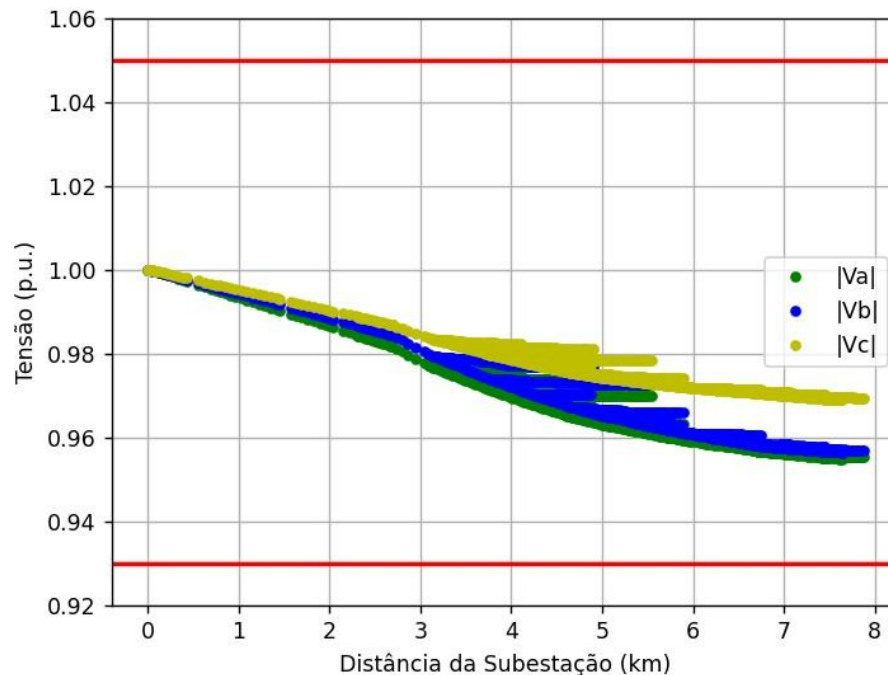
A análise das perdas técnicas mostram que o alimentador 14_PC3_1 de Poços de Caldas dissipa aproximadamente 218,46 kW, o equivalente a 5,01% da demanda total no momento de carga máxima. Essa porcentagem está dentro dos níveis aceitáveis para rede de distribuição em média tensão.

As barras escolhidas para a alocação das estações de carregamento ultrarrápidas foram: "179941" e "656631". O motivo da escolha será abordado em detalhes na simulação 2. Na atual simulação, essas barras são consideradas apenas para conhecer as condições

iniciais de tensão e desequilíbrio de tensão. E por meio da Tabela (17), pode-se observar que ambas as barras estão obedecendo os limites operacionais do PRODIST. Tendo níveis de tensão na faixa adequada (Entre 0,93 e 1,05 p.u.) e um desequilíbrio inferior a 2%.

Por fim, obteve-se também como resultado o perfil de tensão do caso base para o horário de 21:00. Este gráfico é apresentado por meio da Figura 14.

Figura 14 – Perfil de tensão: Caso Base (21 hrs).



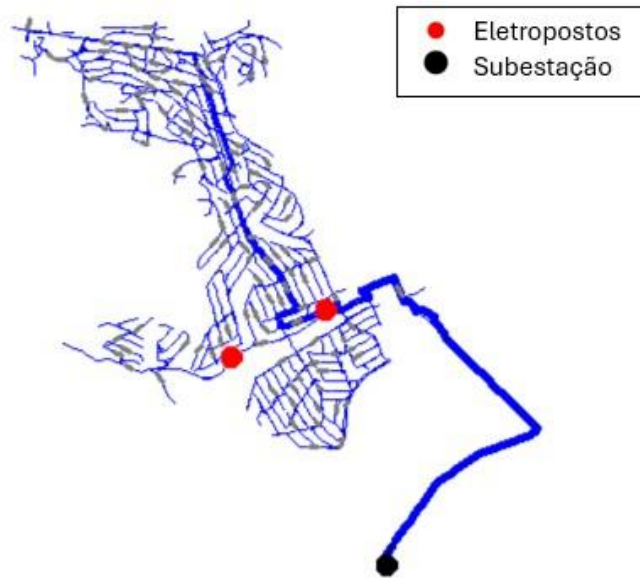
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.2 Simulação 02: Inserção massiva de VEs

No estudo de caso da Universidade Federal de Juiz de Fora, os pontos de alocação das estações de recarga foram definidos levando em consideração diversos critérios, tais como: taxa de circulação da região, fatores sociais como equidade de uso e limitações da infraestrutura elétrica disponível. Por outro lado, o estudo de caso de Poços de Caldas traz novas considerações sobre a escolha dos pontos alocados.

Para esta nova simulação considerou-se, uma alocação de estações de carregamento ultrarrápidas próximas aos postos convencionais, aproveitando assim, o fluxo de veículos em pontos já considerados como viáveis pela própria população. No alimentador 14_PC3_1 existem 2 postos convencionais, conforme apresentado pela Figura 15. Deste modo, as barras de média tensão disponíveis para a alocação das estações de recarga ultrarrápidas são: (i) Barra 179941 e (ii) Barra 656631.

Figura 15 – Pontos de alocação das estações de carregamento ultrarrápidas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para mensurar os impactos gerados pelas estações de carregamento ultrarrápidas adotou-se uma linha de simulação com uma inserção massiva desta nova tecnologia de carregamento. Para realizar tal simulação, alocou-se uma potência de carregadores ultrarrápidos equivalentes a 210% da demanda máxima do alimentador em estudo. Deste modo, acomodou-se cinco carregadores ultrarrápidos em cada barra, totalizando uma potência de 10.000 kW, conforme apresentado na Tabela (18).

Tabela 18 – Quantidade de carregadores alocados: Inserção massiva (Poços de Caldas).

Estações de carregamento alocadas		
Barra	Nº Carregadores	Potência Total Alocada (kW)
179941	5	5.000
656631	5	5.000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na presente simulação obteve-se os seguintes resultados: (i) Tensões do alimentador, (ii) Correntes do alimentador, (iii) Potências na subestação, (iv) Perdas técnicas da rede, (v) Índices das barras em estudo e (vi) Perfil de tensão ao longo do alimentador. Tais resultados são apresentados nas Tabelas (19), (20) e na Figura 16.

Tabela 19 – Resultados da inserção massiva de estações de carregamento ultrarrápidas.

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9091		1,0000	
B	0,9114		1,0000	
C	0,9171		1,0000	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
14_PC3_1	623,1363	578,2582	568,9453	400
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
14.705,7420			10.000	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
1.121,3167 kW		1.058,5875 kW		62,7293 kW
7,71 %		7,28 %		0,43 %

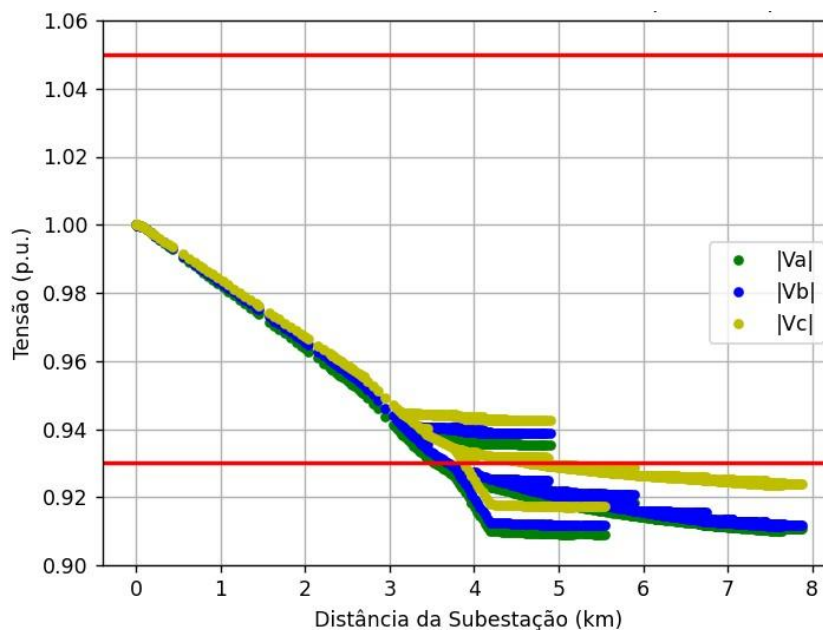
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 20 – Índices das barras em estudo: Inserção massiva.

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
179941	0.51	0.9100	0.9125	0.9178
656631	0.45	0.9315	0.9341	0.9386

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 16 – Perfil de tensão: Inserção massiva (21 hrs).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados apresentados nas Tabelas (19) e (20), demonstram que sob condições de inserção massiva de carregadores ultrarrápidos, o alimentador 14_PC3_1 de Poços de Caldas opera fora dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST, colocando assim as pessoas e equipamentos em condições de risco.

De acordo com a Tabela (19), observa-se que para o caso de inserção massiva de carregadores ultrarrápidos, a rede elétrica apresenta problemas de subtensão, chegando a atingir patamares de tensão de 0,9 p.u., ou seja, níveis bem abaixo do aceitável conforme os procedimentos de distribuição. Além disso, é possível observar também sobrecarga nas linhas e sobrecarga nos transformadores. O transformador da subestação atingiu um nível de sobrecarga de 47,70%, enquanto os condutores do alimentador atingiram um nível de sobrecarga superior a 42,22%.

Um outro impacto gerado pela inserção massiva de carregadores ultrarrápidos foi o aumento das perdas elétricas. Nesta simulação observou-se um aumento de 413,27% das perdas totais do alimentador quando comparado ao caso base. Por fim, observa-se por meio da Tabela (20) que o desequilíbrio de tensão não foi impactado, e isso se deve ao fato das estações de carregamento alocadas serem trifásicas e equilibradas.

5.2.3 Simulação 03: Capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos

Esta simulação visa determinar a capacidade de hospedagem de estações de carregamento ultrarrápidas na rede de distribuição de Poços de Caldas, ou seja, o número máximo de carregadores que podem ser conectados sem violar os limites operacionais estabelecidos nos procedimentos de distribuição.

Seguindo a metodologia proposta e adotando o cenário operacional mais conservador (Pico de carga do alimentador), obteve-se os resultados de capacidade de acomodação da rede, sendo estes apresentados por meio da Tabela (21). O algoritmo desenvolvido para a simulação convergiu quando o limite de corrente dos condutores foi excedido.

Tabela 21 – Resultado da capacidade de hospedagem de estações de recarga ultrarrápidas.

Acomodação da Rede				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
21:00	4.000	F	V	F

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme apresentado na Tabela (21), o sistema de distribuição de Poços de Caldas pode acomodar quatro estações de carregamento ultrarrápidas de 1.000 kW cada. O fator limitante é a correntes dos condutores no início do alimentador, enquanto nenhuma violação de tensão e potência foi observada. As estações de carregamento foram distribuídas de maneira igualitária entre os barramentos escolhidos. Com a solução encontrada, executou-

se um fluxo de potência na rede para determinar o estado operacional do alimentador com os quatro carregadores ultrarrápidos. Tais resultados são apresentados por meio das Tabelas (22), (23) e da Figura 17.

Tabela 22 – Resultados da inserção de estações de recarga: Caso limítrofe de hospedagem.

Tensões				
Fase	V_{min} (p.u.)		V_{max} (p.u.)	
A	0,9362		0,9996	
B	0,9385		1,0000	
C	0,9507		1,0000	
Correntes				
Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
14_PC3_1	384,6947	342,4786	325,0288	400
Potências				
$P_{subestacao}$ (kVA)			P_{max} (kVA)	
8.725,1738			10.000	
Perdas Técnicas				
Perdas Totais		Perdas Linhas		Perdas Transformadores
461,9604 kW		397,2351 kW		64,7253 kW
5,42 %		4,66 %		0,76 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 23 – Índices das barras em estudo: Caso limítrofe de hospedagem.

Índices das Barras				
Barra	FD (%)	V_A (p.u.)	V_B (p.u.)	V_C (p.u.)
179941	0,52	0,9454	0,9488	0,9544
656631	0,46	0,9563	0,9598	0,9644

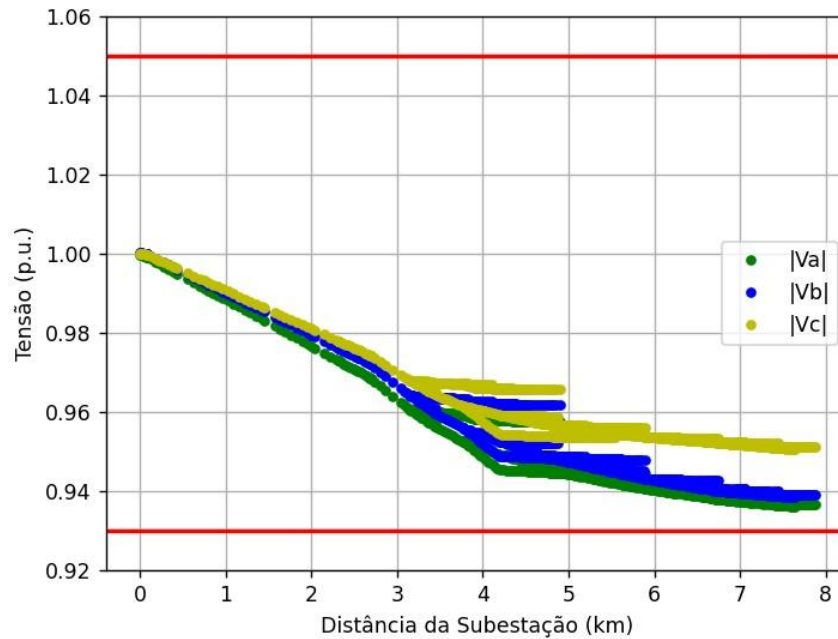
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados apresentados nas Tabelas (22), (23), demonstram que ao alocar as quatro estações de recarga ultrarrápidas, o alimentador 14_PC3_1 de Poços de Caldas opera dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST.

Observando o perfil de tensão (Figura 17) e comparando com o caso base, pode-se concluir que as estações de recarga reduziram os níveis de tensão da rede, chegando a valores de 0,93 p.u., porém a faixa considerada admissível pelo PRODIST não foi violada.

As correntes e potência na subestação tiveram um aumento significativo devido a inserção das estações de recarga, porém nenhuma delas atingiu seus valores limites com a conexão dos 4 carregadores. A integração dos carregadores ultrarrápidos impactou de forma significativa nas perdas técnicas da rede. As perdas totais aumentaram de 218,46 kW para 461,96 kW, correspondendo a um aumento de aproximadamente 110%.

Figura 17 – Perfil de tensão: Caso limítrofe de hospedagem (21 hrs).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.4 Simulação 04: Aumentando a capacidade de hospedagens com fontes renováveis

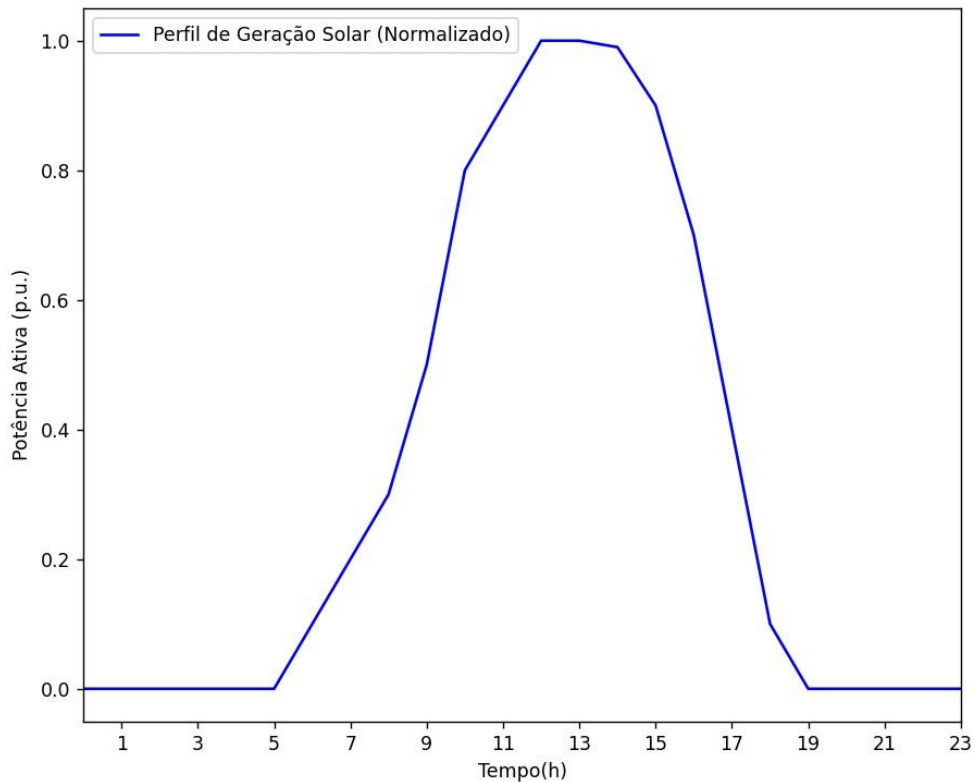
Com objetivo de avaliar como a geração solar fotovoltaica pode contribuir para a integração de veículos elétricos às redes de distribuição, executou-se um fluxo de potência na rede em estudo, considerando a inserção de geradores fotovoltaicos nas barras onde serão alocados os carregadores ultrarrápidos. Para tal simulação, considerou-se a curva de geração solar apresentada na Figura 18. Esta curva de geração solar foi obtida por meio da Base de Dados Geográfica da Distribuidora, a BDGD.

Através da Figura 18, pode-se observar que para o horário de 21:00 a geração solar fotovoltaica em Poços de Caldas é nula, sendo insignificante como ferramenta de maximização de capacidade de hospedagem de carregadores ultrarrápidos. Portanto, neste contexto só faz sentido avaliar a integração de geração solar fotovoltaica em outros horários.

Sendo assim, se faz necessário migrar a análise de capacidade de acomodação do cenário mais conservador para "Capacidade de Hospedagem Flexível", de modo análogo ao que foi feito para a Universidade Federal de Juiz de Fora.

Afim de explorar a capacidade de hospedagem flexível de carregadores ultrarrápidos, calculou-se a capacidade de acomodação da rede com e sem geração solar fotovoltaica para o horário de 13:00. Os resultados obtidos são apresentados por meio da Tabela (24). Para as simulações com geração solar fotovoltaica, considerou-se que a potência de geradores alocados não pode superar a carga nominal do alimentador (5,45 MW).

Figura 18 – Perfil de geração solar de Poços de Caldas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 24 – Resultados de hospedagem com e sem fotovoltaica (Poços de Caldas).

Capacidade de Acomodação da Rede: Sem Fotovoltaica				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
13:00	7.000	F	V	V
Capacidade de Acomodação da Rede: Com Fotovoltaica				
Hora	Capacidade Hospedagem (kW)	Violação Tensão	Violação Corrente	Violação Potência
13:00	10.000	F	V	F

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nas simulações sem geração solar fotovoltaica, obteve-se como solução uma capacidade de hospedagem de sete estações de carregamento ultrarrápidas, sendo quatro delas alocadas na 'Barra 179941' e as outras três alocadas na 'Barra 656631', conforme apresentado na Tabela (25). Na simulação com geração solar fotovoltaica, obteve-se como resultado uma capacidade de acomodação de dez carregadores, sendo estes igualmente divididos entre as Barras '179941' e '656631'. Em cada um destes dois pontos alocou-se também 2.380 kWp de geração solar.

Tabela 25 – Quantidades de carregadores alocados: Sem e com fotovoltaica.

Estações de carregamento alocadas: Sem Fotovoltaica			
Barra	Nº Carregadores	Potência de Carregador Alocada (kW)	Potência Fotovoltaica Alocada (kWp)
179941	4	4.000	-
656631	3	3.000	-
Estações de carregamento alocadas: Com Fotovoltaica			
Barra	Nº Carregadores	Potência de Carregador Alocada (kW)	Potência Fotovoltaica Alocada (kWp)
179941	5	5.000	2.380
656631	5	5.000	2.380

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por meio da Tabela (26), pode-se observar que para ambos os casos (Sem e com geração solar), ao alocar as estações de recarga ultrarrápidas, o alimentador de Poços de Caldas operou dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo PRODIST, ou seja, para ambos os casos, os limites de tensão, corrente e potência não foram violados.

Tabela 26 – Resultados do caso limítrofe de hospedagem: Sem e com fotovoltaica.

Tensões					
Simulação		V_{min} (p.u.)	V_{max} (p.u.)		
Sem Fotovoltaica		0,9422	1,0000		
Com Fotovoltaica		0,9691	1,0000		
Correntes					
Simulação	Alimentador	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{max} (A)
Sem Fotovoltaica	14_PC3_1	386,6134	368,1161	353,2263	400
Com Fotovoltaica	14_PC3_1	363,0923	330,5574	336,2533	400
Potências					
Simulação		$P_{subestacao}$ (kVA)	P_{max} (kVA)		
Sem Fotovoltaica		9.205,2655	10.000		
Com Fotovoltaica		8.555,4453	10.000		
Perdas Técnicas					
Simulação		Perdas Totais			
Sem Fotovoltaica		487,0985		5,32 %	
Com Fotovoltaica		426,8889 kW		5,73 %	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A inserção de veículos elétricos já é uma realidade no cenário nacional, deste modo, é de grande importância compreender os impactos gerados por esta tecnologia nas redes de distribuição, bem como conhecer a capacidade de acomodação da rede. Com isso, essa dissertação apresentou uma metodologia para avaliar os impactos e capacidade de hospedagem de estações de carregamento ultrarrápidas de 1.000 kW de potência, as maiores do mercado atualmente. Além disso, o presente trabalho avaliou como a geração solar fotovoltaica pode contribuir para a integração dos veículos elétricos às redes de distribuição.

Para validar a metodologia proposta considerou-se dois estudos de caso: (i) Rede de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora e (ii) Rede de distribuição de Poços de Caldas. Os dados necessários para modelagem das redes em *OpenDSS* foram obtidos por meio da Base de Dados Geográficos da Distribuidora e por meio de medição in loco. As simulações deste trabalho foram realizadas por meio da integração dos softwares *OpenDSS* e *Python*, sendo a comunicação entre eles estabelecida por meio do pacote *py-dss-interface*.

Fatores como níveis de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, nível de carregamento de condutores e transformadores são os principais impactos que devem ser levados em consideração ao avaliar a integração de estações de recarga ultrarrápida em redes de distribuição de energia elétrica. Deste modo, esses foram os fatores considerados nas simulações do presente trabalho.

Os resultados obtidos demonstram que uma inserção massiva de carregadores ultrarrápidos levam as redes de distribuição a operarem fora de seus limites operacionais definidos por norma, colocando em risco sua integridade e a segurança das pessoas. Constatou-se problemas tais como: (i) Subtensão ao longo dos alimentadores, (ii) Sobrecarga de condutores de média tensão e (iii) Sobrecarga dos transformadores da subestação.

Ao aplicar a metodologia proposta, observou-se que a rede de distribuição de Poços de Caldas (Alimentador: 14_PC3_1) pode acomodar quatro carregadores ultrarrápidos, enquanto a rede de distribuição da Universidade Federal de Juiz de Fora pode acomodar apenas um único carregador ultrarrápido, sem violar os limites operacionais. Deste modo, percebe-se que ambas as redes em estudo são capazes de aderir a esta nova tecnologia de carregamento ultrarrápido, porém é válido destacar que as mesmas não estão preparadas para uma adesão significativa destes carregadores, ou seja, no cenário de uma adoção em massa de veículos elétricos no Brasil, as redes de distribuição em questão precisariam passar por um processo de recapacitação.

Outro aspecto importante, foi a análise da integração de geração solar fotovoltaica

nas redes de distribuição em estudo juntamente com as estações de recarga ultrarrápidas. Ao realizar tais simulações, interessantes conclusões foram obtidas, tais como: (i) Aumento da capacidade de alocação de carregadores ultrarrápidos, (ii) Melhoria no perfil de tensão da rede e (iii) Redução da perdas técnicas nos alimentadores.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, estima-se realizar os seguintes itens como proposta de desenvolvimento e de aprimoramento:

- Modelar sistemas de armazenamento (Baterias) no OpenDSS, para analisar como estes impactam no aumento da capacidade de hospedagem de estações de recarga ultrarrápidas em sistemas de distribuição de energia elétrica;
- Realizar uma investigação aprofundada dos impactos gerados pela inserção de estações de recarga ultrarrápidas nas redes elétricas, no que diz respeito aos níveis de distorção harmônica. Com objetivo de entender como a eletrônica de potência dos carregadores impactam as redes de distribuição.
- Desenvolver uma análise técnico-econômica da recapacitação das redes de distribuição brasileiras como estratégia para maximizar a capacidade de acomodação de estações de recarga de veículos elétricos. De modo a reforçar a infraestrutura elétrica existente, possibilitando a ampliação dos limites operacionais da rede.
- Realizar o cálculo da capacidade de hospedagem flexível considerando uma abordagem estocástica. Incorporando assim, as incertezas associadas ao carregamento dos veículos elétricos, tais como: (i) horários de conexão, (ii) níveis de penetração, (iii) localização da recarga, (iv) duração da recarga e (v) estado de carga inicial.

REFERÊNCIAS

- 1 EPE. Cenários Energéticos - Plano Nacional de Energia 2055 (PNE 2055). **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro, RJ, Janeiro de 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-865/topico-743/PNE%202055_Caderno%20Cen%C3%A1rios%20Energ%C3%A9ticos%20090125_completo.pdf. Acesso em: 10/09/2025.
- 2 ABVE. Vendas de veículos leves eletrificados no Brasil: BEV + PHEV + HEV + HEV FLEX. **Associação Brasileira de Veículos Elétricos**. São Paulo, SP, Janeiro de 2026. Disponível em: <https://abve.org.br/abve-data/bi-geral/>. Acesso em: 20/01/2026.
- 3 Ministério dos Transportes. Frota de veículos - 2025. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2025>.
- 4 ABVE. Crescimento de Eletrificados no Mercado Brasileiro. **Associação Brasileira de Veículos Elétricos**. São Paulo, SP, Janeiro de 2026. Disponível em: <https://abve.org.br/eletrificados-crescem-dez-vezes-mais-do-que-conjuntamente-do-mercado-em-2025-com-224-mil-veiculos-vendidos/>. Acesso em: 19/01/2026.
- 5 VOOLTA. Surgimento do primeiro carro elétrico do Brasil. Nova Lima, MG, Maio de 2024. Disponível em: <https://voolta.com.br/blog/primeiro-carro-eletrico-brasil/>. Acesso em: 21/01/2026.
- 6 AUTO ESPORTE. Primeiro carro elétrico nacional. Abril de 2021. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/um-so-planeta/noticia/2021/04/gurgel-itaipu-foi-o-primeiro-carro-eletrico-nacional-mas-morreu-por-problemas-que-existem-ate-hoje.ghtml>. Acesso em: 21/01/2026.
- 7 WIKIPÉDIA. Gurgel Motores, fabricante de automóveis brasileira. Janeiro de 2026. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Gurgel>. Acesso em: 21/01/2026.
- 8 EPE. Eletromobilidade: Transporte Rodoviário - Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034). **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro, RJ, Agosto de 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20(1).pdf). Acesso em: 11/09/2025.
- 9 KARMAKER, Ashish Kumar et al. Análise do impacto da estação de carregamento de veículos elétricos em questões de qualidade de energia. **Conferência Internacional de Engenharia Elétrica, de Computação e Comunicação (ECCE)**. ECCE, 2019. p. 1-6. doi: 10.1109/ECACE.2019.8679164.
- 10 SOLIMAN, Ismail A. et al. Otimizando o posicionamento da estação de carregamento de veículos elétricos em sistemas de distribuição para melhorar o desempenho da rede

- elétrica. **Conferência Internacional Ural de 2024 sobre Engenharia de Energia Elétrica (UralCon)**. UralCon, 2024. p. 16-22. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718911.
- 11 LEONE, Carola et al. Photovoltaic and battery systems sizing optimization for ultra-fast charging station integration. **Journal of Energy Storage**. 2022. v. 52. p. 104995. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104995>.
 - 12 QUATRO RODAS. BYD promete 1.000 carregadores que carregam em 5 minutos no Brasil até 2027. **QUATRO RODAS**. Março de 2026. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/carros-eletricos/byd-promete-1-000-carregadores-que-recarregam-em-5-minutos-no-brasil-ate-2027/>. Acesso em: 05/04/2026.
 - 13 BARROS, Rodrigo. Carregador de 1000 kW da BYD promete 2 km de autonomia por segundo. **CNN Brasil**. São Paulo, SP, Março de 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/auto/carregador-de-1-000-kw-da-byd-promete-2-km-de-autonomia-por-segundo/>. Acesso em: 15/09/2025.
 - 14 Radatz, P., Contributors. (2024). bdgd2opendss: A BDGD to OpenDSS conversion tool [Computer software]. GitHub. <https://github.com/pauloradatz/bdgd2opendss>
 - 15 IBERDROLA. O veículo elétrico: uma viagem por mais de 200 anos de história. **Iberdrola Consultoria e Serviços do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/historia-carro-eletrico>. Acesso em: 23/01/2026.
 - 16 WIKIPÉDIA. Carro elétrico: História. **Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Carro_el%C3%A9trico. Acesso em: 23/01/2026.
 - 17 DE SÁ REIS, Guilherme Azevedo; FERRETI, Amanda. Veículos elétricos no Brasil: benefícios, desafios e perspectivas de impacto socioambiental. *Revista Competitividade e Sustentabilidade-ComSus*, v. 11, n. 1, 2024.
 - 18 BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011., 2011.
 - 19 U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Timeline: History of the Electric Car. Disponível em: <https://www.energy.gov/timeline-history-electric-car> .Acesso em: 24/01/2026.
 - 20 WIKIPÉDIA. Gurgel Itaipu: História. **Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Gurgel_Itaipu. Acesso em: 24/01/2026.
 - 21 INSIDEEVS. Peugeot VLV: 1º carro elétrico da marca surgiu na 2ª Guerra Mundial. **INSIDEEVS BRASIL**. São Paulo, SP, Agosto de 2020. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/436694/primeiro-carro-eletrico-peugeot/>. Acesso em: 24/01/2026.
 - 22 GARAGEM360. Conheça o Tama, carro elétrico de 71 anos. Abril de 2018. Disponível em: <https://garagem360.com.br/conheca-o-tama-carro-eletrico-de-71-anos-e-avo-do-nissan-leaf/>. Acesso em: 24/01/2026.

- 23 DRIVINGECO. Carregamento de primeira geração do Nissan Leaf 2010. Disponível em: <https://www.drivingeco.com/pt/nissan-decimo-aniversario-leaf/nissan-leaf-2010-first-gen-charging/>. Acesso em: 24/01/2026.
- 24 THEOTONIO, Sérgio Barcelos; MENDES SANTOS, Cristina d’Urso de Souza; TREDINNICK, Marcelo Ricardo Alves da Costa. Veículos elétricos e híbridos: panorama patentário no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, 2018. 92 p. Disponível em: https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/VeculosEletricoseHbridos_FINAL_Jan2019.pdf. Acesso em: 25/01/2026.
- 25 DELGADO, Fernanda; COSTA, José Evaldo Geraldo; FEBRARO, Júlia; SILVA, Tatiana de Fátima Bruce da. Carros elétricos. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. 112 p. Caderno FGV Energia. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf. Acesso em: 26/01/2026.
- 26 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Análise de Impacto Regulatório sobre baterias para veículos elétricos leves: Nota Técnica nº 5/2024/DIQRE-DCONF-INMETRO, SEI 0052600.007115/2023-64. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 12 abr. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/analise-de-impacto-regulatorio/realizadas/2024/baterias-para-veiculos-eletricos-leves/nt-diqre-005-2024_air-baterias-veiculos-eletricos-leves.pdf. Acesso em: 27/01/2026.
- 27 GUEDES, Wanessa de Oliveira. Avaliação técnica e econômica da utilização de geração solar e recarga de veículos elétricos em universidades. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 27 fev. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/10090/1/wanessadeoliveiraguedes.pdf>. Acesso em: 25/10/2025.
- 28 Silva, Caio Cesar Amorim. Capacidade de Hospedagem Fotovoltaica em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Juiz de Fora, MG. Janeiro de 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Participacao-na-Capacidade-Instalada-por-Fonte_fig3_372413235. Acesso em: 28/01/2025.
- 29 ANEEL. Procedimentos de Distribuição, Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, DF, Janeiro de 2022. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 11/10/2025.
- 30 PINTO, Yuri Gabriel; TRINDADE, Fernanda Caseno Trindade; RAMIREZ, Lucas de A. Investigação de soluções para os impactos técnicos causados pela conexão massiva de veículos elétricos aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Vitória: escrito para o XXI Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fernanda-Trindade/publication/308971631_INVESTIGACAO_DE_SOLUCOES_PARA_OS_IMPACTOS_TECNICOS_CAUSADOS_PELA_CONEXAO_MASSIVA_DE_VEICULOS_ELETRICOS_AOS_SISTEMAS_DE_DISTRIBUICAO_DE_ENERGIA_ELETRICA/links/57fbcaea08aea0db5a3f5e94/INVESTIGACAO-DE-SOLUCOES-PARA-OS-IMPACTOS-TECNICOS-CAUSADOS-PELA-CONEXAO-MASSIVA-DE-VEICU

LOS-ELETRICOS-AOS-SISTEMAS-DE-DISTRIBUICAO-DE-ENERGIA-ELETRICA.pdf .
Acesso em: 28/01/2026

- 31 Moghbel, M.; Masoum, M. A. S.; Shahnia, F. and Moses, P. (2012). Distribution transformer loading in unbalanced three-phase residential networks with random charging of plug-in electric vehicles. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2012. Bali, 26-29 Set. 2012. IEEE pp. 1-6.
- 32 VASCONCELOS, Samuel Dias. Avaliação da operação e impactos elétricos da conexão de eletroposto de recarga rápida. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 26 jan. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/60013/1/DISSERTA%C3%87%C3%830%20Samuel%20Dias%20Vasconcelos.pdf> . Acesso em: 28/01/2026.
- 33 BENTLEY, E. C. et al. The interactive effects of multiple ev chargers within a distribution network. In: 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. [S.l.:s.n.], 2010. p. 1–6. Citada na página 35.
- 34 Clement-Nyns, K.; Haesen, E. and Driesen, J. (2010). The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. IEEE Transactions on Power Systems Vol. 25 No. 1, 2010. IEEE pp. 371-380.
- 35 Bollen, M.; Rönnberg, S. Hosting capacity of the power grid for renewable electricity production and new large consumption equipment. *Energies* 2017, 10, 1325. [CrossRef]
- 36 CAMPOS, Carlos Alberto Alves. Análise da Capacidade de Hospedagem de Geração Distribuída em uma Rede Radial de Distribuição. Monografia 52 (Graduação em Engenharia Elétrica). Instituto Federal Goiás (IFG). Itumbiara, GO, Agosto de 2019.
- 37 BOLLEN, M. H., and HASSAN, F. Integration of distributed generation in the power system. Nova Iorque: IEEE Press Series on Power Engineering, 2011.
- 38 Gong, Q.; Midlam-Mohler, S.; Marano, V.; Rizzoni, G. Study of PEV charging on residential distribution transformer life. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 3, 404–412.
- 39 Watson, J.; Watson, N. Impact of electric vehicle chargers on harmonic levels in New Zealand. In Proceedings of the 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), Auckland, New Zealand, 4–7 December 2017; pp. 1–6.
- 40 Rout, S.; Biswal, G. Hosting capacity assessment of electric vehicles integration in active distribution system. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1478, 012006.
- 41 Jones, C.; Lave, M.; Vining, W.; Garcia, B. Uncontrolled Electric Vehicle Charging Impacts on Distribution Electric Power Systems with Primarily Residential, Commercial or Industrial Loads. *Energies* 2021, 14, 1688.
- 42 Ramadhani, U.; Fachrizal, R.; Shepero, M.; Munkhammar, J.; Widén, J. Probabilistic load flow analysis of electric vehicle smart charging in unbalanced LV distribution systems with residential photovoltaic generation. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 72, 103043.
- 43 Kamruzzaman, M.; Zhang, X.; Abdelmalak, M.; Benidris, M.; Shi, D. A method to evaluate the maximum hosting capacity of power systems to electric vehicles. In Proceedings of the 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Online, 12–15 June 2020; pp. 1–6.

- 44 Mirbagheri, S.; Bovera, F.; Falabretti, D.; Moncecchi, M.; Delfanti, M.; Fiori, M.; Merlo, M. Monte Carlo procedure to evaluate the e-mobility impact on the electric distribution grid. In Proceedings of the 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Milan, Italy, 9–11 July 2018; pp. 1–6.
- 45 Wang, S.; Li, C.; Pan, Z.; Wang, J. Probabilistic method for distribution network electric vehicle hosting capacity assessment based on combined cumulants and gram-charlier expansion. *Energy Procedia* 2019, 158, 5067–5072.
- 46 FATIMA, Samar; PÜVI, Verner; LEHTONEN, Matti; POURAKBARI-KASMAEI, Mahdi. A review of electric vehicle hosting capacity quantification and improvement techniques for distribution networks. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 18, n. 6, p. 1095–1113, mar. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13010.
- 47 CARMELITO, Bruno Eduardo; CARVALHO FILHO, José Maria de. Hosting capacity of electric vehicles on LV/MV distribution grids — A new methodology assessment. *Energies*, v. 16, n. 3, p. 1509, 3 fev. 2023. DOI: 10.3390/en16031509.
- 48 UMOH, Vincent; DAVIDSON, Innocent; ADEBIYI, Abayomi; EKPE, Unwana. Methods and tools for PV and EV hosting capacity determination in low voltage distribution networks — a review. *Energies*, v. 16, n. 8, p. 3609, 21 abr. 2023. DOI: 10.3390/en16083609.
- 49 XI, Z.; XIANG, Y.; HUANG, Y.; et al. Hosting capability assessment and enhancement of electric vehicles in electricity distribution networks. *Journal of Cleaner Production*, v. 398, 20 abr. 2023. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136638.
- 50 DUBOIS, M.; JAMIESON, K.; OCHOA, L. F. Impact of EV charging on LV networks and options for mitigation. *Electric Power Systems Research*, 2018.
- 51 CLEMENTS, K.; WANG, Y.; WATSON, J. Electric vehicle hosting capacity of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017.
- 52 SCHMIEGEL, Andreas; LUND, Peter. Synergies between photovoltaic generation and electric vehicle charging. *Applied Energy*, Amsterdam, v. 168, p. 1–11, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.
- 53 DUBOIS, Matthieu; OCHOA, Luis Fernando. Impact of electric vehicle charging on low voltage networks and mitigation options. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 161, p. 1–10, 2018. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.03.002.
- 54 OCHOA, Luis Fernando; DUBOIS, Matthieu. The impact of distributed photovoltaic generation on electric vehicle hosting capacity of low-voltage networks. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 161, p. 21–29, 2018. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.03.003.
- 55 WIKIPÉDIA. Universidade Federal de Juiz de Fora. **Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Universidade_Federal_de_Juiz_de_Fora. Acesso em: 31/08/2025.
- 56 ARION OTIMIZAÇÃO EM ENERGIA, Diagnóstico de gestão de energia elétrica: UFJF, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2018.

- 57 WIKIPÉDIA. Poços de Caldas. **Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Po%C3%A7os_de_Caldas. Acesso em: 02/02/2026.
- 58 CANAL VE. Recarga de 1MW de potência da BYD. Disponível em: <https://canalve.com.br/como-funciona-recarga-de-1-mw-de-potencia-da-byd-entenda/>. Acesso em: 02/02/2026.
- 59 R7. Super carregador da BYD: solução de abastecimento rápido. Disponível em: <https://noticias.r7.com/prisma/autos-carros/super-carregador-da-byd-s-era-instalado-em-800-locais-no-brasil-06112025/>. Acesso em: 02/02/2026.
- 60 BYD. Super Plataforma de carregamento ultrarrápido da BYD. **Build Your Dreams**. Disponível em: <https://www.byd.com/en/news-list/BYD-Unveils-Super-e-Platform-Megawatt-Flash-Charging-Electric-Vehicles-Matching-Refueling-Speeds.html>. Acesso em: 03/02/2026.