

Impacto do Carregamento de Veículos Elétricos na Qualidade de Energia em uma Microgrid Experimental

Diógenes Simão Rodovalho
Laboratório de Eficiência Energética e
Energias Renováveis (LEFEER)
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia do sul de Minas Gerais
Poços de Caldas, Brasil
diogenes.rodvalho@ifsuldeminas.edu.br

Guilherme Rosse Ramalho
Laboratório de Eficiência Energética e
Energias Renováveis (LEFEER)
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia do sul de Minas Gerais
Poços de Caldas, Brasil
guilherme.ramalho@ifsuldeminas.edu.br

Bruno Eduardo Carmelito
Laboratório de Eficiência Energética e
Energias Renováveis (LEFEER)
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia do sul de Minas Gerais
Poços de Caldas, Brasil
bruno.carmelito@ifsuldeminas.edu.br

r

Abstract— The expansion of electric vehicles (EVs) represents a global trend driven by the demand for more sustainable transportation solutions. However, this shift introduces technical challenges to the power grid, particularly concerning power quality (PQ). High-power EV charging, such as the 22kW analyzed in this study, can cause significant harmonic distortions and affect parameters like power factor, voltage, and current, directly impacting the limits established by the Brazilian electricity distribution standards (PRODIST Module 8).

This work investigates the impact of EV charging on power quality in an experimental laboratory setup, which includes a 22 kW EV charger, a battery energy storage system, and a photovoltaic system. Detailed measurements of harmonic distortions and other PQ variables were conducted, providing practical insights into the effects of EV battery charging.

This R&D project was a collaboration between the Municipal Energy Department (DME-D), the Federal Institute of Southern Minas Gerais (IFSULDEMINAS), and the Pontifical Catholic University (PUC) of Poços de Caldas, which hosted the experimental equipment.

Keywords— Electric Vehicles (EVs), Power Quality (PQ), Harmonic Distortion, Microgrid, Energy Storage System, Photovoltaic System, Electric Vehicle Charging, Power Distribution, Sustainable Energy, Renewable Energy Integration.

I. INTRODUÇÃO

A expansão do uso de veículos elétricos (VE) representa uma tendência global impulsionada pela busca por soluções de transporte mais sustentáveis. No entanto, essa mudança traz desafios técnicos para a rede elétrica no que tange à qualidade de energia elétrica (QEE). O carregamento de veículos elétricos, especialmente em potências elevadas, como os 22 kW analisados neste estudo, podem introduzir distorções harmônicas significativas e afetar parâmetros como fator de potência, tensão e corrente, impactando diretamente os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Neste contexto, este trabalho investiga o impacto do carregamento veicular na qualidade da energia elétrica em um laboratório experimental que inclui um carregador de veículos elétricos de 22 kW, um sistema de armazenamento de energia com baterias e um sistema fotovoltaico conectado ao laboratório. Foram realizadas medições detalhadas das distorções harmônicas e outras variáveis associadas a qualidade de energia elétrica, fornecendo uma visão prática dos sobre o impacto do carregamento das baterias dos VE's.

Este projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (PeD) foi uma cooperação entre o Departamento Municipal de Energia Distribuição (DME-D), Instituto Federal do Sul de Minas Gerais de Poços de Caldas (IF-PCS) e a Pontifícia Universidade Católica (PUC) Poços de Caldas, sendo esta última entidade a escolhida para abrigar os equipamentos descritos no item III.

II. IMPACTO DO CARREGADOR NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Diversos estudos foram realizados nos últimos anos sobre o impacto na QEE causado pelo carregamento do VE na rede de distribuição, em especial devido à emissão de harmônicos pelos carregadores [Yang et al. (2012); Xu et al. (2014); Gil-de Castro et al. (2014); Malano et al. (2016); Meyer et al. (2016); Di Paolo (2017); Megha et al. (2020); Sudha Letha and Bollen (2021)]. Conforme [Bentley et al. (2009)], o carregamento de VE's é capaz de impactar negativamente a rede elétrica devido ao emprego de conversores fundamentados em eletrônica de potência empregada na transformação da energia alternada em contínua para abastecimento da bateria do veículo. 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. Esse nível tem potencial de afetar a vida útil de ativos magnéticos, principalmente os transformadores de distribuição e de instrumentação devido ao aumento do calor nestes equipamentos pela circulação dos harmônicos.

O carregamento de VE's se caracterizam por três tipos, ou níveis distintos: nível 1, ou CA, são utilizados conversores embarcados (on-board) em que o carregador para transformação da energia CA em CC está localizado no interior do VE. Os carregadores de nível 2 e 3 - o equipamento para conversão CA em CC está fora do VE (off-board) [Darmawardana et al. (2020)]. Já em carregadores CC, não há conversão, e a energia CC é diretamente acoplada ao barramento das baterias.

Para carregar as baterias, os VEs precisam de corrente contínua, assim o carregador será essencialmente um retificador/inversor com controlador de carga incorporado. Embora existam diferenças entre fabricantes, as etapas básicas de conversão de energia de todos os carregadores são semelhantes conforme demonstrado na Figura 01. Na figura são apresentadas a rede de distribuição de energia, os conversores CA-CC e CC-CC e o sistema de gerenciamento de baterias (BMS - Battery Manager System [Darmawardana et al. (2020)]).

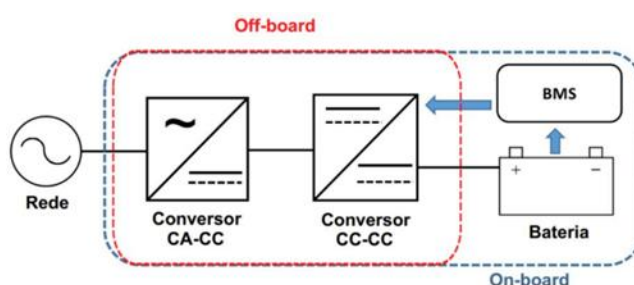


FIG 01. REPRESENTAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO ONBOARD E OFF-BOARD.

Os conversores CA-CC podem ser resumidos em quatro diferentes tipos de topologia: Pulse Width Modulated (PWM), onda quadrada, retificador de ponte monofásico básico e retificador de ponte trifásico [Bentley et al. (2010)]. Os conversores CC-CC empregam dois tipos de topologia, que são conversor KY e o conversor buck boost, ambos de malha fechada [Megha et al. (2020)]. O carregador de veículos elétricos é por natureza física da transformação, ou conversão da forma de onda senoidal em contínua, uma fonte de harmônicos. As correntes harmônicas infunde no sistema de energia durante o procedimento de conversão CA-CC, o que influencia em fenômenos mensurados para quantificar a QEE [Megha et al. (2020)].

[Jiang et al. (2014)] simularam os harmônicos causados por carregadores de veículos plug-ins pela abordagem estocástica de Monte Carlo. Foi concluído que os carregadores residenciais de nível 1 tem um impacto severo na qualidade da energia. [Niitsoo et al. (2015)] investigaram o efeito da carga de VE, altamente não linear, na rede de distribuição residencial. Se concluiu que para um nível de penetração acima de 25% na frota de veículos como VEs viola parâmetros da QEE. [Ul-Haq et al. (2015)] apresentaram o efeito da carga de carregamento do VE no perfil de tensão, bem como nos harmônicos de uma rede urbana de distribuição de energia em baixa tensão. [Lucas et al. (2015)] compararam como a Distorção Harmônica Total (DHT) pode ser reduzida adotando uma estratégia de carregamento coordenada e planejada. [Supponen et al. (2016)] monitoraram e analisaram o efeito do carregamento de VEs na QEE com base em dados em tempo real. [Hernandez et al. (2016)] realizaram análise harmônica na presença de recarga de VE e encontraram um aumento significativo na corrente de terceira harmônica.

[Xu et al. (2014)] apresentaram a análise harmônica da carga de carregamento de VEs na rede de teste IEEE 34 nós. Eles concluíram que o estado de carga da bateria (SoC – State of Charge) mais alto causará menos problemas de qualidade de energia. Eles sugeriram que as estações de carregamento de VEs deveriam impor um limite quanto ao número de VEs carregados por dia para reduzir os problemas de qualidade de energia. [Dubey and Santoso (2015)] demonstraram como os carregadores afetam o bom funcionamento da rede de distribuição de energia elétrica e propôs métodos para aliviar esses problemas. Eles inferiram que um carregamento planejado de VE resolver a maior parte dos problemas de qualidade de energia.

Diante dos estudos apresentados, é evidente que o carregamento de veículos elétricos (VEs) exerce um impacto significativo na qualidade da energia elétrica (QEE), principalmente devido às emissões harmônicas provenientes das diversas topologias de conversores empregados nos carregadores. Esses efeitos podem ser amplificados com o aumento da penetração de VEs na rede elétrica, especialmente em sistemas de distribuição de baixa tensão.

III. INFRAESTRUTURA DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E ABASTECIMENTO DE VEICULAR

O ambiente idealizado para o carregador de VE foi projetado de forma a gerar pouco impacto na rede de distribuição de energia elétrica nas proximidades da PUC Poços de Caldas, MG. Para tal foi conectado um transformador de Média para Baixa Tensão (MT/BT) dedicado para o carregador, assim como geração distribuída fotovoltaica (FV), armazenamento com baterias de chumbo ácido e controlador de carga. As especificidades e conexões destes equipamentos são descritos nos itens subsequentes, que caracterizam uma microgrid devido À capacidade de operar conectado e isolado da rede elétrica do DME-D.

A. Local da Microgrid

A Figura 02 descreve, a partir de uma vista do Google Earth [2], a distribuição física dos equipamentos que compõem o laboratório de eficiência energética e energias renováveis (LEFER), que pode ser isolada da rede do DME-D e, portanto, se comportando como uma microgrid. Este laboratório foi instalado nas premissas da PUC-MG Poços de Caldas.



FIG 2: DISTRIBUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS Fonte: Próprio autor

A sala que abriga os equipamentos de conversão e controle de energia é apresentada na Figura 3. Nesta sala, estão presentes o controle e conversão da energia Fotovoltaica (FV), os conversores CC-CA para interconexão do banco de baterias, um controlador de carga e os quadros que abrigam o supervisor de potência, proteções e conexões

com a rede elétrica CA, que alimenta o carregador de VE e a rede da concessionária DME-D

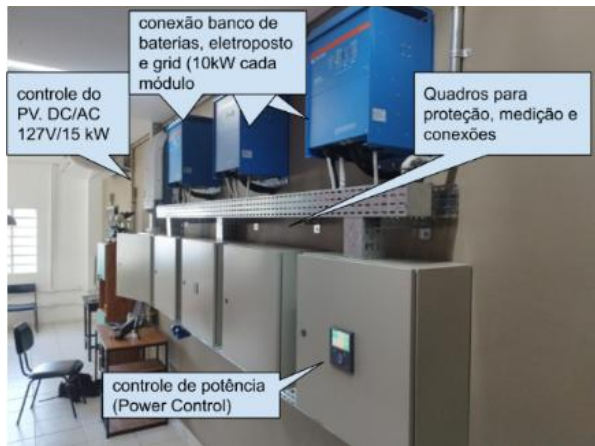


FIG 3: EQUIPAMENTOS DE CONTROLE, CONEXÃO E CONVERSORES DE ENERGIA NO LEFER

B. Diagrama em blocos e especificidades dos equipamentos

Para a descrição da interconexão dos equipamentos de geração, conversão, controle, armazenamento, carregamento de EV e conexão com a rede do DME-D, vide Figura 4. As placas ou módulos fotovoltaicos (FV) foram instaladas no telhado do prédio administrativo da PUC Poços de Caldas sendo duas sequências ou strings compostas por 15 módulos cada, conectadas em paralelo. O Inversor Fotovoltaico (Inversor grid-tied Fronius Symo) com potência de 10kW e tensão 0,22kV, faz a conversão CC em CA e acopla a energia elétrica em um barramento que alimenta o carregador veicular. A este barramento estão integrados a três inversores carregadores Quatro 48/10000/140-100/100 que convertem tensão CC de 48 V em tensão AC 220 V, controlando o banco de baterias e gerenciando o fluxo de potência entre a rede elétrica da concessionária, geração fotovoltaica e o banco de baterias. O banco de baterias é do modelo DC Wallbox (ABB) com potência de 24 kW Bateria Solar Byd - B-box Pro, competência de 9,8kWh e tensão 48V. O carregador veicular e o qualímetro foi conectado no Quadro de Distribuição Geral (QDG) para acoplamento com a rede do DME-D, foi empregado um transformador 14,2/0,22 kV com potência de 50 KVA.

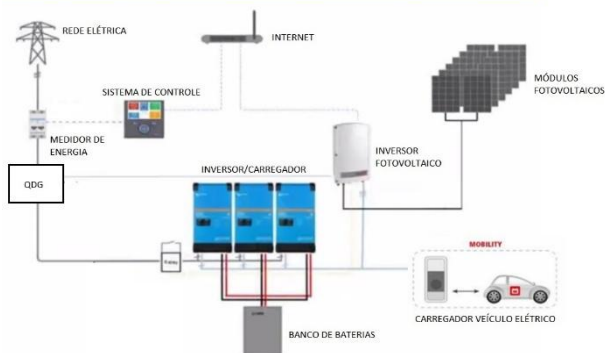


FIG 4: DIAGRAMA DA ESTRUTURA MONTADA NO LABORATÓRIO

III. Análise da Energia Elétrica

Para as medições da energia elétrica, foi empregado o qualímetro Metrel ML_2892, que atende à especificação IEC

61557-12 a qual define os requerimentos para equipamentos que medem e monitoram características do produto energia elétrica em redes de distribuição de baixa tensão. Para a conversão Analógico/Digital (A/D) este equipamento emprega palavras de 16 bits e frequência de amostragem em 7kHz, em energia elétrica AC 60 Hz, para a qual são medidos harmônicos de até quinquagésima ordem.

A. Formas de onda do sistema

A Figura 5, apresenta as formas de onda de tensão entre fases durante o carregamento de um VE JAC 22 kW. As três primeiras formas de ondas são referentes à tensão fase-fase para as três fases do sistema, com tensão de 380V, e o último gráfico apresenta a tensão entre o neutro (N) e o terra (PE) cuja tensão fica oscilando entre aproximadamente -3 V e +3V

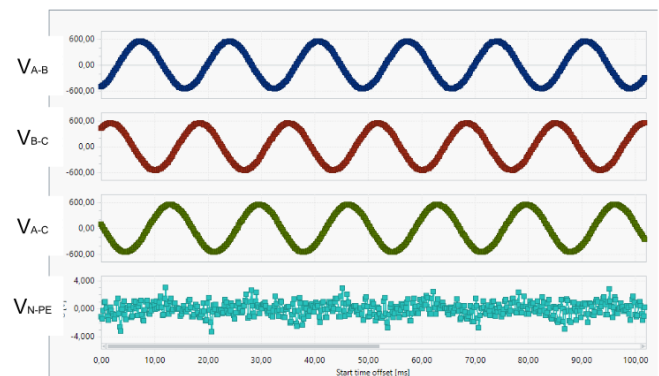


FIG 5: VISÃO GERAL DAS FORMAS DE ONDA DE TENSÃO

A Figura 6 mostra o perfil de tensão durante o carregamento do VE com 22 kW, que devido à potência do transformador alocado para esta infraestrutura de carregamento, não afeta a tensão nominal do sistema.

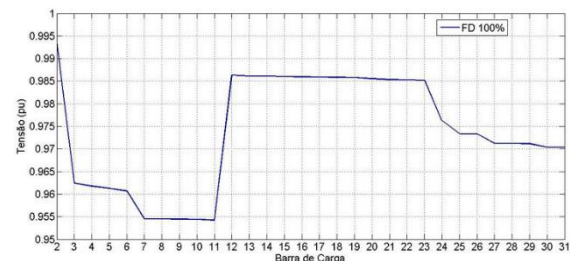


FIG 6: PERFIL DE TENSÃO DURANTE O CARREGAMENTO

Na Figura 7, as quatro formas de onda são referentes às correntes nas três fases e no neutro, que apresentam visualmente distorções em relação à forma de onda senoidal pura. Uma análise ou vista mais detalhada das formas de onda de corrente são apresentadas na Figura 8, que foca em um ciclo das formas de onda de corrente da Figura 7. O valor mais elevado da corrente da fase A se dá porque o carregador ABB é conectado juntamente com o sistema fotovoltaico, onde está sendo injetada a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos.

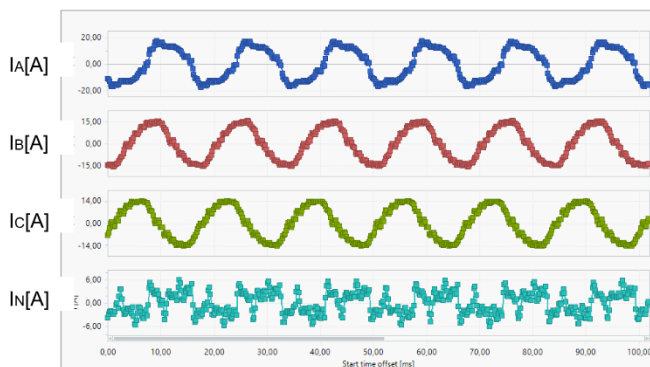


FIG 7: FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES DE FASE E NEUTRO

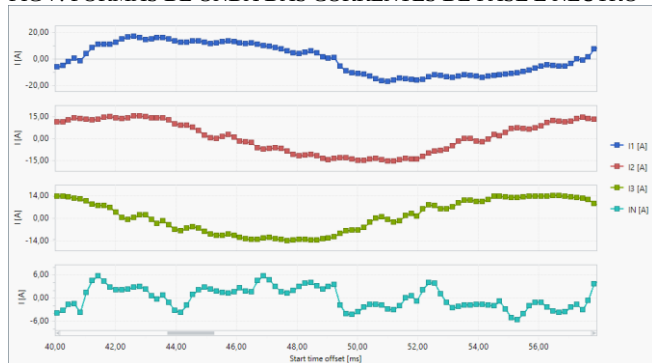


FIGURA 8: VISUALIZAÇÃO DE UM CICLO DAS FORMAS DE ONDA DA CORRENTE

B. Distorção Harmônica na Tensão

Conforme mencionado, as formas de onda da tensão não apresentaram alterações consideráveis, fato este que pode ser justificado pela análise das componentes harmônicas presentes. Na Figura 9, os gráficos em barras apresentam as componentes fundamental e até a quinquagésima harmônica da tensão nas três fases. ao fim do diagrama em barras são apresentadas as distorções harmônicas totais (THD - Total Harmonic Distortion) para as três tensões do sistema elétrico

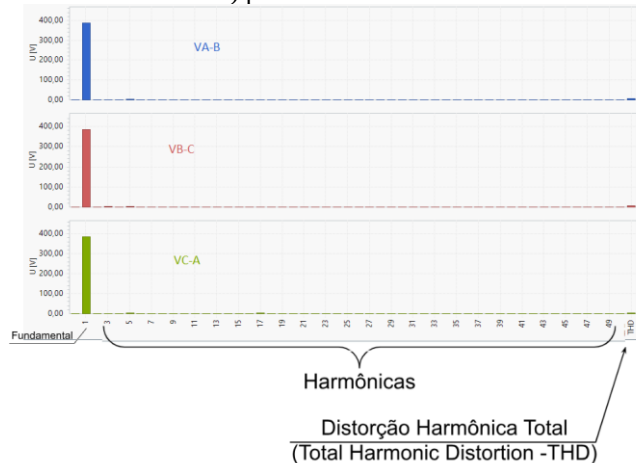


FIG 9: GRÁFICO EM BARRAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS E TOTAL PARA A TENSÃO

Na Figura 10 são apresentadas as distorções harmônicas para a corrente em forma de gráfico de barras para as componentes fundamentais e harmônicas, assim como a THD para a corrente;

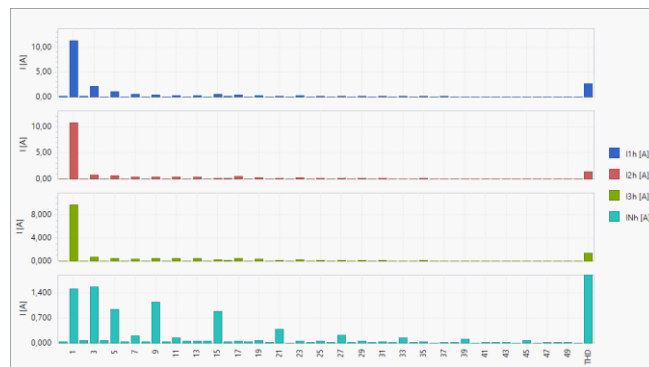


FIG 10. GRÁFICO EM BARRAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS E TOTAL PARA A CORRENTE

Na Tabela I são apresentados os valores da tensão nominal em cada fase, a distorção harmônica total de tensão e corrente em cada fase do sistema. Os limites para os indicadores são definidos no Módulo 8, Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, da Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021 que estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist. Esta resolução entrou em vigor em 1º de janeiro de 2022. Cabe salientar que não são definidos limites para distorções harmônicas para a corrente, somente para as tensões, na qual o item 46 define uma Distorção Total de Tensão (DTT%), para tensões abaixo de 2,3 kV como limite em 10%. Para os limites de variação da frequência da fundamental deve estar entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, sendo que A frequência medida para a fundamental foi de 59,981 Hz, estando assim dentro dos limites definidos como aceitáveis para a frequência.

TABELA I. Valores da Tensão Nominal, Distorções Harmônicas de Tensão e Corrente

Símbolo	Valores medidos					
	Variável	L1	L2	L3	LN	unidade
U	Tensão elétrica	223,8	223,48	220,58	0,9758	v
I	corrente	11,57	10,814	9,84	2,8425	A
THD U	THD na tensão	1,3195	1,3639	1,5388	111,75	%
THD I	THD na <u>corrente</u>	23,212	12,9	13,884	158,73	%

C. Diagrama fasorial

Em função da relativa baixa potência, ou carga apresentada pelo carregamento de um veículo de 22 kW por vez, não foram observados desbalanceamentos ou afundamentos na tensão. O diagrama fasorial apresentado na Figura 11 Nos próximos itens são apresentadas análises das distorções harmônicas na tensão e na corrente do sistema.

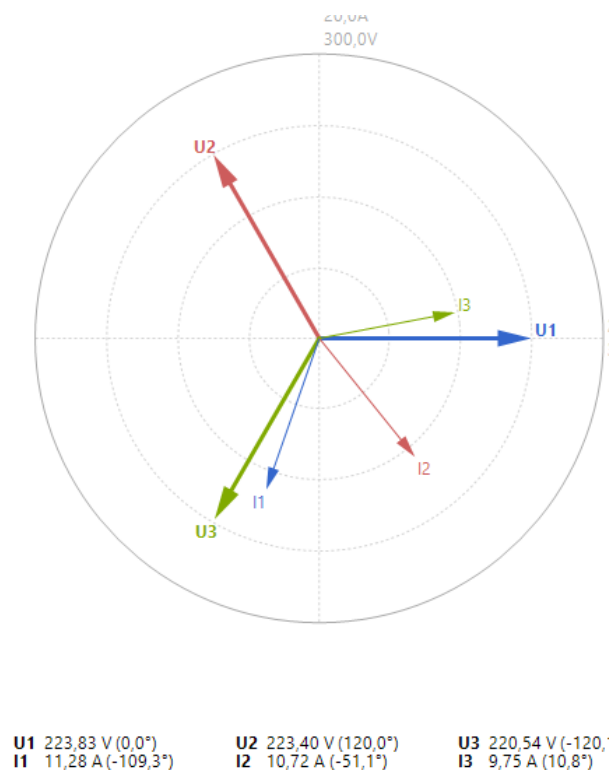


FIG 11 – DIAGRAMA FASORIAL DO SISTEMA DURANTE O CARREGAMENTO VEICULAR.

IV. Conclusão

A infraestrutura de carregamento de veículos, desenvolvida no laboratório da PUC Minas, no campus Poços de Caldas, funciona como uma *microgrid* e apresentou um desempenho técnico bastante satisfatório. Essa estrutura integrou a geração de energia solar, o armazenamento em baterias, um sistema de controle e a conexão com a rede da concessionária local. A capacidade de operar tanto conectada à rede elétrica quanto de forma isolada oferece flexibilidade ao sistema e possibilita um gerenciamento mais eficiente do fluxo de energia entre as diferentes fontes.

As análises das formas de onda, das distorções harmônicas e de outros parâmetros elétricos mostraram que os requisitos estabelecidos pelo PRODIST foram totalmente atendidos. Isso inclui, especialmente, a Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT%) e a frequência da componente fundamental, mesmo durante os testes realizados com carregamento veicular de 22 kW.

É importante destacar a presença de distorções harmônicas significativas nas correntes de linha. Embora esses valores não tenham limites normativos específicos, eles são relevantes do ponto de vista técnico. Essas distorções podem afetar a eficiência energética do sistema e prejudicar outros equipamentos conectados à rede, especialmente em situações de maior carga ou expansão da infraestrutura. Isso torna essencial um monitoramento contínuo e a implementação de estratégias de mitigação, especialmente em ambientes com vários conversores eletrônicos de potência.

Assim, os resultados obtidos reforçam a viabilidade do uso de sistemas de geração distribuída e armazenamento para aplicações em mobilidade elétrica, desde que sejam tomados os cuidados necessários em relação à qualidade da energia, especialmente no que diz respeito às componentes harmônicas da corrente.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto estratégico de pesquisa e desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica, “Desenvolvimento de Soluções Eficientes de Mobilidade Elétrica”, denominado “Poços+Inteligente”, que visa promover projetos de mobilidade elétrica no país. Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – IFSULDEMINAS, a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC MINAS e à Operadora do Sistema de Distribuição Local, DME Distribuição S.A., pelo apoio.

REFERENCES

- [1] A. Megha, N. Mahendran and R. Elizabeth, "Analysis of Harmonic Contamination in Electrical Grid due to Electric Vehicle Charging," *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2020, pp. 608-614, doi: 10.1109/ICSSIT48917.2020.9214096.
- [2] C. Jiang, R. Torquato, D. Salles and W. Xu, "Method to assess the power quality impact of plug-in electric vehicles," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 2014, pp. 177-180, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842835.
- [3] Y. Xu, Y. Xu, Z. Chen, F. Peng and M. Beshir, "Harmonic analysis of electric vehicle loadings on distribution system," *2014 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering*, Yantai, China, 2014, pp. 145-150, doi: 10.1109/CCSSE.2014.7224526. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] A. Gil-de-Castro, S. K. Rönnerberg and M. H. J. Bollen, "Harmonic interaction between an electric vehicle and different domestic equipment," *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Gothenburg, Sweden, 2014, pp. 991-996, doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6931047.
- [5] A. A. Malano, S. Müller, J. Meyer and S. Bachmann, "Harmonic interaction of electric vehicle chargers in a central charging infrastructure," *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 367-372, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783366.
- [6] J. Meyer, S. Müller, P. Schegner, S. Z. Djokic, A. J. Collin and X. Xu, "Comparison of methods for modelling electric vehicle chargers for harmonic studies," *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Genoa, Italy, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540993.
- [7] M. Di Paolo, "Analysis of harmonic impact of electric vehicle charging on the electric power grid, based on smart grid regional demonstration project — Los angeles," *2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, Long Beach, CA, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/IGESSC.2017.8283460.
- [8] A. Megha, N. Mahendran and R. Elizabeth, "Analysis of Harmonic Contamination in Electrical Grid due to Electric Vehicle Charging," *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2020, pp. 608-614, doi: 10.1109/ICSSIT48917.2020.9214096.
- [9] S. S. Letha and M. Bollen, "ESTIMATION OF ELECTRIC VEHICLE HOSTING CAPACITY OF A DISTRIBUTION NETWORK INCLUDING AMBIENT TEMPERATURE," *CIRE2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Online Conference, 2021, pp. 2350-2355, doi: 10.1049/icp.2021.1766.
- [10] G. A. Putrus, P. Suwanapongkarl, D. Johnston, E. C. Bentley and M. Narayana, "Impact of electric vehicles on power distribution networks," *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, MI, USA, 2009, pp. 827-831, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289760.
- [11] D. Darmawardana, J. David, S. Perera, D. Robinson, J. Meyer and U. Jayatunga, "Analysis of High Frequency (Supraharmonics) Emissions Caused by Electric Vehicle Charging," *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Dubai,

United Arab Emirates, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177932.

- [12] J. Niitsoo, P. Taklaja, I. Palu and I. Kiitam, "Modelling EVs in residential distribution grid with other nonlinear loads," *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, 2015, pp. 1543-1548, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165401.
- [13] A. Ul-Haq, C. Cecati, A. Ehsan and K. Strunz, "Impact of electric vehicles on voltage profile and harmonics in a distribution network," *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, Doha, Qatar, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGRE.2015.7208724.
- [14] J. C. Hernandez, A. Medina and F. Jurado, "Power quality assessment of current electrical vehicle charging processes," *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Xi'an, China, 2016, pp. 1523-1527, doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779745.
- [15] A. Dubey, S. Santoso and M. P. Cloud, "A practical approach to evaluate voltage quality effects of electric vehicle charging," *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 188-194, doi: 10.1109/ICCVE.2013.6799791.