

# ESTRATÉGIA DE FLEXIBILIDADE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA ALÍVIO DE CONGESTIONAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

## Resumo

*Devido à crescente preocupação com as questões ambientais e de sustentabilidade, o sistema de transporte está a passar por importantes mudanças em seu paradigma, com a crescente substituição de veículos de combustão interna por elétricos. Consequentemente, os sistemas elétricos precisam se adaptar à carga cada vez maior exigida da rede de distribuição e ao desafio de identificar padrões de comportamento dos utilizadores de veículos elétricos. Para preparar a rede para essas mudanças, é necessário estudar o comportamento dos usuários de VEs e desenvolver estratégias para lidar com a crescente demanda de veículos elétricos. Sabendo que os veículos elétricos passam por longos períodos estacionados nas estações de carregamento (acima do necessário para recarregar completamente a sua bateria), este trabalho de pesquisa propõe uma estratégia de carregamento de VEs, que visa explorar esses longos tempos estacionados nas estações de carregamento de maneira inteligente. Essa metodologia é aplicada em uma cidade inteligente realista com alta penetração de veículos elétricos para investigar melhor sua aplicação e resultados.*

**Palavras-Chaves** — Veículos Elétricos, Carregamento Inteligente, Sistema de Distribuição.

## I. INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), foi estabelecido um objetivo de limitar o aquecimento global a menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais até o final do século 21 [1], e 195 países participarão ativamente para alcançar tal objetivo [2]. Para reduzir as emissões de gases poluentes e conter a crescente preocupação com o uso da energia de maneira mais sustentável, existe uma certa tendência no aumento da

participação de veículos elétricos (VE) na indústria automotiva, uma vez que os veículos com motores de combustão interna contribuem para cerca de 16% das emissões globais de dióxido de carbono feitas pelo homem [3].

É amplamente reconhecido que a mudança de automóveis a combustão interna para VEs tem muitas vantagens ambientais e econômicas. No entanto, o número crescente de VEs requer um desenvolvimento contínuo de novas infraestruturas para o carregamento de VEs, o que leva a uma crescente demanda de energia [4], [5]. Essas configurações de carregamento sobrecarregarão o sistema de distribuição de energia [6] – [8], decorrente das altas demandas de energia nas estações de carregamento rápido de veículos elétricos.

Com a alta penetração dos VEs e a geração distribuída na rede, o sistema de distribuição de energia está a sofrer alterações em suas características, a colocar novos desafios ao Operador do Sistema de Distribuição (DSO) em termos de segurança e operação econômica da rede [7]. Os proprietários de VEs possuem um certo padrão de comportamento que pode ser explorado, por exemplo o fato de permanecerem longos períodos de tempo nas estações de carregamento (tempo este que é superior ao necessário para recarregar a bateria completamente). O DSO pode explorar esse comportamento e a coordenação do carregamento dos VEs, de tal forma que esta combinação possa ser utilizada para os serviços auxiliares, portanto, mantendo a rede mais estável.

Este artigo é organizado da seguinte forma: Seção II descreve a metodologia proposta; Seção III apresenta o estudo de caso, e a Seção IV apresenta as conclusões.

## II. METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção apresenta uma descrição detalhada da metodologia adotada, representada na Fig.1. Combina um simulador do comportamento dos utilizadores de VEs [8] com uma operação/reconfiguração inovadora de uma rede de distribuição inteligente baseada nos preços marginais localizados (LMP). Como este problema é classificado como programação não-linear inteira mista (MINLP), o método de decomposição de *Benders* foi utilizado para a resolução do problema de otimização [9], através do uso de um software especializado, o TOMLAB. Este trabalho é uma extensão do estudo descrito em [10], onde é apresentado o modelo matemático completo, referente ao problema de otimização, simulador do comportamento dos utilizadores de VEs, restrições da rede, subestação e do sistema de armazenamento de energia.

Para alcançar o objetivo declarado anteriormente, primeiro as cargas (incluindo os VEs) e as gerações distribuídas são mapeadas. Em seguida, o modelo de otimização pode carregar e iniciar.

Esse modelo de otimização fornece informações importantes, como: preços marginais localizados, topologia da rede, trânsito de potências, magnitude da tensão e perdas de energia. A partir dessas informações, foi desenvolvida a estratégia de carregamento dos VEs, que funciona de acordo com o fluxograma apresentado na Fig. 2. A cada 15 minutos, é realizada uma análise da rede para identificar se algum parâmetro está além de seus limites, por exemplo se a magnitude da tensão é muito baixa ou muito alta, linhas estão sobrecarregadas e assim por diante. Além desses dados obtidos no modelo de otimização, existem também os dados dos VEs, como suas localizações, estado de carga das baterias, viagens programadas e tempo necessário para carregar completamente. Combinando essas informações, existem dados do preço mínimo dos usuários do VE para parar de carregar o VE, ou seja, se o sistema estiver sobrecarregado e o VE tiver bateria suficiente para fazer a próxima viagem, o VE poderá suspender o seu processo de carregamento naquele período para manter a rede estável e dentro de seus limites de operação, mas, é claro, recebendo uma certa quantia de dinheiro do DSO.

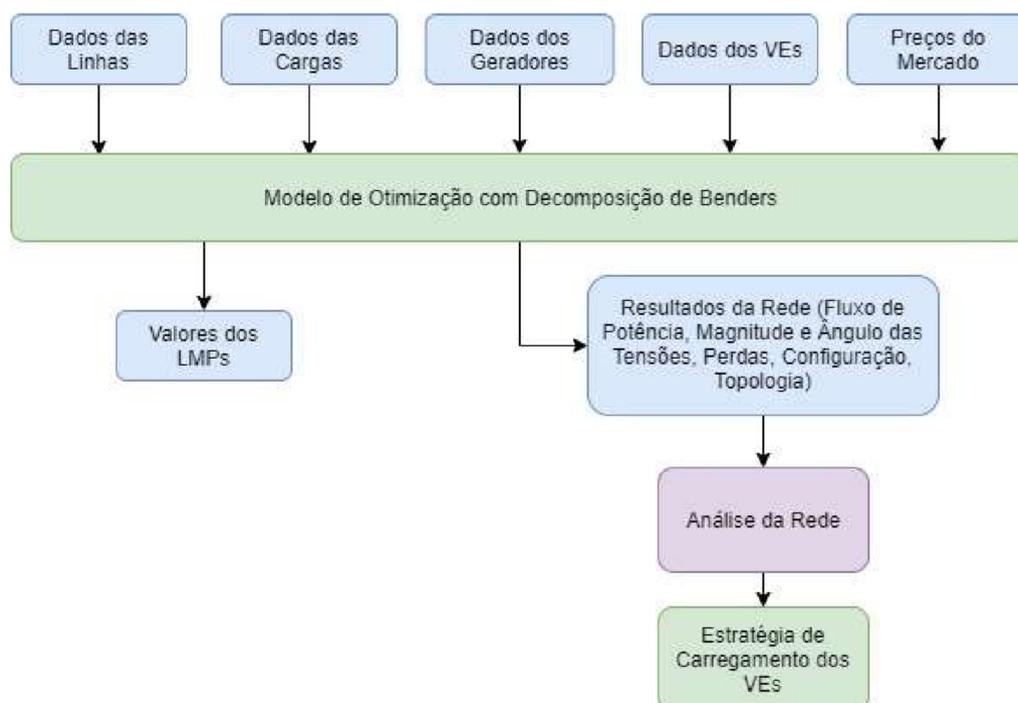


Figura 1. Metodologia proposta

Na estratégia proposta, o DSO só realizará essa escolha se a rede estiver sobrecarregada e se o preço do VE for inferior ao preço marginal da energia no barramento da estação de carregamento. Inicialmente, a função objetivo não leva em consideração o custo da flexibilidade dos VEs. Depois que a estratégia é aplicada e o valor a ser pago pelo DSO pela flexibilidade dos VEs é adicionado à função objetivo, para comparar com os resultados com e sem a aplicação da estratégia. É importante mencionar que no simulador do comportamento dos VEs, os VEs com estado de carga da bateria (SoC) igual ou inferior a 20% são imediatamente enviados para a estação de carregamento mais próxima e, para esses usuários, os preços da flexibilidade são alterados para valores superiores ao LMP da estação de carregamento em questão.

Com essa alteração, o DSO nunca solicitará que eles parem de carregar, mesmo que a rede esteja fora de seus limites.

Para acelerar o tempo computacional de simulação, cada VE neste trabalho representa 5 unidades. O motivo para não aumentar o número da população de VEs na rede foi devido à carga computacional, que foi alta o suficiente com uma população de 5000 VEs. Portanto, para fazer um VE representar 5, a capacidade da bateria de cada VE e a energia gasta durante cada viagem bem como o preço mínimo do VE para interromper seu carregamento foi alterada.

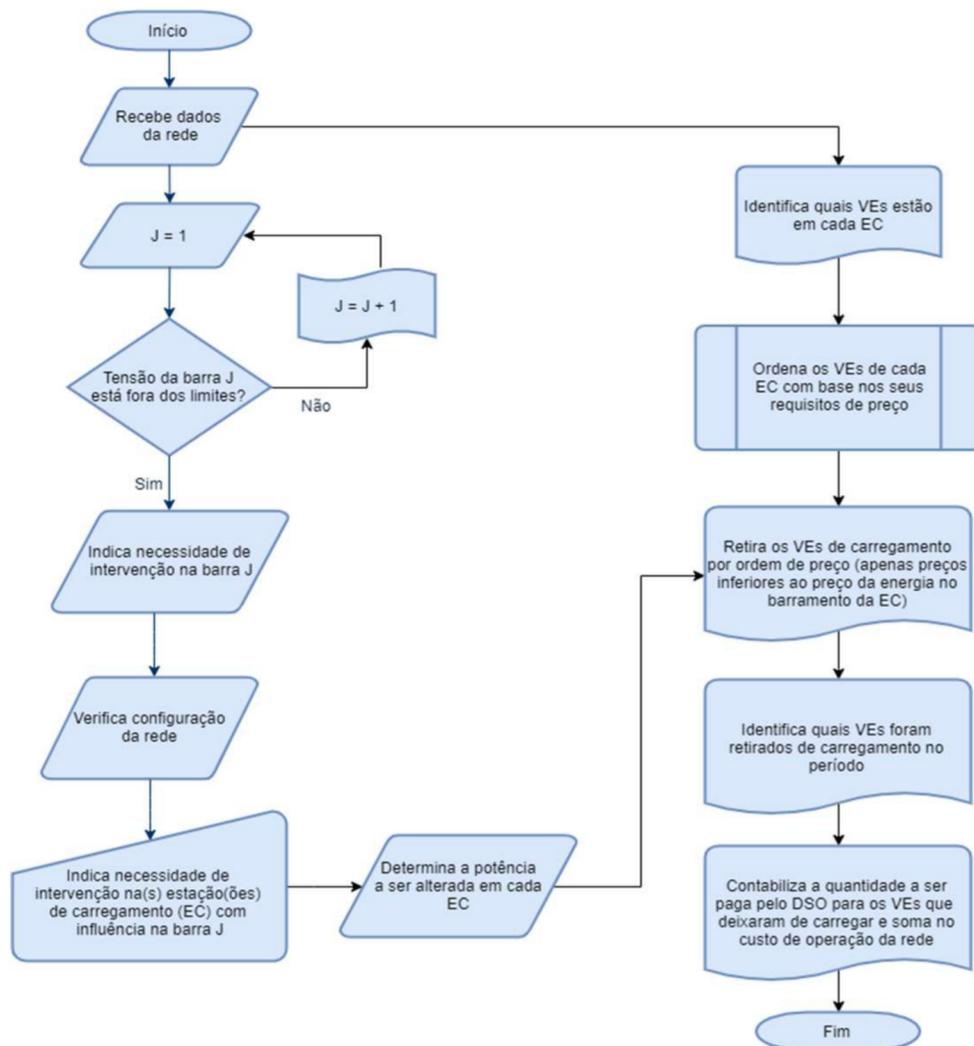


Figura 2. Fluxograma da Estratégia de carregamento dos VEs

### III. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, o estudo de caso do trabalho é apresentado na Fig. 3, com base na rede mencionada acima. Para demonstrar a aplicação da metodologia proposta, foi utilizada a rede de distribuição modelo da cidade inteligente do laboratório BISITE, com 13 barramentos e alta penetração de recursos de energia distribuída.

Essa rede de distribuição possui uma subestação de 30 MVA, 25 pontos de carga (sem incluir os postos de carregamento de VEs), 4 estações de carregamento de VEs, 15 unidades de geração distribuída (2 parques eólicos e 13 parques fotovoltaicos) e 4 baterias de condensadores de 1 Mvar, que também pode ser visto na Fig. 3.

O estudo de caso foi dividido em 2 cenários, com o objetivo de aplicar a metodologia apresentada para posteriores análises dos resultados.

Os cenários são todos semelhantes, a alterar apenas o preço mínimo dos utilizadores de VEs para interromper seu carregamento, possibilitando observar a aplicabilidade da estratégia a diferentes preços de flexibilidade.

#### A. Cenário 1

Nesse cenário, a estratégia de carregamento apresentada no capítulo anterior foi aplicada na rede mostrada na Fig. 3, de forma que o preço médio dos usuários de VE que foram solicitados a interromper o carregamento resultassem em 0,095 € / kW.

O período mais crítico neste cenário (maior custo operacional) foi entre 20h30 e 20h45, com um custo operacional de 424,05 € (antes da estratégia). Portanto, escolhemos esse período para ser analisado em todos os outros cenários, a fim de comparar os resultados da metodologia proposta.

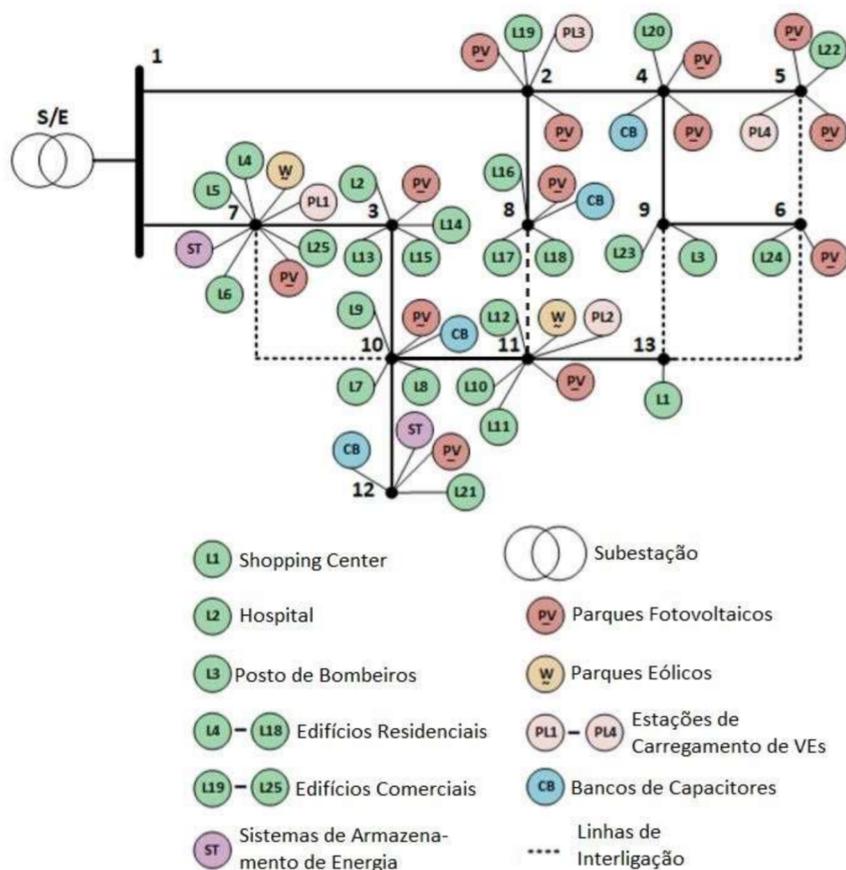


Figura 3. Diagrama Unifilar da Cidade Inteligente [10]

Para avaliar os resultados da aplicação desta estratégia, a magnitude da tensão em todos os barramentos antes e depois da estratégia é mostrada na Tabela I.

Tabela I – Magnitude da tensão no cenário 1

Número Barramento	Tensão Antes da Estratégia (p.u.)	Tensão Após a Estratégia (p.u.)
1	1	1
2	0.919	0.967
3	0.931	0.978
4	0.904	0.953
5	0.889	0.942
6	0.895	0.944
7	0.941	0.985
8	0.886	0.961
9	0.901	0.948
10	0.923	0.973
11	0.881	0.967
12	0.916	0.971
13	0.877	0.959

Para entender os resultados apresentados na Tabela I, é necessário identificar o número de VEs em cada estação de carregamento antes e depois da estratégia, de modo a saber quantos VEs foram retirados de carregamento no período. Estes dados são apresentados na Tabela II.

Tabela II – Distribuição dos VEs no cenário 1

Número da Estação de Carregamento	Número de VEs Antes da Estratégia	Número de VEs Depois da Estratégia	Número de VEs Retirados de Carregamento
1 (Normal)	50	35	15
2 (Normal)	160	125	35
3 (Rápido)	100	80	20
4 (Rápido)	70	60	10

Com essas informações, foi possível calcular a quantidade de energia alterada na rede, 1581 kW. Como mencionado anteriormente, o preço médio da flexibilidade foi de 0,095 €/kW, portanto o valor pago pelo DSO pela flexibilidade dos VEs foi de 150,19 €.

No entanto, como a utilização dessa estratégia implica uma redução nos custos de congestionamento e perdas de energia, que combinados, resultaram em uma redução de 38,45 €, fica evidente que a aplicação da estratégia com esses preços de flexibilidade dos VEs foi insuficiente para tornar a estratégia interessante pela perspectiva do DSO, uma vez que o custo de operação após a estratégia resultou em 535,79 €, enquanto o custo de operação antes da estratégia foi de 424,05 €.

Isso ocorre principalmente pois o custo de congestionamento (0.02 €/kW para linhas com mais de 50% de carregamento) foi significativamente menor que o custo de flexibilidade. O custo de congestionamento nesta rede é linear, o que não é verdade no mundo real, porque os custos de congestionamento das linhas normalmente obedecem o comportamento de uma função exponencial.

#### B. Cenário 2

Este cenário é semelhante ao anterior, mas agora o preço médio do preço mínimo para os usuários de VE parar seu carregamento é de 0,017 €/kW (apenas VEs que foram retirados de carregamento). O custo de operação antes da estratégia continua de 424,05 €. O número de VEs retirados de carregamento neste cenário é o mesmo que o do cenário 1, portanto as magnitudes de tensão nos barramentos antes e depois da estratégia são as mostradas na Tabela I. Consecutivamente, a distribuição dos VEs nesse cenário é igual à distribuição no cenário 1, apresentada na Tabela II.

Como o preço médio do preço de flexibilidade dos utilizadores de VEs retirados de carregamento foi de 0,017 €/kW e a potência alterada no sistema foi de 1581 kW, a quantia paga pelo DSO pela flexibilidade dos VEs foi de 26,87 €. Como este cenário é semelhante ao cenário 1, a redução de custos de congestionamento e a perda de energia é a mesma, 38,45 €. Portanto, neste cenário, o custo de operação após a estratégia resultou em 412,47 €, sendo inferior ao custo de operação antes da estratégia, 424,05 €.

Com essas informações, é possível afirmar que a estratégia se tornou interessante para o DSO, porque as magnitudes de tensão agora são melhores e por um preço mais baixo. Com esse cenário, ficou evidente que, à medida que os preços de flexibilidade dos VEs começam a se aproximar dos custos de congestionamento, a estratégia começa a se tornar interessante pela perspectiva do DSO.

#### IV. CONCLUSÕES

A metodologia proposta foi aplicada a um estudo de caso, realizado em um modelo de uma cidade inteligente com uma rede de distribuição com 13 barramentos. Os resultados mostraram que é possível fazer com que a rede funcione com menor custo operacional em alguns cenários. Isso é possível através do desenvolvimento de estratégias que podem ser benéficas tanto para o DSO quanto para os consumidores. Este trabalho explorou as estratégias desenvolvidas em torno das estações de carregamento de veículos elétricos públicas na cidade inteligente. A ideia é remover ou interromper o carregamento de alguns VEs em períodos em que o custo de operação da rede esteja alto e as linhas sobrecarregadas. Porém, para tornar essa estratégia interessante para todos, é necessário garantir que a remoção do VE de carregamento nesse período não afete as viagens programadas desses VEs e que os proprietários desses VEs recebam uma certa quantia em dinheiro pela flexibilidade disponibilizada.

Através da aplicação da estratégia na rede de distribuição apresentada, foi mostrado que as magnitudes de tensão podem ser melhoradas e diminuir o carregamento do sistema, mas essas melhorias nem sempre valem a pena em termos de custos. Para que os custos valham a pena, os preços da flexibilidade dos VEs devem estar pelo menos próximos da soma dos custos de congestionamento e perda de energia (por unidade de energia, kW por exemplo). É claro que esse custo depende da rede de distribuição, país, etc., e estudos adicionais são recomendados para explorar essa ou outras estratégias semelhantes em mais casos em nível local.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Contribution of Working Groups I II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2014: Synthesis Report." Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, p. 151, 2015.
- [2] UNFCCC, "Adoption of the Paris Agreement," Paris, 2015.
- [3] Int. Org. of Motor Vehicle Manufacturers, "Climate Change and CO2: Automakers set out their global view," Leipzig, 2008.
- [4] M. M. Alam, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, "Dynamic Charging of Electric Vehicle with Negligible Power Transfer Fluctuation," *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.
- [5] A. Foley, I. J. Winning, and B. P. O. Gallachoir, "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [6] T. G. Heydt, "The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1253–1259, 1983.
- [7] S. Rahman and G. Shrestha, "An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 2, pp. 591–597, 1993.
- [8] B. Canizes et al., "Electric Vehicles' User Charging Behaviour Simulator for a Smart City," *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
- [9] J. Soares, T. Pinto, F. Lezama, and H. Morais, "Survey on Complex Optimization and Simulation for the New Power Systems Paradigm," *Complexity*, Aug. 2018.
- [10] B. Canizes, J. Soares, Z. Vale, and J. M. Corchado, "Optimal Distribution Grid Operation Using DLMP-Based Pricing for Electric Vehicle Charging Infrastructure in a Smart City," *Energies*, Feb. 2019.