

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM CURVA DE CARGA ADAPTADA

Abstract— Internal combustion vehicles are one of the largest emitters of gaseous pollutants in the world. With the objective of reducing emissions of polluting gases, some countries have enacted laws prohibiting their manufacture. Given how new requirements such as automotive industries have invested in new technologies, an option for a reduction of emission of polluting gases are electric vehicles. In this context, the present work aims to simulate the IEEE 123 Bus Testing Radial Distribution, using the OpenDSS and MATLAB software, changing the loads shapes and observing the impacts of the recharge of plug-in electric vehicles in the network, with a normal load shape and with an optimized load shape for recharging the EV. An analysis made in the form of energy losses of the whole system of an electric light and the same day with electric vehicles. It is expected that the results show an increase in the electrical losses when comparing a distribution network without VEs, but it is believed that as electrical losses will decrease with an optimized load shape.

Keywords— electric vehicles, peak load shifting, IEEE 123 Bus Test Radial Distribution.

Resumo— Veículos movidos a combustão interna são um dos maiores emissores de gases poluentes da indústria automotiva. Pensando nisso, com o objetivo de reduzir a emissão de gases poluentes, alguns países sancionaram leis proibindo a fabricação dos mesmos. Atendendo as novas exigências, as indústrias automobilísticas tem investido em novas tecnologias. Uma opção para a redução de emissão de gases poluentes são os veículos elétricos (VEs). Os VEs necessitam se conectar à rede elétrica para recarregar suas baterias. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo simular a Rede de Testes IEEE 123 barras, utilizando os software OpenDSS e MATLAB®, alterando as curvas de cargas diárias e observando os impactos da recarga de veículos elétricos *plug-in* na rede, com uma curva de carga normal e com uma curva de carga adaptada para recarga dos VEs. A análise é feita comparando as perdas de energia de todo o sistema de um dia sem veículos elétricos e o mesmo dia com veículos elétricos. Espera-se que os resultados mostrem um aumento nas perdas elétricas, quando se compara a rede de distribuição sem VEs, porém acredita-se que as perdas elétricas diminuirão com a curva de carga adaptada.

Palavras-chave— veículos elétricos, deslocamento de carga, IEEE 123 barras

1 Introdução

Os veículos movidos a combustão constituem a maior parte do mercado automobilístico mundial. Entretanto, devido à preocupações com o meio ambiente, alguns países sancionaram leis proibindo a fabricação de carros cuja fonte de energia seja exclusivamente combustíveis fósseis. Sabendo disso, a indústria automobilística tem investido em novas tecnologias (Times, 2017a) (Times, 2017b).

Os veículos elétricos (VEs) são uma alternativa para a redução da emissão de gases poluentes, pois, são movidos com motores elétricos. Eles podem ser movidos apenas por motores elétricos (veículos elétricos *plug-in* - VEPs), ou por motores elétricos funcionando em conjunto com um motor a combustão (veículos elétricos híbridos *plug-in* - VEHPs). Os motores elétricos, por sua vez, são alimentados por baterias.

Para recarregar as baterias dos VEs, os mesmos devem ser conectados à rede de distribuição de energia elétrica. O número de VEs irá aumentar consideravelmente em alguns anos (Castro and Ferreira, 2010), a recarga das baterias deverá se tornar um problema para as concessionárias de energia, principalmente nos horários de pico, (18 – 22 horas). Dessa forma, isto pode causar problemas de estabilidade e sobrecarga nas linhas de distribuição. Nesse contexto, é necessário desenvolver estratégias e métodos para a recarga dos veículos elétricos.

Há dois conceitos importantes quando se trata de recarga de VEs. O que é conhecido como veículo-para-rede (do inglês *vehicle-to-grid* - V2G), trata de veículos que podem auxiliar a rede em momentos críticos. Por exemplo, injetando energia para regular de níveis de tensão e frequência. O grande desgaste das baterias e o elevado preço, são os principais pontos negativos deste conceito. A segunda definição é rede-para-veículo (do inglês *grid-to-vehicle* - G2V), onde os veículos são apenas cargas para o sistema, consumindo energia. Este conceito é útil de ser utilizado quando é necessário verificar o impacto da recarga dos VEs na rede. Então, mesmo após aplicado uma estratégia de controle que definirá, por exemplo, a taxa de recarga do VE, é necessário recarregar este veículo. Este trabalho só considerará o conceito G2V (Clement-Nyns et al., 2010).

Para os estudos elétricos com os VEs, diferentes simuladores são utilizados. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou, em 2014, Nota Técnica número 057/2014 - SDR/ANEEL, onde é adotado o software *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) para calcular o fluxo de potência e medição dos níveis de perdas elétricas nas redes de distribuição (ANEEL, 2010) (ANEEL, 2014).

Entre os pontos positivos do OpenDSS, destacam-se: os transformadores são modelados de forma genérica, o que possibilita realizar diversos tipos de conexões e simulações; pode-se comunicar e controlar o OpenDSS através de outros

softwares como MATLAB® e VBA; e, por ser um software de código livre, no qual usuários se unem em comunidades online para realizar melhorias e atualizações ao software (Radatz, 2015).

Tendo em vista os problemas ambientais causados pelos veículos de combustão e os problemas que podem acontecer com a operação da rede de distribuição de energia, caso ocorra a recarga descoordenada dos VEs, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma ferramenta computacional que possibilite alterar dinamicamente os cenários de simulação da rede de testes de Distribuição IEEE123 barras, utilizando o software OpenDSS. Em adição, utiliza-se o MATLAB® para alterar os cenários de simulação da rede elétrica com a adesão de VEs. Dessa forma, diferentes níveis de penetração poderão ser inseridos em diferentes perfis de consumo.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira: na Seção 2, apresentam-se os VEs, as diferenças entre cada modelo existente. Também serão expostos os impactos e benefícios causados pela inclusão dos VEs na rede de distribuição. A metodologia utilizada para realizar as simulações, bem como uma explicação sobre os softwares empregados e da rede de distribuição estão presentes na Seção 3. As análises e os resultados das simulações das perdas elétricas sem e com inclusão de veículos elétricas são expostas na Seção 4. Por fim, a Seção 5 apresenta as considerações dos resultados obtidos e também objetivos para as próximas etapas do trabalho.

2 Veículos Elétricos

Os VEs são veículos automotores que utilizam motores elétricos para se locomover. A energia para os motores é proveniente de baterias ou supercapacitores. As principais características desse tipo de veículo são: a baixa ou nula emissão de gases poluentes e a alta eficiência energética (ABVE, 2017).

Os veículos elétricos podem ser divididos em dois grupos. No primeiro, têm-se os veículos elétricos *plug-in* (VEP), onde encontram-se os veículos à bateria (VEB) e os veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHP). A característica principal deste grupo é a necessidade de se conectar à rede de energia para recarga das baterias. No outro grupo, estão os veículos elétricos híbridos (VEH), constituídos por motores a combustão e elétricos e diferencia-se dos outros tipos por não se conectar à rede para recarga.

Segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), em sete estados brasileiros (MA, PI, CE, RN, PE, SE e RS), os veículos elétricos são isentos de IPVA e em outros três estados (SP, RJ e MS) o imposto possui um valor menor para os VEs. Fato este, que tende a incentivar a difusão dos VEs (ABVE, 2017).

2.1 Impacto da recarga descoordenada dos VEs

O grande benefício dos VEs, quando comparado aos veículos movidos a combustão interna, é o fato da baixa ou nula emissão de gases poluentes. Em um estudo realizado por Basso (2011), conclui-se que caso ocorra a recarga descoordenada de VEs, principalmente em horário de pico das 18 às 22 horas, a energia para a recarga dos mesmos provavelmente será proveniente de termoeletricas. A fonte de energia mais comum para as termoeletricas brasileiras são o carvão e os derivados do petróleo. Com isso, uma recarga descoordenada implicará no despacho das termoeletricas, causando um efeito contrário do objetivo inicial, que era a redução dos gases poluentes (Basso, 2011).

Sem uma coordenação na recarga dos VEs, a recarga se torna imprevisível. Aliado ao fato dela ser cíclica e variável, isso poderá trazer complicações para a rede de distribuição. Existe uma tendência a que os proprietários de VEs recarreguem seus veículos após retornar do expediente de trabalho. Consequentemente, os VEs serão conectados à rede no horário crítico do sistema elétrico, sobrecarregando todo o mesmo (Saldanha, 2015).

Em um estudo realizado por Hoog 2016, com a recarga descoordenada e entrega de potência máxima para os VEs até as baterias estarem 100% carregadas, houve sobrecarga nos transformadores e queda de tensão para grande parte dos clientes (de Hoog et al., 2016).

Em adição, a recarga descoordenada aumenta a demanda de energia, causando uma elevação nas faturas de energia (Halbleib et al., 2012). Segundo (Veldman and Verzijlbergh, 2015), o acréscimo no valor das faturas de energia ocorre pelo aumento das perdas elétricas.

2.2 Benefícios dos VEs

Os principais benefícios da utilização dos VEs são as vantagens ambientais. A redução da emissão de gases poluentes é, de fato, algo crucial para a popularização dos VEs.

Os VEs também podem ser usados para ajudar a rede de distribuição de energia elétrica, com serviços ancilares. Para isso é necessário que os veículos sejam agrupados em estacionamentos inteligentes, que são conhecidos como agregadores (Guille and Gross, 2009).

Para que seja possível beneficiar a rede de distribuição, os agregadores são conectados no conceito V2G, na qual os veículos podem fornecer energia para a rede, ajudando com regulação de tensão, controle de frequência, nivelamento de carga de pico dentre outras (Clement-Nyons et al., 2010).

Entretanto, para validar todos os benefícios para o auxílio da rede elétrica é de suma importância a utilização de uma ferramenta robusta que possa auxiliar na simulação de diferentes níveis

de penetração dos VEs em diferentes condições da rede. Dessa forma, a proposta deste trabalho de desenvolvimento de uma ferramenta dinâmica para as simulações dos VEs na rede elétrica é apresentada na próxima seção.

3 Metodologia

Os processos envolvidos na execução deste trabalho são apresentados na Figura 1. Na primeira etapa, o usuário informa o dia e qual o tipo de simulação será realizado. Isto permite escolher dentre diferentes condições do sistema onde são incorporadas variações diárias, semanais, mensais, anuais e sazonais. Na segunda etapa, são executados os cálculos de fluxo de potência e perdas elétricas, conforme as entradas definidas. Na última etapa, são apresentadas as saídas resultantes das simulações.

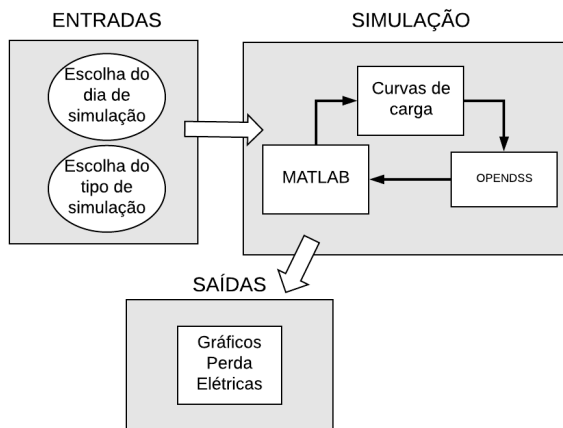


Figura 1: Representação gráfica do processo de simulação.

Fonte: Próprio autor (2017)

3.1 OpenDSS

O OpenDSS é um software livre baseado em linhas de comando utilizado principalmente para a simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica. O software utiliza a interface *Component Object Model* (COM), facilitando aos usuários a criação de soluções em outras ferramentas computacionais. É possível controlar o OpenDSS através de outros softwares e linguagens de programação, como por exemplo Python, MATLAB® e VBA. (Radatz, 2015)

3.2 MATLAB®

No presente trabalho, o software MATLAB® tem como funções:

- Realizar a interface gráfica onde o usuário informa o dia e o modo de simulação;
- Inicializar o OpenDSS;

- Comunicar os dados de entrada para o OpenDSS;
- Comunicar os comandos de execução para o OpenDSS;
- Receber os dados do OpenDSS;
- Gerar os gráficos resultantes da simulação e;
- Mover os resultados para uma pasta correspondente ao dia simulado.

3.3 Estacionamento Inteligente

Para gerenciar os VEs, a recarga será realizada em estacionamentos inteligentes (agregadores). Esses locais tem como principal função realizar a recarga das baterias de modo que não prejudique o sistema elétrico, controlando o horário que os VEs se recarregam e a taxa de recarga dos mesmos.

Esses estacionamentos estarão localizados em áreas comerciais, universidades, centros de pesquisa, institutos e demais locais com grande concentração de veículos. Portanto, a recarga dos VEs ocorrerá em horário comercial, das 8 às 12 horas e das 14 às 18 horas. Dessa forma, o problema da recarga dos VEs no horário de pico (18-22 horas) será reduzido.

4 Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da rede teste IEEE 123 Barras. Elas foram realizadas no software OpenDSS com o auxílio do MATLAB®. Objetiva-se analisar e comparar as perdas elétricas para o sistema: sem VEs, com VEs e com VEs com diferentes curvas de carga.

4.1 Rede de testes de distribuição IEEE 123 barras

As simulações foram realizadas na rede teste de distribuição IEEE 123 barras. Este sistema foi escolhido por ser uma rede elétrica grande e amplamente estudada, podendo assim estabelecer comparações com outros estudos já realizados (IEEE, 2017).

4.2 Simulações

As simulações foram realizadas no modo diário, onde os resultados são obtidos a cada hora do dia. Para isso, são necessárias curvas de carga com 24 pontos.

As curvas de carga utilizadas neste trabalho, foram retiradas da rede de distribuição IEEE 123, que originalmente tem uma curva de carga anual, a qual essa foi dividida em 365 curvas de carga com 24 pontos cada.

Escolheu-se uma curva de carga com perfil residencial, para observar como serão as perdas de energia na rede de distribuição: sem alterações e com a inclusão de VEs. Na Figura 2, apresenta-se a curva de carga adotada, que tem como característica principal o seu consumo máximo entre as 18 e 22 horas.

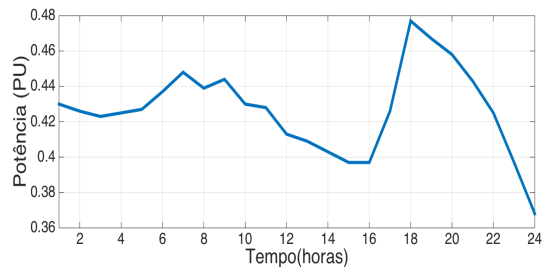


Figura 2: Curva de carga com perfil residencial.
Fonte: Próprio autor (2017)

Para reduzir o impacto causado pela recarga dos VEs e comparar com as outras simulações, será realizada uma simulação onde as frotas dos VEs terão uma curva de carga diferente da curva adotada para todo o sistema.

Neste caso, os VEs serão conectados à rede somente em momentos onde há baixo consumo, reduzindo principalmente a recarga no horário de pico. A curva de carga, específica para a recarga do VEs utilizada na simulação, é apresentada na Figura 3.

Diferentemente das outras curvas de carga, essa curva não foi adquirida com o sistema teste IEEE. É uma curva de carga genérica, feita a partir de análises do perfil de consumo residencial, a qual tem o objetivo de preencher os vales e reduzir a recarga no horário de pico.

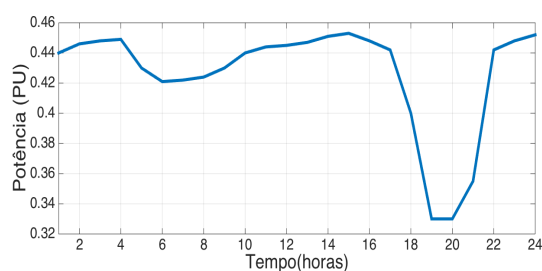


Figura 3: Curva de carga específica para recarga dos VEs.
Fonte: Próprio autor (2017)

Para a simulação com a penetração de VEs, foram adicionados 30 frotas de VEs. A localização dos estacionamentos inteligentes na rede de teste é ilustrada na Figura 4.

Para realizar a simulação com a inclusão de VEs, foram delimitados valores de potências máximas e mínimas requeridos pelos agregadores, para a que ocorra a recarga dos VEPs.

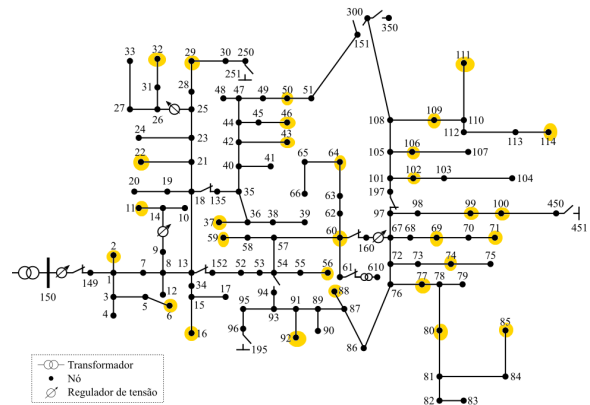


Figura 4: Localização dos estacionamentos inteligentes na rede de distribuição.
Fonte: Adaptado de IEEE 123 bus (2017).

Para a simulação, foram escolhidos valores de potência dentro do intervalo calculado, como pode-se observar na Figura 5.

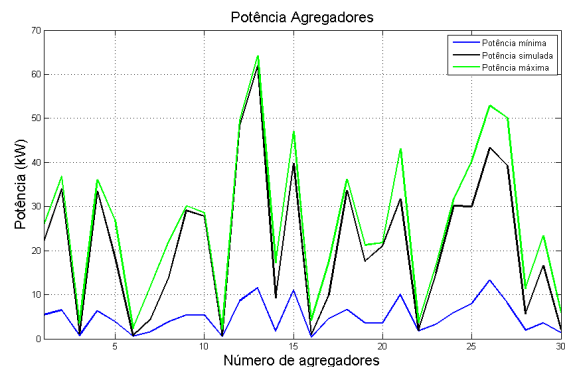


Figura 5: Potência entregue aos agregadores.
Fonte: Próprio autor (2017)

4.3 Perdas elétricas sem veículos elétricos

Na Figura 4.3, observam-se as perdas elétricas para a rede de distribuição sem a inclusão de VEs. Como já era esperado, as perdas elétricas totais da rede de distribuição se mantém com o perfil da curva de carga residencial utilizada para realizar a simulação.

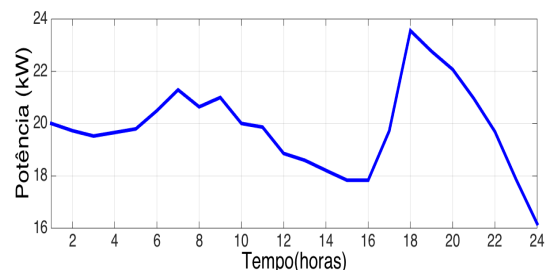


Figura 6: Perdas totais sem VEs.
Fonte: Próprio autor (2017)

4.4 Perdas elétricas com inclusão de veículos elétricos

Na Figura 7, observa-se as perdas elétricas com a inserção de veículos elétricos na rede de teste de distribuição IEEE 123 barras. Na linha contínua constam as perdas elétricas referentes a curva de carga com perfil residencial. A linha tracejada representa as perdas elétricas utilizando a curva de carga adaptada, que tem como característica principal o preenchimento dos vales e a remoção da recarga dos VEs no horário de pico.

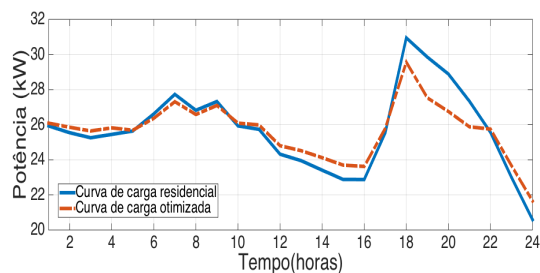


Figura 7: Perdas totais com recarga dos VEs.
Fonte: Próprio autor (2017)

Pelos gráficos, observa-se que com a inserção dos VEs na rede de distribuição ocorre uma variação nos resultados das simulações. Isso acontece pois as trinta frotas inseridas representam cargas elétricas para o sistema. Consequentemente, as perdas de energia na rede de distribuição variam conforme as cargas aumentam.

Conforme apresentado na Tabela 1, houve um aumento nas perdas totais com a inclusão dos VEs. Porém, quando se utilizou uma curva de carga diferente para os VEs, cujo objetivo era evitar a recarga dos mesmos durante o horário de pico, ocorreu uma redução das perdas comparando com o resultado da curva de carga residencial.

Tabela 1: Perdas totais diárias (kW).

Residencial	Residencial com VEs	Adaptada com VEs
476,1905	617,1344	615,8662

Fonte: Próprio autor (2017)

A redução das perdas ficam mais evidentes quando se analisa somente o horário de pico 18 – 22 horas. Nesse período, ocorreu um decréscimo de cerca de 5%, como pode-se ver na Tabela 2, onde se compara os resultados entre a recarga com a curva de carga residencial e a curva de carga adaptada.

Os resultados podem ainda ser melhores, caso não ocorra a recarga de veículos elétricos durante o horário crítico da rede.

Tabela 2: Perdas no horário de pico com recarga dos VEs (kW).

Hora	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00
Residencial com VEs	30.94	29.85	28.88	27.33	25.56
Adaptada	29.56	27.53	26.75	25.87	25.75

Fonte: Próprio autor (2017)

5 Conclusões

Este trabalho apresentou os diferentes tipos de veículos elétricos, os impactos causados pela recarga descoordenada e os benefícios dos VEs.

Para simular a rede de testes de 123 barras da IEEE foram utilizados os softwares OpenDSS e MATLAB®.

As simulações foram feitas no modo diário, onde comparam-se as perdas de energia na rede elétrica sem veículos elétricos, com VEs inseridos em uma curva de carga residencial e com VEs inseridos em uma curva de carga adaptada.

Observou-se a importância das simulações para a operação do sistema elétrico de potência. Dessa forma, estima-se como a rede irá se comportar com a penetração de cargas consideráveis, podendo manter a qualidade e a confiabilidade da energia entregue ao consumidor final.

Em adição, observou-se um elevado aumento das perdas elétricas, causado pela recarga dos veículos elétricos. Porém, mostrou-se que com uma curva de carga adaptada, as perdas elétricas foram reduzidas no horário de pico, demonstrando assim, a importância do controle da recarga dos VEs.

Para a continuidade deste trabalho é previsto o controle inteligente da recarga de veículos elétricos no sistema teste da IEEE. Isto objetiva tornar mais eficiente a redução de perdas do sistema de distribuição e reduzir ainda mais os impactos causados pela inserção dos veículos elétricos na rede.

Também será desenvolvido uma plataforma robusta e de fácil uso para verificar o impactos dos VEs em diferentes redes de testes de distribuição, com variação de curva de carga e VEs.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) pela bolsa do Programa de Desenvolvimento Acadêmico (PDA), aos professores e colegas do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP) que me ajudaram a realizar esta pesquisa.

Referências

ABVE (2017). Associação brasileira de veículos elétricos.

- ANEEL (2010). Módulo qualidade da energia elétrica. aneel resolução normativa, *x* **424**(11): 2010.
- ANEEL (2014). Resolução normativa, módulo 7 cálculo de perdas na distribuição, **424**(11): 2010.
- Basso, C. (2011). *O Impacto Veículos Elétricos Plug-in no Sistema Elétrico de Potência*, Master's thesis, Universidade Federal do Pampa.
- Castro, B. H. R. d. and Ferreira, T. T. (2010). Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades, *BNDES Setorial*, *n. 32*, set. 2010, *p. 267-310*.
- 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* **25**(1): 371–380.
- de Hoog, J., Alpcan, T., Brazil, M., Thomas, D. A. and Mareels, I. (2016). A market mechanism for electric vehicle charging under network constraints, *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(2): 827–836.
- Guille, C. and Gross, G. (2009). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (v2g) implementation, *Energy policy* **37**(11): 4379–4390.
- Halbleib, A., Turner, M. and Naber, J. (2012). Control of battery electric vehicle charging for commercial time of day demand rate payers, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, IEEE, pp. 1–5.
- IEEE (2017). Distribution test feeders ieee 123 bus.
- Radatz, P. (2015). Modelos Avançados de Análise de Redes Elétricas Inteligentes Utilizando o software OpenDSS.
- Saldanha, J. J. A. (2015). *Sistema Inteligente para o Controle da Recarga de Veículos Elétricos Híbridos Plug-in Visando o Benefício do Sistema Elétrico de Potência*, Master's thesis, Universidade Federal do Pampa.
- Times, T. N. Y. (2017a). Britain to ban new diesel and gas cars by 2040.
- Times, T. N. Y. (2017b). France plans to end sales of gas and diesel cars by 2040.
- Veldman, E. and Verzijlbergh, R. A. (2015). Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives, *IEEE Transactions on Smart Grid* **6**(1): 333–342.