

Veículos elétricos em redes de baixa tensão – Impactos na qualidade da distribuição de energia.

Ferreira A.G.L. *
Aguiar V.P.B. **
Correia. W. B. ***
Pontes R.S.T. ****

*Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE 60455-760
BR (Tel: 85 33669581; e-mail: antoniogustavolf@hotmail.com).
**Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN 59625-900
BR (Tel: 84 33178200; e-mail: victor@ufersa.edu.br).
***Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE 60455-760
BR (Tel: 85 33669581; e-mail: wilkley@dee.ufc.br).
****Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE 60455-760
BR (Tel: 85 33669581; e-mail: ricthe@dee.ufc.br).
****Universidade de Fortaleza, Fortaleza, CE 60811-905
BR (Tel: 85 34773047; e-mail: ricthe@unifor.br).

Abstract: One of the main challenges of sustainable development is global climate change, resulting from the intense consumption of oil and coal derivatives. The transition towards a carbon-free world will be a challenge for this and future generations. The electric energy sector, due to its renewable sources of energy generation, such as photovoltaic (PV) and wind, becomes one of the main agents in the decarbonization of the global economy. In this context, electric vehicles (EV) gain great importance, as the transport sector is currently responsible for the emission of about a quarter of the total emissions of greenhouse gases, therefore, EVs can be seen as being a potential solution. This paper seeks to analyze, through a simulation in the OpenDSS software, plug-in electric vehicles connected in low voltage networks, aiming to identify how they can influence different aspects in the distribution networks, especially regarding voltage drop, active losses and overload in the transformer, through the different charging modes (slow, intermediate and fast), so that it can be seen that there was an influence on the worsening of the quality levels.

Resumo: Um dos principais desafios do desenvolvimento sustentável são as alterações climáticas globais, provenientes do intenso consumo de derivados do petróleo e do carvão. A transição em direção a um mundo livre das emissões de carbono será um desafio para esta e para as futuras gerações. O setor de energia elétrica, devido suas fontes renováveis de geração de energia, como a fotovoltaica (FV) e a eólica, torna-se um dos principais agentes na descarbonização da economia global. Neste contexto, os veículos elétricos (VE) ganham grande importância, na medida em que o setor dos transportes atualmente é responsável pela emissão de cerca de um quarto do total das emissões de gases com efeito de estufa, portanto, os VE's podem ser vistos como sendo uma potencial solução. Este artigo busca analisar, por meio de uma simulação no *software* OpenDSS, os veículos elétricos plug-ins conectados em redes de baixa tensão, tendo como objetivo identificar o modo como estes podem influenciar em diferentes aspectos nas redes de distribuição, principalmente quanto a queda de tensão, perdas ativas e sobrecarga no transformador, através dos diferentes modos de carregamento (lento, intermediário e rápido), de modo que poderá ser visto que houve influência na piora dos níveis de qualidade.

Keywords: Quality levels; Electric vehicles; Low voltage grid; Distributed generation; Qualities of service and product.

Palavras-chaves: Níveis de qualidade; Veículos elétricos; Rede de Baixa tensão; Geração distribuída; Qualidades do serviço e produto.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o tema sustentabilidade vem ganhando notória relevância em todos os setores sociais e econômicos no mundo, de modo que diversos países e empresas vem

fazendo elevados investimentos em áreas relacionadas ao assunto, que vem desde a conquista de "selos de excelência", até a implementação em larga escala de fontes de energias renováveis, seja por meio de incentivos fiscais ou mudanças nas legislações vigentes, porém o grande foco desde o

começo do século são os veículos movidos por eletricidade. A constante busca pelo desenvolvimento sustentável encontrou nos veículos elétricos a melhor causa para a diminuição das consequências geradas por motores a combustão, por meio de sua alta eficiência, baixa emissão local de poluentes e custo operacional baixo, segundo Su et al. (2012) e desse modo, fomentar nações a investirem em energias alternativas no intuito de melhorar sua respectiva pegada de carbono, pois irá gerar energia limpa. Entretanto, a rápida integração de tais transportes vem necessitando de estudos nas mais diversas áreas, desde novas tecnologias para o armazenamento de energia até o impacto e comportamento destas novas cargas que se caracterizam pela imprevisibilidade tanto temporal como espacial, pois o seu carregamento é em níveis de corrente, horários e locais diferentes, apresentando assim vários cenários a serem analisados.

A partir deste ponto, o objetivo atualmente das distribuidoras é buscar entender como esses veículos irão influenciar em aspectos positivos ou negativos, primeiramente nas redes de baixa tensão, e deste modo fazer o tratamento de dados relacionados à qualidade de energia em função de obter características, secundamente trarão novas perspectivas para as concessionárias em questão de realizar mudanças mitigando os impactos negativos, além de utilizar essa tecnologia em benefício tanto para si própria como para o consumidor, através de análises e estudos de caso.

Com o objetivo de realizar simulações de operação dos centros de recarga, e sistemas de armazenamento na rede de distribuição de baixa tensão, tendo como intuito entender as consequências que serão geradas, foi utilizado um *software* de programação com ênfase em sistemas de distribuição chamado OpenDSS, operando com dados reais da rede, e montagens de cenários.

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.1 Conceito dos VEs

Segundo Hussain (2003) no começo do século XX os veículos movidos a vapor e a eletricidade eram mais vendidos que os movidos por motores de combustão interna (MCI), o cenário foi se alterando durante os anos com a presença dos veículos movidos a MCI que dominaram a indústria automobilística no século XX. Uma nova alternância, neste domínio, está sendo presenciado nos dias atuais com a inserção de veículos híbridos, movidos tanto a combustão como a eletricidade, e os veículos puramente elétricos, pois desde a crescente "onda" de sustentabilidade na década de 1990, estes tipos de automóveis voltaram a ganhar importância e variados estudos foram e estão sendo feitos para que estes possam ser socioeconomicamente viáveis, tanto no que visa o fator econômico voltado ao preço de seus componentes, como as baterias e a eletrônica de potência, até o fator social, determinado de como a sociedade irá interagir com um novo tipo de infraestrutura como aborda, Kempton e Tomic (2005), entre outros atores, que fazem análises desde os aspectos construtivos dos carros (sistemas de armazenamento, motor e eletrônica de potência), até a

conexão destes nas redes visando às características de carregamento e o comportamento destas cargas nas redes de distribuição.

Entretanto, é necessário ressaltar que existem variações nas configurações destes veículos, como pode ser observada na figura 1 (Castro; Ferreira, 2010). Sendo o veículo puramente elétrico a base deste estudo.

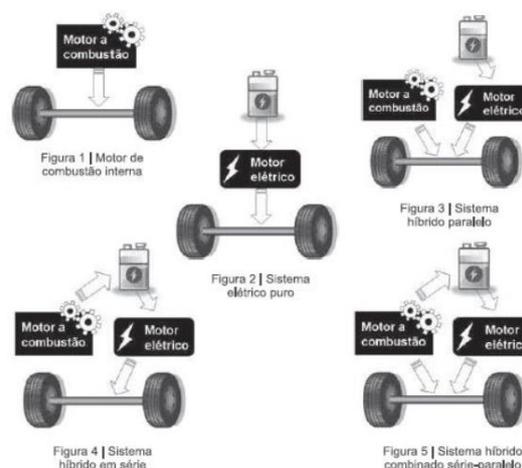


Fig. 1 Tipos de veículos elétricos.

No veículo puramente elétrico todo o seu sistema de tração é feito unicamente por um motor elétrico, logo esse modelo é dotado de um sistema de armazenamento de energia, que precisa ser recarregado. Por possuir apenas o sistema de tração elétrica necessita de períodos de recarga mais curtos e, dependendo da sua utilização, com maiores níveis de potência para a recarga.

2.2 Sistema de armazenamento

O sistema de armazenamento de um carro elétrico é definido como um conjunto de baterias (*packs*), sendo que estas são conjuntos de pilhas que poderão estar conectadas em série, caso se deseje uma maior tensão, ou em paralelo, aumentando a sua capacidade nominal de carga, sendo assim buscando os níveis de corrente e tensão adequados para a operação na qual for atribuída.

Fabricantes ao redor do mundo pesquisam e desenvolvem baterias, em que essas características possam ser elevadas, ou seja, maior potência, de modo que o volume e o preço não aumentem substancialmente, consequentemente ocorrendo à melhoria da sua autonomia e do seu rendimento. Logo, o sistema de armazenamento torna-se o maior desafio para que se tenha uma maior evolução e um menor custo para os VE's.

Dois tipos de baterias são conhecidos, as primárias ou não recarregáveis e as secundárias que permitem a recarga. As baterias secundárias serão as abordadas neste trabalho, pois são estas as utilizadas nos veículos elétricos, e assim se caracterizam desde que sejam capazes de suportar mais de 300 ciclos completos de carga e descarga com 80% da sua capacidade.

As baterias de íon lítio foram responsáveis por substituir as baterias de chumbo ácido e níquel, pois estas, mesmo baratas, não possuíam energia específica e potência específica para utilização em grande escala, em aparelhos como celulares e *notebooks*. Desenvolvidas no início da década de 1970, devido as suas características reativas com outros materiais, elas foram categorizadas como perigosas, entretanto com o avanço dos estudos, foi possibilitado um melhor funcionamento, atualmente estas baterias estão presentes em todos os *notebooks* e celulares. Outra aplicação que será vista neste trabalho se refere a sua capacidade de armazenar e fornecer energia para a rede de distribuição em certos casos.

O sistema de gerenciamento de baterias (BMS - *Battery Management System*) torna-se um importante elemento capaz de monitorar de que modo a bateria está sendo utilizada em seu processo de descarga, realizando o controle no processo de carga por meio da medição e estimativa dos parâmetros da bateria. Esse aparelho é fundamental como agregador de dados, pois estes serão utilizados na central de recarga ou por uma *smart grid* para determinar os níveis de operação de recarga a qual o veículo será submetido.

2.3 Centrais de recarga e eletrônica de potência

Atualmente há uma vasta gama de carregadores, podendo ir de aparelhos residenciais, até aos que podem oferecer até três recargas de diferentes níveis (lenta, média ou rápida), chegando aos mais avançados que ainda estão em desenvolvimento, como o caso do carregador indutivo ou *wireless*, que não necessitará de uma conexão direta entre a rede de distribuição de energia elétrica e o VE, as variações dessas tecnologias podem ser vistas na figura 2 (Rodrigues et al. 2014). Porém, os dois principais ramos que agrupam essas tecnologias são as embarcadas ou as externas.

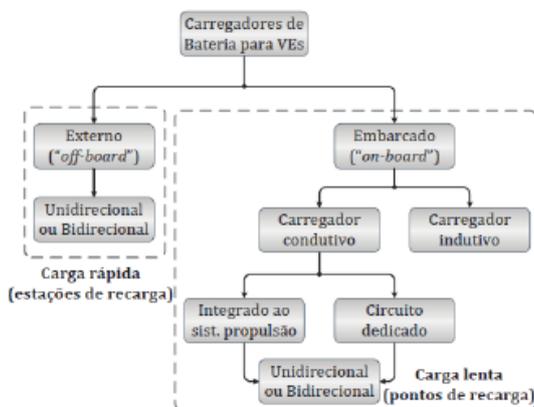


Fig. 2 Classificação dos carregadores de baterias atualmente utilizados em VEs.

A eletrônica de potência de um carregador de bateria é baseada em um circuito eletrônico, compostos por um conversor CA-CC, conversor CC-CC e filtro para eliminação de distorções harmônicas segundo Arrabaça (2016). O carregador pode ser tanto monofásico, mais comum na

tecnologia embarcada em corrente alternada (CA), como pode ser trifásico, comum no carregamento externo em corrente contínua (CC).

Segundo Rodrigues (2014), carregadores embarcados são associados à recarga noturna, pois esses possuem um nível menor de tensão, de modo que a retificação possa ser feita no próprio sistema do carro, logo as recargas duram mais tempo. Enquanto os do tipo externo são relacionados às estações de recarga rápida, pois devido à elevada tensão e corrente, são necessários retificadores mais potentes, portanto duram menos tempo. Desse modo, o carregador embarcado é aquele em que todo o sistema é levado a bordo do VE, logo o peso e o volume restringem a sua utilização para recargas mais rápidas, como se vê na figura 3 (Rodrigues et al. 2014). Desses tipos de carregadores, a *wallbox* é seu principal representante. Utilizado nas residências para controle de recarga dos veículos elétricos, a instalação da *wallbox* é bem simples, necessitando principalmente, de cuidados com relação a dimensionamento de dispositivos de proteção, como disjuntores, e dos cabos de alimentação.

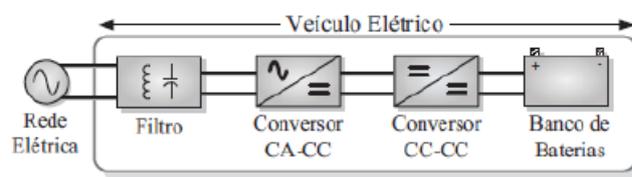


Fig. 3 Carregador de baterias para VEs - diagrama de blocos (circuitos típicos): carregador embarcado.

Em um carregador externo, todo o sistema de recarga será situado fora do VE, e a conexão será feita de modo direto para a bateria já em CC, como esse processo é externo, não há preocupação com o tamanho ou peso dos centros de recarga, logo maiores níveis de potência serão ofertados, como se vê na figura 4 (Rodrigues et al. 2014).

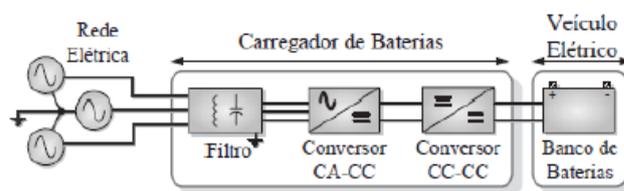


Fig. 4 Carregador de baterias para VEs - diagrama de blocos (Circuitos típicos): carregador externo.

Centros de recarga são equipamentos com eletrônica de potência mais complexa, pois estes são capazes de disponibilizarem potências que vão desde 22 kW até 250 kW, logo são necessários filtros e conversores mais especiais, pois os níveis de tensão, corrente e frequência são mais elevados, de forma que as recargas se tornem semirrápidas ou rápidas, com durações que podem ir de 3h até 30 minutos.

Os modelos de carregadores terão seus conectores possuindo características semelhantes, desde pinos capazes de monitorar

e controlar a entrada de corrente no sistema de armazenamento, até modos capazes de controlar e monitorar subsistemas de redundância, capazes de oferecerem mais segurança para o cliente. Esses modelos não são padronizados, logo possuem diferentes tipos, de acordo com a fabricante.

Conectores e eletrônica de potência que estão sendo evoluídos, para que possam ser utilizados como um sistema bidirecional, ou seja, o sistema de armazenamento alimentar a rede elétrica em ocasiões específicas, conhecido como V2G (*Vehicle to Grid*), ou veículo para a rede, entretanto ainda não possui legislação que viabilize esse modelo.

Assim como os conectores, os métodos de recarga também possuem padrões de procedimentos, através de normas específicas, que caracterizarão o nível de recarga, sua aplicação, e os níveis de tensão e corrente. Outro fator a ser apontado, como dito anteriormente, é quanto à forma de onda dessa recarga, logo como dito anteriormente para recargas mais lentas a transferência de energia do centro para o carro será em CA, já em recargas mais rápidas essa transferência é feita diretamente em CC. A tabela 1 mostra as normas de regulação, para esses métodos de recarga, (IEC's 61851,62196 e 62752), segundo Hanauer (2018), respectivamente:

Tabela 1. Métodos de recarga pelas IEC's 61851,62196 e 62752

Modo de Recarga	Descrição	Máximas correntes e tensões
Modo 1	Conexão condutora entre um padrão de tomada de uma rede de alimentação CA e o VE sem comunicação ou recursos de segurança adicionais	16 A, 250 VCA, 1 Fase 16 A, 480 VCA, 3 fases
Modo 2	Conexão condutora entre um padrão de tomada de uma rede de alimentação CA e o VE sem comunicação e recursos de segurança adicionais	32 A, 250 VCA, 1 Fase 32 A, 480 VCA, 3 fases
Modo 3	Conexão condutora entre um VE e a uma central de recarga em CA com comunicação e recursos de segurança adicionais	1: 32 A, 250 VCA, 1 Fase 2: 70 A, 250 VCA, 1 fase 63 A, 480VCA, 3 fases 3: 16/32 A, 250 VCA, 1 Fase 63 A, 480VCA, 3 fases
Modo 4	Conexão condutora entre um VE e a uma central de recarga em CC com comunicação (de alto nível) e recursos de segurança adicionais	AA: 200 A, 600 VCC BB: 250 A, 600 VCC EE: 200 A, 600 VCC FF: 200 A, 1000 VCC

2.4 Legislação voltada aos VE's e aos centros de recarga

Nos últimos anos o governo vem tentando desenvolver políticas públicas para o crescimento do mercado nacional destes veículos elétricos e híbridos. Visando as metas de redução das emissões de CO₂, vários incentivos foram criados para fomentar maior adesão, sejam municipais, estaduais ou federais. Ademais, pode ser citado o projeto de Lei do Senado Brasileiro nº304, de 2017 que diz: "A partir de 1º de janeiro de 2030 estará proibida a venda de veículos novos movidos a combustíveis fósseis no Brasil, e em 2040 nenhum automóvel a gasolina ou diesel poderá circular no país" (BRASIL, 2017).

A principal legislação regulamentadora que foi criada para este novo mundo se refere aos centros de recarga, a Resolução Normativa nº 819/2018, nela se permite que qualquer pessoa que for aprovada seguindo os critérios de cadastro, possa instalar uma central de recarga e cobrar pelo serviço prestado.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) optou por uma regulamentação mínima do tema, com o objetivo principal de evitar interferências indesejáveis dessas atividades com a operação da rede elétrica e garantir que as tarifas dos consumidores de energia elétrica das distribuidoras não sejam impactadas pela prestação do referido serviço quando realizado pelas distribuidoras de energia elétrica (ANEEL, 2018).

3. SISTEMA DE POTÊNCIA

3.1 Cenário brasileiro

Os sistemas elétricos de potência (SEP) possuem três subsistemas bem definidos, são eles a geração, a transmissão e a distribuição, que segundo Kagan (2017) "têm a função precípua de fornecer energia elétrica aos usuários, grandes ou pequenos, com a qualidade adequada, no instante em que for solicitada".

Na matriz energética brasileira as hidrelétricas predominam no cenário de geração de energia, devido ao grande potencial hídrico em território nacional, quase 61% da produção de energia elétrica brasileira advém dessa fonte. Em seguida estão à energia eólica com quase 16 MW instalados, biomassa com aproximadamente 15 MW e em sétimo lugar a solar fotovoltaica em constante crescimento.

A inserção de veículos elétricos no sistema de potência é alvo de estudos, e de desenvolvimento, pois o objetivo principal de pesquisadores é garantir uma maior capacidade de energia nos sistemas de armazenamento, e centros de recarga realizando-a o mais rápido possível, gerando consequências pela crescente demanda.

3.2 Qualidade do produto

A ANEEL criou procedimentos (Módulo 8 do Prodist, 2022) visando à regulação das distribuidoras, com o propósito de estabelecer padrões tanto para a qualidade do produto, como para a qualidade do serviço. Para este artigo os indicadores estudados são referentes à qualidade do produto, ou seja, será analisada a qualidade da rede quanto aos níveis de tensão em regime permanente conforme a tabela 2, de modo que 220 V para monofásico, e 380 V para trifásico irão equivaler a 1 pu (por unidade), logo valores abaixo de 0,92 pu serão considerados precários, e valores abaixo de 0,87 pu, críticos.

Tabela 2. Indicadores de qualidade do produto

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação de Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 223)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

3.3 Legislação voltada a geração distribuída

Segundo as Resoluções Normativas n° 482 (ANEEL, 2012), e n° 687 (ANEEL, 2015) foram estabelecidos parâmetros básicos para a geração distribuída (GD), desde o acesso a rede de distribuição, sistema de compensação, até os limites nos níveis de fornecimento, logo ficou definido que a micro geração terá como potência instalada valores abaixo de 75 kW, com possibilidade de ser conectada à rede em baixa tensão, e a mini geração com potência instalada acima de 75 kW e menor que 5 MW. Estas resoluções ainda não permitem que o sistema de armazenamento do VE atue como GD para o sistema, exceto que seja pra própria unidade consumidora do usuário.

4. METODOLOGIA

4.1 Espaço amostral

Para se criar os cenários de recarga é necessário primeiro entender como funciona a autonomia dos veículos elétricos dentro de um centro urbano, ou em uma capital, que tem como característica o tráfego denso em horários de pico, tanto no começo da manhã, como no início da noite, que irão interferir nos dados que são determinados pelas fabricantes, pois são considerados ambientes ideais, como o vento a favor, temperaturas amenas e o pouco trânsito, ou nada movimentado, sendo este último o tópico principal para criação do escopo.

Segundo dados da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego) do estado de São Paulo, a capital do referido estado apresenta uma velocidade média próxima de 22 km/h.

Outro fator que irá fazer parte do cenário será a distância percorrida por um veículo, logo o seu usuário, percorre durante o ano 12,9 mil km. Portanto, em um ano com 365 dias, em média se percorre 35 km/dia, ou por volta de 250 km/semana.

Um automóvel, com características reais, que possui autonomia de 300 km, com um motor alimentado por um sistema de armazenamento de 60 kW, gera um consumo de 20 kWh/100km, ou seja, 1 kWh será consumido a cada 5 km percorridos. De acordo com os dados acima, tem se que 35km/dia é a distancia efetuada, entretanto, a média de velocidade é de 22 km/h, logo será obtido que um usuário de veículo fica em média uma hora e meia no trânsito a cada dia, desse modo o consumo que seria de 7 kWh/35 km por dia, será em torno de 7 kWh/22 km, portanto para a conclusão do percurso de 35 km seriam 10,5 kWh de potência consumida em um dia, devido ao tempo passado no trânsito, e a baixa velocidade, portanto maior consumo.

Logo, a partir dessa relação percebe-se que um veículo que na teoria possui 300 km de autonomia, passaria a ter em torno de 210 km, distância esta percorrida em 6 dias, pois coincide com o descarregamento total da bateria.

Concluindo, em seis dias a bateria do automóvel iria de 100% a 0%, lógico que a intenção não se deve é deixar zerar o sistema de armazenamento, portanto o veículo seria recarregado a cada cinco dias, com um restante de 12,5% de capacidade no momento da recarga, desse modo os cenários serão montados levando em conta quanto tempo, e quanta demanda seria utilizada para o carregamento total, podendo ser recargas lentas, intermediárias, rápidas ou ultrarrápidas.

4.2 Modelagem do sistema no OpenDSS

Os dados utilizados foram cedidos pela Enel-CE, contendo um sistema real de um alimentador composto por 444 barras, desde a impedância do sistema reduzido na entrada do transformador, até barras na capilaridade mais externa do sistema, contando assim com mais de 460 consumidores atendidos tanto em monofásico, como trifásico, com características residenciais, e comerciais, com os mais diversos consumos de energia.

Para simplificação da simulação foi adotada uma redução de barras, onde as barras mais capilares dos consumidores foram agrupadas em um número de 71 barras, somando suas cargas, e compactando os trechos, todos eles atendidos em baixa tensão, com tensão trifásica de 380 V. De modo, que os centros de recarga também sejam agrupados nessas barras para as diferentes montagens de cenários.

Logo serão 69 cargas divididas, com valores variados de potência instalada, todos os cenários serão adicionadas as cargas que possuem 1 kW instalado, o diagrama unifilar está representado na figura 5 (Dados desta pesquisa, 2022).

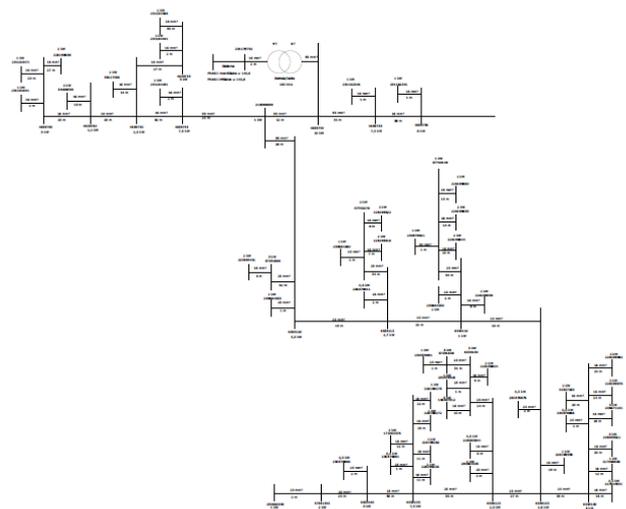


Fig. 5 Diagrama unifilar simplificado da rede em estudo.

O *software* de programação OpenDSS, utiliza componentes e dados de um sistema de distribuição, logo à modelagem de um sistema será baseado nas mesmas características de um sistema real da ENEL-CE.

Nesta simulação todo o sistema elétrico antes da distribuição (geração e transmissão), desde o SIN, até o sistema ENEL-CE, será levado para uma única barra, definido no *software* por um elemento chamado “*Circuit*”, que é o Equivalente de Thévenin para todo o sistema, possuindo assim resistência e reatância de sequência positiva, ou as potências de curto circuito.

As linhas do sistema são as responsáveis por fazer o transporte de energia, a sua disposição entre uma barra de saída e uma de entrada é comumente definida como trecho, no programa ela está modelada como – Pi, para linhas curtas.

A modelagem do transformador poderá ter várias configurações de acordo com a situação para a qual ele esteja sendo utilizado, no caso de um alimentador o padrão é ele possuir a entrada em média tensão em delta, e a saída em estrela em baixa tensão com o neutro disponível, logo para cada enrolamento serão definidas as tensões e a ligação, e para o equipamento como um todo suas perdas.

Para a construção das cargas, primeiramente terá que ser definida a curva de carga do sistema, como pode ser observada na figura 6 (Dados desta pesquisa, 2022), que irá definir por horário qual a demanda que as cargas estão exigindo do sistema, logo na madrugada teremos a curva com valores menores, já no horário de ponta como o começo da noite, esses valores serão maiores devido à entrada de mais cargas.

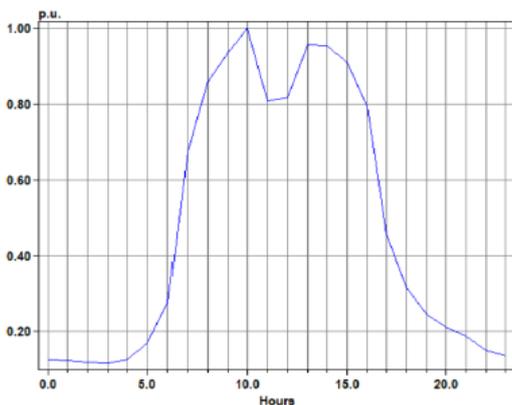


Fig. 6 Curva de carga do sistema analisado.

4.3 Estudo de caso

Os dados utilizados foram cedidos pela ENEL-CE, contendo um sistema real de um alimentador composto por 444 barras, desde a impedância do sistema reduzido na entrada do transformador, até barras na capilaridade mais externa do sistema, contando assim com mais de 460 consumidores atendidos tanto em monofásico, como trifásico, com características residenciais, e comerciais, com os mais diversos consumos de energia.

Para simplificação da simulação foi adotada uma redução de barras, onde as barras mais capilares dos consumidores foram agrupadas em um número de 71 barras, somando suas cargas, e compactando os trechos, todos eles atendidos em baixa tensão, com tensão trifásica de 380 V. De modo, que os centros de recarga também sejam agrupados nessas barras para as diferentes montagens de cenários.

Logo serão 69 cargas divididas, com valores variados de potência instalada, em todos os cenários serão adicionadas as cargas que possuírem 1 kW instalado.

4.4 Montagem dos cenários

Seguindo a IEC 61851, que tem como função padronizar os modos de recarga que as estações devem disponibilizar a potência, além da forma de onda da corrente, ela pode ser alternada ou contínua, que entra na parte do aspecto construtivo dos veículos elétricos, a transmissão de energia para a bateria pode ser indiretamente em corrente alternada pelo inversor, ou diretamente em CC para as baterias. Entretanto devido a limitações do *software* OpenDSS, todas as transmissões serão em corrente alternada.

Segue a tabela 3 (Dados desta pesquisa, 2022), com os valores dos cenários, VEs conectados no sistema serão distribuídos em no máximo 5% dos 460 consumidores, em alguns dos cenários essa porcentagem será reduzida dependendo do valor da potência, logo também do valor da corrente.

O cenário 1 será caracterizado por simular a recarga lenta em três diferentes horários, com duração de 10h, são conectados simultaneamente 6 automóveis distribuídos de forma aleatória no sistema.

Os cenários 2 e 3 simulam recargas intermediárias que vão de 5h a 2h de duração, com a corrente variando de 32 A à 63 A, foram feitas em sete diferentes horários levando em consideração a curva de carga do sistema.

Por último foi realizada a simulação do cenário 4, que se baseia na recarga rápida, esta com corrente ultrapassando os 100 A, logo somente foi utilizado um veículo em cada intervalo, o que já foi suficiente como será visto no tópico 5 para gerar consequências significantes na qualidade da rede.

Tabela 3. Construção dos cenários indo da carga lenta (Cenário 1), até a intermediária (Cenário 2), e por final as rápidas (Cenários 3 e 4)

Cenário 1 (recarga lenta)		Cenário 2 (recarga intermediária 1)	
Tensão	380 V	Tensão	380 V
Corrente	16 A	Corrente	32 A
Potência	6,1 kW	Potência	12,2 kW
Duração da recarga	10h	Duração da recarga	5h
Porcentagem	4%	Porcentagem	5%
Consumidores totais	18	Consumidores totais	24
Intervalos	Veículos conectados no sistema	Intervalos	Veículos conectados no sistema
Cenário 1.1: 20h-5h	6	Cenário 2.1: 20h-0h	6
Cenário 1.2: 22h-7h	6	Cenário 2.2: 1h-5h	6
Cenário 1.3: 10h-19h	6	Cenário 2.3: 9h-13h	6
		Cenário 2.4: 17h-21h	6

Cenário 3 (recarga intermediária 2)		Cenário 4 (recarga rápida)	
Tensão	380 V	Tensão	380 V
Corrente	63 A	Corrente	113 A
Potência	24 kW	Potência	643 kW
Duração da recarga	2h	Duração da recarga	1h
Porcentagem	2%	Porcentagem	menos de 1%
Consumidores totais	9	Consumidores totais	3
Intervalos	Veículos conectados no sistema	Intervalos	Veículos conectados no sistema
Cenário 3.1: 22h-23h	3	Cenário 4.1: 8h	1
Cenário 3.2: 11h-12h	3	Cenário 4.2: 11h	1
Cenário 3.3: 18h-19h	3	Cenário 4.3: 18h	1

5. RESULTADOS

5.1 Estudo de caso

No primeiro momento serão analisados os cenários com a inserção dos carregadores, e logo após serão adicionadas as gerações de energia distribuídas, com a função de auxiliar a rede de distribuição de baixa tensão.

5.2 Simulação com os veículos carregando em diferentes horários

Como pode ser visto na tabela 3 e no subtópico 3.3, os níveis de tensão 220/380 V possuem limites para serem atendidos de forma adequada, fora destes, principalmente limites abaixo, pode se ter níveis precários (0,92 pu), ou críticos (0,87 pu), logo as análises visam obter os indicadores de qualidade.

Ao final destas simulações pôde ser aferido, que maioria dos cenários não apresentou consequências quanto a déficit nos níveis de tensão, ou na demanda de energia, horários esses que foram mais presentes a noite e início da manhã, que foi possível somente a dois fatores, um número bem reduzido de consumidores residenciais, e a curva típica que se apresenta como comercial.

Já em 5 dos 13 cenários (1.3, 2.3, 2.4, 3.2 e 4.2) houve uma necessidade uma demanda de potência maior que o transformador pode fornecer, também nos mesmos cinco cenários houve a tensão mínima de atendimento menor que a especificada no módulo 8 do Prodist, apresentado na tabela 4.

Desse modo, pode se presumir que como consequências negativas, irão ocorrer a abertura das proteções do transformador, ocasionando perdas tanto na qualidade do serviço como na do produto, como variação de tensão, aumento da frequência de interrupções e prolongação da duração do período sem fornecimento.

A tabela 4 (Dados desta pesquisa, 2022) faz um resumo de quatro destes cinco cenários, que tiveram as cargas em diferentes trechos apresentadas, e como a presença desses carregadores em específicas localizações do circuito podem ser permitidas ou não permitidas, desde que ocorra uma melhoria na infraestrutura desse sistema, em relação principalmente a demanda de potência.

Tabela 4. Comparação entre os cenários

Cenário	Trecho	Nível mínimo de tensão em pu	Taxa de atendimento do Prodist módulo 8	Perdas Ativas (kW)
Sem carregador	Trecho inicial	0,968	Adequado	2,99
	Trecho intermediário	0,94	Adequado	6,06
	Trecho final	0,926	Adequado	6,64
Cenário 1.3	Trecho inicial	0,961	Adequado	4,36
	Trecho intermediário	0,924	Adequado	9,34
Cenário 2.3	Trecho final	0,905	Precário	10,21
	Trecho inicial	0,954	Adequado	5,94
Cenário 3.2	Trecho intermediário	0,909	Precário	13,24
	Trecho final	0,884	Precário	14,50
Cenário 4.2	Trecho inicial	0,923	Adequado	5,91
	Trecho intermediário	0,914	Precário	0,14
	Trecho final	0,888	Precário	14,86
Cenário 4.2	Trecho inicial	0,923	Adequado	4,70

5.3 Simulação com os auxílios das gerações distribuídas

O veículo elétrico quando este está parado na residência do proprietário, nos estacionamentos de centros comerciais ou universidades, ele se comportará, se conectado na rede de distribuição, como um sistema de armazenamento com capacidade de se carregar, e também de fornecer energia à rede.

A formação de um cenário com a entrada de fontes de energias renováveis como geração distribuída permite que o carro seja abastecido durante o dia por fontes renováveis, neste caso foi adotada uma micro geração de 70 kVA, e a noite quando se tem períodos de pico de demanda, mais precisamente das 18h às 21h o sistema de armazenamento do VE fornece energia para as propriedades dos usuários, caso a curva desse sistema seja residencial. Ao contrário, em um sistema com maior característica comercial, com maior demanda na parte da tarde e início da noite, o sistema de armazenamento veicular iria auxiliar na geração de energia para esse circuito.

Desse modo, serão refeitos os cenários com o auxílio de uma planta solar fotovoltaica no sistema, ou do sistema de armazenamento, ou de ambas no sistema, respectivamente, que podem ser observadas das tabelas 5 a 10 (Dados desta pesquisa 2022).

5.3.1 Simulação com carregador e auxílio de uma planta solar fotovoltaica de 70 kVA

Tabela 5. Resultados para o cenário 2.3 com o auxílio da planta solar

Com carregador de 12,2 kW com planta solar					
Cenário 2.3 - 9h-13h	9h	10h	11h	12h	13h
max.pu	0,99916	0,9991	0,99906	0,99919	0,99906
min.pu	0,92686	0,92164	0,91751	0,93023	0,92964
potência ativa (kW)	135,6	146,67	155,43	128,4	129,71

Tabela 6. Resultados para o cenário 3.2 com o auxílio da planta solar

Com carregador de 24 kW com planta solar		
Cenário 3.2 - 11h-12h	11h	12h
max.pu	0,99907	0,9992
min.pu	0,92062	0,93349
potência ativa (kW)	154,17	127,28

5.3.2 Simulação com carregador e auxílio do sistema de armazenamento fornecendo

Tabela 7. Resultados para o cenário 2.3 com o auxílio do sistema de armazenamento fornecendo energia a rede

Com carregador de 12.2 kW com o sistema de armazenamento fornecendo das 11h às 14h			
Cenário 2.3 - 9h-13h	11h	12h	13h
max.pu	0,999	0,9991	0,99913
min.pu	0,90134	0,92164	0,91395
potência ativa (kW)	185,7	159,2	160,5

Tabela 8. Resultados para o cenário 3.2 com o auxílio do sistema de armazenamento fornecendo energia a rede

Com carregador de 24 kW com o sistema de armazenamento fornecendo das 11h às 14h		
Cenário 3.2 - 11h-12h	11h	12h
max.pu	0,999	0,99915
min.pu	0,902	0,91500
potência ativa (kW)	184,4	158

5.3.3 Simulação com carregador e auxílio de ambas as gerações distribuídas

Tabela 9. Resultados para o cenário 2.3 com o auxílio de ambas as gerações distribuídas

Com carregador de 12.2 kW com planta solar das 7h às 18h e sistema de armazenamento das 11h às 14h			
Cenário 2.3 - 9h-13h	11h	12h	13h
max.pu	0,99913	0,99926	0,99926
min.pu	0,933	0,84700	0,9464
potência ativa (kW)	120,1	92,2	93,5

Tabela 10. Resultados para o cenário 3.2 com o auxílio de ambas as gerações distribuídas

Com carregador de 24 kW com planta solar das 7h às 18h e sistema de armazenamento das 11h às 14h		
Cenário 3.2 - 11h-12h	11h	12h
max.pu	0,99913	0,99927
min.pu	0,934	0,94520
potência ativa (kW)	119	91,24

Esses resultados provaram que a entrada de uma planta fotovoltaica, ou um conjunto delas, somando sua potência em um valor de 70 kVA, e o sistema de armazenamento de um veículo elétrico fornecendo energia irão auxiliar de forma substancial o sistema, garantindo que os níveis de qualidade do serviço e do produto sejam atendidos.

5. CONCLUSÕES

O Brasil apresenta uma matriz energética elétrica predominantemente limpa, e sustentável, com reduzida emissão de gases de efeito estufa. Entretanto o nosso sistema de transporte de passageiros e de cargas, tem predominância

rodoviária baseado em veículos MCI, os quais são responsáveis por grande quantidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste sentido os veículos elétricos plug-in ganham importância por não emitirem poluentes localmente, portanto o sistema elétrico brasileiro deve estar preparado para este desafio.

A inserção desse novo consumidor na rede de distribuição foi apresentada neste trabalho através de simulações utilizando o software OpenDSS, para a análise das operações de recarga em diferentes horários e com diferentes níveis de carregamento, foram idealizados 4 cenários de carregamento. Um alimentador de distribuição em baixa tensão, com curva de carga comercial foi escolhido para o estudo de caso, para facilitar a simulação, as cargas e as barras foram reduzidas, porém mantendo a validade dos dados do alimentador.

Os cenários foram montados com no máximo 5% das unidades consumidoras com a presença de VE's, este número, para a realidade atual pareça ser muito expressivo, analistas de mercado acreditam em um crescimento das vendas de VE's, quer sejam impulsionadas por políticas públicas de estímulo ao setor ou por popularização do mercado. Observa-se, tomando como base o alimentador em estudo, que haverá a necessidade de uma readequação/modernização de toda a rede de distribuição.

Os resultados das simulações mostraram que em horários fora de ponta, os parâmetros de qualidade da rede foram aceitáveis, embora com um número reduzido de VE's conectados à rede. Já as recargas que foram realizadas em horários comerciais, resultaram em níveis de qualidade do produto e de serviço como precários, definidos pelo módulo 8 do Prodist. Sempre tomando como base o alimentador em estudo, a simulação indica a possibilidade de locais mais críticos, para conexões de recarga de VE's, com uma possível necessidade de reestruturação da rede.

Com o intuito de mitigar os problemas encontrados, foram feitas simulações inserindo duas fontes de geração distribuída, uma que já é realidade (fotovoltaica em micro geração) e outra que pode vir a ser (sistema de armazenamento fornecendo energia à rede, V2G), e os resultados foram bastante promissores, pois as soluções mitigadoras auxiliaram a rede a manter seus indicadores de qualidade no fornecimento.

Lógico que para a obtenção desses tipos de solução é necessária uma infraestrutura avançada, com uma comunicação entre a rede, por meio de um medidor, e com o próprio sistema de armazenamento, através do BMS, que fará a leitura e aquisição de dados, permitindo o controle V2G, desse modo será feito o gerenciamento da rede e o faturamento da diferença, entretanto esse conceito só é possível através de uma *Smart Grid*.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. PRODIST: módulo 8. 2022. Acesso em: 7 abr. 2022.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 819 (ANEEL, 2018)
Acesso em: 29 nov. 2021.
- ANEEL. Resoluções Normativa nº 482 (ANEEL, 2012)
Acesso em: 12 dez. 2021.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015)
Acesso em: 12 dez. 2021.
- Arrabaca, D. A., Gimenez, S. P. Eletrônica de Potência: Conservadores de Energia. 2. Ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
- Castro, B., Ferreira, T. —Veículos elétricos: Aspectos básicos, perspectivas e oportunidades,| Revista BNDES Setorial, Setembro 2010.
- Hanauer, D. Mode 2 Charging Testing and Certification for International Market Access. World Electric Vehicle Journal, v. 9, n. 26, 2018.
- Husain, I., Electric and hybrid vehicles: design fundamentals. CRC Press LLC: Eua, 2003.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61851-1:2017-02 —Electric Vehicle Conductive Charging System—Part 1: General Requirements|; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2017.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62196-1:2014-6 —Plugs, Socket-Outlets, Vehicle Connectors and Vehicle Inlets—Conductive Charging of Electric Vehicles—Part 1: General Requirements|; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2014.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62196-2:2016-02 —Plugs, Socket-Outlets, Vehicle Connectors and Vehicle Inlets—Conductive Charging of Electric Vehicles—Part 2: Dimensional Compatibility and Interchangeability Requirements for a.c. Pin and Contact-Tube Accessories|; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62752:2016-03 —In-Cable Control and Protection Device for Mode 2 Charging of Electric Road Vehicles (IC-CPD)|; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
- Kagan, N; Oliveira, C; Robba, E – Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Edgar Blucher, 2017.
- Kempton, W; Tomic, J —Vehicle-to-Grid Power Implementation: From Stabilizing the Grid to Supporting Large-scale Renewable Energy,| Journal of Power Sources, v. 144, n. 1, p. 280-294, Jun., 2005.
- Projeto de Lei do Senado nº304, de 201 (BRASIL, 2017).
- Rodrigues, M. do C. B. P. et al. Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: uma visão geral. Eletrôn. Potên., Campo Grande, v. 19, n.2, p.193-207, mar./mai. 2014.
- Su, W. et al. —A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment,| IEEE Trans. on Industrial Informatics, v.8, n.1, p.1-10, Feb. 2012.