

# AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA QUALIDADE DE SERVIÇO DA REDE

## Resumo

*O forte incremento nos veículos elétricos e suas necessidades de carregamento têm acarretado grandes desafios à gestão da rede de distribuição, nomeadamente, na alteração da sua qualidade de serviço.*

*Este artigo propõe uma metodologia para avaliar o impacto de diferentes modos de carregamento numa rede residencial numa cidade espanhola. Trata-se numa rede em BT com 8087 consumidores, para a qual foram simulados diferentes cenários de funcionamento e foram analisados os valores apresentados para quatro variáveis críticas. Os índices de qualidade resultantes são comparados com os limites padrão fixados pela norma de referência EN50160.*

*Constatou-se que, na generalidade, a concentração dos modos de carregamento nos parques de estacionamento leva a piores índices de qualidade de serviço, sendo determinado o modo de carregamento mais conveniente para cada localização. Foi também verificado que o desequilíbrio de tensão é a variável mais influenciada pela localização dos modos de carregamento.*

**Palavras-chave:** *Veículos elétricos (VEs); qualidade de serviço; carregamento concentrado; carregamento distribuído.*

## 1. Introdução

O setor dos transportes é um dos que mais contribui para as emissões de gases de efeito de estufa, associadas aos veículos de combustão interna. Com a transição energética em curso um pouco por todo o mundo, torna-se cada vez mais importante e urgente a transição para a mobilidade elétrica.

A adoção exponencial pelos veículos elétricos (VEs) acarreta inúmeras vantagens, como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e a da dependência energética. Estes e outros benefícios que a mobilidade elétrica representa atualmente, surgem numa altura de consciencialização ambiental em torno da transição para uma sociedade menos poluente, mais descarbonizada e mais sustentável. Para além disto, os VEs são 3 a 4 vezes mais eficientes do que os de combustão interna [1].

À medida que mais modelos ficam disponíveis no mercado e os preços diminuem, as compras de VEs aumentam. Prevê-se um aumento de 10% nas vendas até 2025 e 20 a 30% até 2030 [2].

O carregamento dos VEs depende da eletricidade fornecida pelas redes de distribuição e, para tal, de locais para carregamento doméstico e armazenamento da energia em baterias recarregáveis que irão alimentar o motor elétrico. A infraestrutura de carga acessível é essencial para a adoção generalizada dos VEs [3].

Embora a transição para os VEs seja inevitável, a sua penetração maciça terá, sem dúvida, impacto na gestão da rede de distribuição. Um veículo elétrico pequeno requer um carregamento noturno de 25 kWh [4], ou seja, mais do dobro da procura média diária de energia doméstica, de 12 kWh. Além disso, esta procura não é uniformemente distribuída ao longo do dia.

Este artigo baseou-se no estudo do impacto dos VEs numa rede de teste, *IEEE European LV test feeder*, com 55 consumidores, apresentada em [5] [6]. Aproveitando esta rede e a metodologia proposta pelos autores, a rede foi ampliada 160 vezes e, neste trabalho os resultados são apresentados para 8087 consumidores.

Para esta rede foi avaliada a qualidade de serviço após a penetração dos VEs [7], utilizando o modelo de simulação do processo de carregamento apresentado em [5], considerando a possibilidade de carregamento concentrado em parques de estacionamento.

Neste artigo é apresentada uma metodologia de avaliação do impacto dos diferentes modos de carregamento e localização dos carregadores, utilizando simulações realistas. Para tal, recorreu-se à aplicação dos conceitos referidos na norma europeia EN50160 [8], estudando as variáveis relacionadas de modo direto com a qualidade de serviço. São avaliadas quatro variáveis: desequilíbrio da tensão, tensão nas cargas, carga dos transformadores e as perdas na rede.

## 2. Modelização dos Consumos

### 2.1 O consumo dos veículos elétricos

A incerteza das cargas domésticas torna difícil a obtenção fidedigna dos diagramas de carga. A incerteza das cargas pode ser modelizada a partir de medições em sistemas reais complementadas pelos dados encontrados na literatura e os perfis semanais de procura residencial, tendo em conta o comportamento estocástico das cargas residenciais [5].

Neste trabalho, a ferramenta selecionada para modelizar o consumo dos VEs durante o seu carregamento foi a apresentada em [5]. Este modelo assume como variáveis as grandezas importantes para os diagramas de carga: tempo de duração do carregamento, nível de carregamento da bateria, a hora de início do período de carregamento, a máxima descarga permitida, as potências nominais, os fatores de potência dos carregadores e o tamanho das baterias [10]–[13].

A ferramenta escolhida para a geração dos diagramas de carga domésticos é o CREST [9], que considera o comportamento estocástico das cargas e as probabilidades e incertezas associadas ao funcionamento e localização dos diferentes elementos do sistema. É um modelo baseado em cadeias Markov e é uma aplicação desenvolvida com de código aberto no Excel VBA.

A aplicação gera diagramas de carga com tempo de resolução médio de 1 minuto para cada instalação elétrica.

O *OpenDSS* é o software que resolve o problema colocado. É uma ferramenta de simulação integral para sistemas de distribuição de energia elétrica desenvolvida pelo EPRI e colocada à disposição da comunidade académica [14]. Uma das suas maiores vantagens é que permite, através da sua interface COM, a utilização de outros softwares, como o Excel VBA, *Python* ou *Matlab*, para análise dos resultados obtidos. Neste trabalho, optou-se pelo *Matlab*.

### 2.2 Qualidade de serviço da rede

Uma forma de avaliar a qualidade de serviço nas redes de distribuição é comparar os valores simulados com os limites ou valores máximos estabelecidos pela norma EN50160. As variáveis críticas de interesse obtidas para avaliar a qualidade do serviço para cada cenário foram os desequilíbrios de tensão, os perfis de tensão nos pontos de carga e transformadores, o nível de carga do transformador e as perdas no sistema.

Quanto aos desequilíbrios, a norma EN50160 estabelece que as perturbações de tensão avaliados em períodos de 10 minutos não devem exceder o limite de desequilíbrio de 2%. No que se refere aos perfis de tensão, para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes da tensão fornecida avaliada também em períodos de 10 minutos devem situar-se dentro de um intervalo de  $\pm 10\%$ . Para além disso, todos os valores eficazes da tensão fornecida devem estar dentro do intervalo  $[-15\%, +10\%]$ .

### 2.3 Metodologia

A metodologia proposta para a resolução do problema apresentado resume-se nas seguintes etapas:

1. Gerar os diagramas de carga para cada um dos pontos de carga doméstico, utilizando o modelo CREST
2. Obter os diagramas de carga dos processos de carregamento de cada um dos VEs, de acordo com o modo de carregamento considerado e o nível de penetração na rede

3. Carregar a rede de distribuição no *OpenDSS*
4. Atribuir aleatoriamente os diagramas de carga domésticos aos pontos de carga da rede e carregá-los na rede no *OpenDSS* através da interface COM com o *Matlab*
5. Atribuir aleatoriamente os diagramas de carga dos VEs aos pontos de carga da rede com esta tecnologia e carregá-los na rede no *OpenDSS* através da interface COM com o *Matlab*
6. Resolver o fluxo de carga com o *OpenDSS* para todos os minutos do dia simulado
7. Analisar os resultados no *Matlab*.

### 3. Caso de estudo: cidade da região das Astúrias

#### 3.1 Caraterização da rede

A rede escolhida para este estudo foi uma rede baseada numa porção da verdadeira rede de distribuição residencial de uma cidade da região espanhola de Astúrias, uma rede operada pela EDP. O seu esquema unifilar simplificado é mostrado na Figura 1, trata-se de uma rede teste que foi desenvolvida por investigadores da Universidade de Oviedo [15].

A referida rede tem 8087 consumidores em baixa tensão (BT), dos quais 88,5% são monofásicos. A sua constituição, dimensão dos transformadores e a distribuição dos neutros, assume as normais características encontradas com regularidade nas redes europeias de distribuição em BT. A rede é fornecida por 30 transformadores com ligação DY, todos com a potência de 630 kVA, com exceção de um deles, que tem a potência de 1000 kVA. Só um dos transformadores, assinalado a vermelho na Figura 1, é desligado para os cenários estudados neste trabalho.

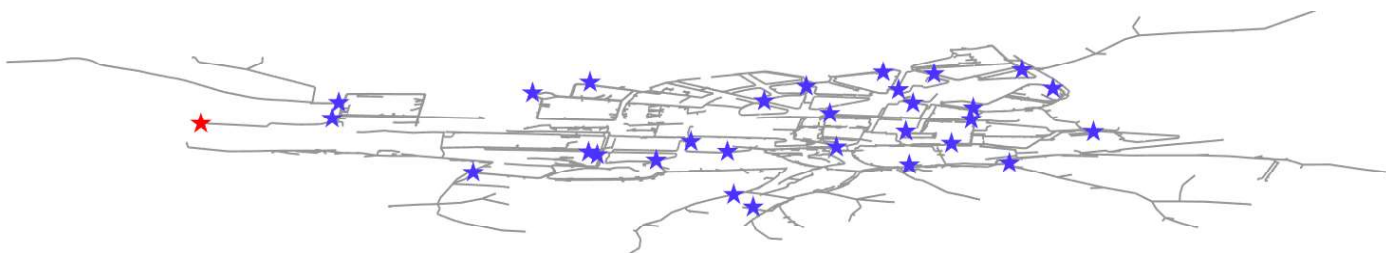


Figura 1 - Esquema unifilar da rede de distribuição

#### 3.2 Cenários de estudo

Tanto o nível de ocupação residencial como os tipos de edifícios distribuídos por toda a rede foram extraídos das estatísticas do INE [16]. Os dados climáticos foram obtidos da AEMET [17].

Os diagramas de carga foram elaborados para o período de inverno em que a procura é mais elevada e as perturbações na qualidade de serviço atingem níveis mais elevados [6]. Para os cenários analisados foi considerado que existe apenas um veículo elétrico por habitação.

A utilização de uma rede de grandes dimensões como a definida para este estudo conduz a um elevado número de variáveis e de iterações por cada cenário. Desta forma, o estudo dos cenários limitou-se a uma análise determinística. Foram considerados e comparados quatro modos de carregamento: i) Estratégia de carregamento baseada nos dados reais apresentados em [11]; ii) Carregamento não controlado, com a maioria dos veículos a começar a carregar entre as 18 e 19 horas; iii) Carregamento controlado, onde se assume a existência de incentivos para os consumidores adiarem o carregamento para depois das 21 horas; iv) Carregamento inteligente, onde se supõe que a hora de início do carregamento segue uma distribuição normal, com média à 1:00 [18]. Foi também incluído um cenário de base sem VEs incluídos.

Para cada um dos modos de carregamento, foram simuladas as situações de carregamento distribuído e de carregamento concentrado em parques de estacionamento. Na primeira, assume-se que cada proprietário carrega o seu veículo elétrico em casa e, para a segunda, foram considerados 40 parques de estacionamento distribuídos aleatoriamente.

### 3.3 Resultados obtidos

Os resultados obtidos são apresentados de acordo com as variáveis críticas de interesse.

**Desequilíbrios:** O desequilíbrio de tensão é a variável mais influenciada pela localização dos processos de carregamento. Isto pode ser visualizado na Figura 3, na qual representa-se a variação da média de estas variáveis na rede quando se passa de um carregamento distribuído para um carregamento concentrado em parques de estacionamento. O maior aumento do desequilíbrio após a concentração dos processos de carregamento é verificado no modo não controlado, nomeadamente 67% de aumento, seguido pelo modo controlado com 47 % em média.

Após a simulação de um dia de inverno, observou-se que o único modo de carregamento distribuído que não assegura que o limite de 2 % estabelecido pela EN 50160 não seja excedido é o carregamento não controlado. Não obstante, se o carregamento fosse concentrado, este limite também iria ser ultrapassado nos cenários de dados reais e de carregamento controlado, mas em menos de 8% dos pontos de carga.

O *heatmap* na Figura 2 identifica as áreas da rede mais propensas a desequilíbrios. Estas são reconhecidas como as áreas com a maior concentração de consumidores e próximas aos parques de estacionamento, no caso dos cenários com carregamento concentrado.

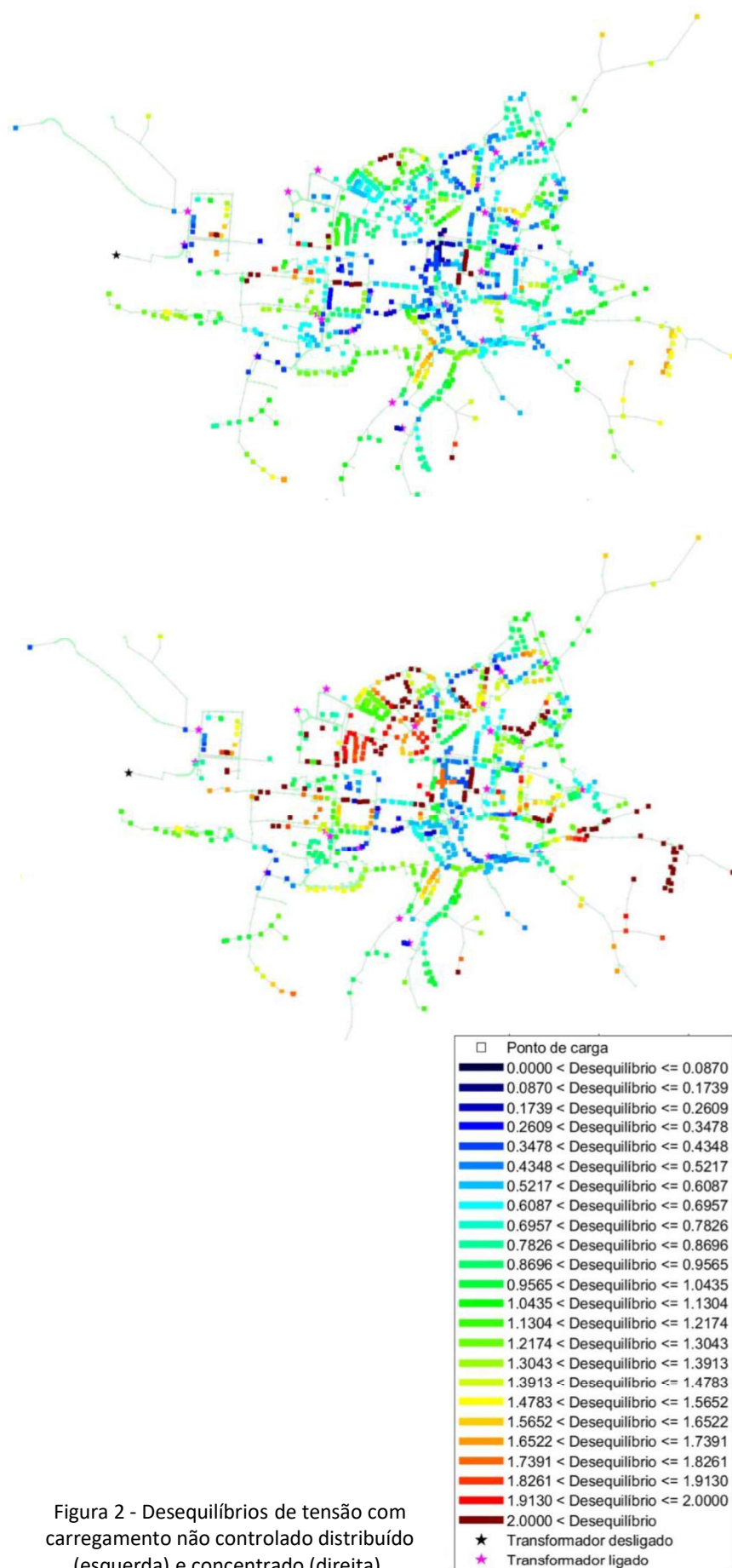


Figura 2 - Desequilíbrios de tensão com carregamento não controlado distribuído (esquerda) e concentrado (direita).

Tensões nas cargas e nos transformadores: O aparecimento de VEs na rede provoca uma maior queda de tensão em cargas e transformadores. Por este motivo, os limites inferiores estabelecidos pela norma EN 50160 são aqueles a que se deve prestar maior atenção durante o estudo do problema em questão. Assim, o carregamento generalizado de VEs de forma não controlada levaria a tensões mínimas abaixo do limite mínimo permitido em 3 % das habitações se o carregamento fosse controlado e distribuído, montante que se duplicaria se o carregamento se realizasse exclusivamente em parques de estacionamento. Estas percentagens aumentariam para 9 % e 32 % das casas da rede, respetivamente, se não houvesse controlo. Por conseguinte, a qualidade do serviço não estaria assegurada em nenhum desses cenários. É este estudo das tensões em cargas e transformadores onde o agravamento dos índices de qualidade de serviço após a concentração dos processos de carregamento é menos perceptível, como se pode ver na Figura 3.

Carga nos transformadores: Verificou-se que, quanto ao nível de carga dos transformadores, a concentração dos carregamentos em parques de estacionamento não constitui uma desvantagem apreciável, uma vez que as grandezas dos níveis de carga resultaram semelhantes para cada modo estudado.

Em comparação com o cenário de base sem veículos elétricos, um carregamento controlado e distribuído implica quase uma triplicação da carga média dos transformadores, enquanto um carregamento inteligente implica um aumento

de 40 % do nível de carga.

É de notar que estes resultados foram obtidos a partir de uma situação em que os transformadores estavam muito levemente carregados (9 % no cenário base) e que precisamente a carga do transformador tem uma influência muito significativa nos índices de qualidade de serviço.

Perdas no sistema: Verificou-se que estas aumentam quanto menos controlados são os processos de carregamento, as variações após a concentração destes foram semelhantes para todos os modos, de acordo com a Figura 3.

#### 4. Conclusão

Pela análise dos resultados obtidos nesta rede de distribuição, podemos concluir que, de um modo geral, a concentração dos processos de carregamento nos parques de estacionamento leva a piores índices de qualidade de serviço. Na generalidade, se o carregamento se concentrar em parques de estacionamento, é preferível que o modo de carregamento utilizado seja inteligente para garantir a qualidade em termos de desequilíbrios e flutuações da tensão.

O estudo apresentado neste artigo foi aplicado a uma rede de grandes dimensões, para a qual foram analisadas as variáveis apresentadas na secção 3.3. Para esta mesma rede poderiam ser estudados outros índices relacionados com a qualidade do serviço, como é o caso do estudo das harmónicas ou o fenómeno *flicker*.

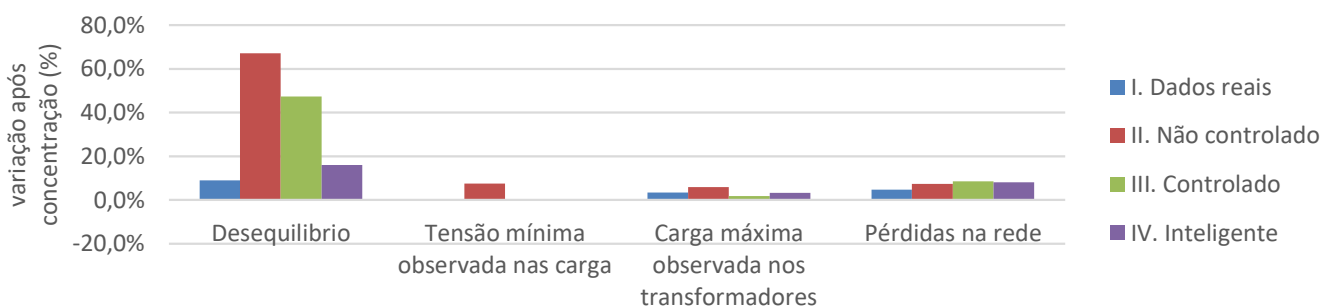


Figura 3 - Efeito da concentração dos processos de carregamento nos parques de estacionamento em diferentes variáveis relacionadas com a qualidade do serviço.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. Mai, D. Steinberg, J. Logan, D. Bielen, K. Eurek, and C. McMillan, "An Electrified Future: Initial Scenarios and Future Research for U.S. Energy and Electricity Systems," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 16, no. 4, pp. 34–47, Jul. 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2820445.
- [2] T. Nogueira, J. Magano, E. Sousa, and G. R. Alves, "The Impacts of Battery Electric Vehicles on the Power Grid: A Monte Carlo Method Approach," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 8102, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14238102.
- [3] Z. Qu and S. Zhang, "References to literature from the business sector in patent documents: a case study of charging technologies for electric vehicles," *Scientometrics*, vol. 124, no. 2, pp. 867–886, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11192-020-03518-1.
- [4] G. J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, and N. P. Brandon, "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 24–29, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.040.
- [5] P. Rodríguez-Pajarón, A. Hernández, and J. V. Milanović, "Probabilistic assessment of the impact of electric vehicles and nonlinear loads on power quality in residential networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 129, p. 106807, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106807.
- [6] P. Rodriguez-Pajaron, A. Hernandez, and J. V. Milanovic, "Probabilistic Assessment of Harmonics in a Residential Network," in *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Jul. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177873.
- [7] H. Palahalli, P. Maffezzoni, and G. Gruosso, "Statistical simulation of Electric Vehicle behaviour applied to low voltage distribution network," in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Mar. 2021, pp. 657–662, doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453667.
- [8] CENELEC- EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks," 2010.
- [9] E. McKenna and M. Thomson, "High-resolution stochastic integrated thermal–electrical domestic demand model," *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 445–461, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.089.
- [10] C. Jiang, R. Torquato, D. Salles, and W. Xu, "Method to Assess the Power-Quality Impact of Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 2, pp. 958–965, Apr. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2283598.
- [11] J. Quiros-Tortos, A. N.- Espinosa, L. F. Ochoa, and T. Butler, "Statistical Representation of EV Charging: Real Data Analysis and Applications," in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Jun. 2018, pp. 1–7, doi: 10.23919/PSCC.2018.8442988.
- [12] A. Navarro-Espinosa and L. F. Ochoa, "Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2192–2203, May 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2448663.
- [13] P. S. Moses, S. Deilami, A. S. Masoum, and M. A. S. Masoum, "Power quality of smart grids with Plug-in Electric Vehicles considering battery charging profile," in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2010, pp. 1–7, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638983.
- [14] R. C. Dugan and T. E. McDermott, "An open source platform for collaborating on smart grid research," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Jul. 2011, pp. 1–7, doi: 10.1109/PES.2011.6039829.
- [15] A. Koirala, L. Suárez-Ramón, B. Mohamed, and P. Arbolea, "Non-synthetic European low voltage test system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, p. 105712, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105712.
- [16] INE - Instituto Nacional de Estadística, "Proyeccion de Hogares," 2021. <https://www.ine.es/dyngs/INEbase/listaoperaciones.htm>.
- [17] AEMET, "Análisis de las temperaturas en España en el periodo 1961-2018," Madrid, 2018.
- [18] Z. Jiang, L. Shalafteh, and M. J. Beshir, "Impact of electric vehicle infrastructure on the city of Chatsworth distribution system," in *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Dec. 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/IEVC.2014.7056078.