



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/09
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS CAUSADOS PELO AUMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
NA OPERAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS**

**Ricardo Torquato Borges
UNICAMP**

**Vitor Torquato Arioli (*)
CPqD**

**Daniel Robson Pinto
CPqD**

**Walmir de Freitas Filho
UNICAMP**

**Luiz Carlos Pereira da Silva
UNICAMP**

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo dos impactos técnicos provocados em regime permanente pela conexão de veículos elétricos (VEs) em redes de distribuição. São avaliados os seguintes requisitos técnicos: magnitude de tensão, nível de desequilíbrio de tensão, fluxo de correntes nos ramos, nível de carregamento do transformador, perdas elétricas e balanço energético do circuito. Cada impacto é caracterizado e são identificadas as principais características da rede e do VE que influenciam sua severidade via simulação computacional e estudo de sensibilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Impactos em regime permanente, Postos de recarga rápida (eletropostos), Redes de distribuição, Veículos elétricos

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescente interesse pela redução da emissão de gases poluentes, redução dos custos das baterias, diminuição da dependência do petróleo e incentivos governamentais têm elevado o número de veículos elétricos (VEs) presentes nas ruas de diversos países. Grande parte desses veículos possuem baterias recarregadas via dispositivos conectados na rede elétrica, os quais são conhecidos como veículos elétricos *plug-ins*, podendo ser 100% elétrico ou híbrido. Esse potencial aumento da inserção de VEs nas redes de distribuição de energia elétrica cria incertezas e receio acerca dos impactos técnicos e econômicos provocados pelos mesmos. Com o objetivo de adequar-se a estas novas cargas no sistema elétrico e adaptar seu planejamento futuro, a CPFL iniciou o projeto Mobilidade Elétrica, no âmbito do programa de P&D da Aneel. Neste contexto, com o apoio de três empresas parceiras, cinco veículos 100% elétricos foram adquiridos e estão circulando na região de Campinas, os quais são utilizados em atividades de logística ou operações (serviços externos). O projeto é dividido em duas fases, sendo que Fase I está relacionada, sobretudo com a determinação dos impactos técnicos causados pelo aumento desse tipo de carga e aquisição de conhecimento sobre esta nova tecnologia, ao passo que a Fase II é responsável principalmente pela proposição de soluções para minimizar qualquer efeito adverso, levando-se em consideração custos e qualidade de energia. Além disso, a Fase I deste projeto está dividida em duas etapas como segue:

- A primeira etapa consiste em identificar, analisar e caracterizar os impactos técnicos provocados pela conexão de veículos elétricos em residências (recarga lenta) e em eletropostos (estações de recarga rápida) com base em simulações computacionais.
- A segunda etapa do projeto consiste em coletar medições de campo realizadas durante o carregamento dos VEs em residências e em eletropostos. Tais dados são essenciais para validar os modelos computacionais e determinar o comportamento temporal da corrente drenada pelo carregador.

Os resultados e análises obtidos neste projeto de P&D visam fornecer subsídio técnico para que a CPFL e as demais concessionárias brasileiras possam se antecipar a esses impactos e adequar o planejamento e operação de suas redes a um cenário de conexão massiva de VEs. Neste artigo são apresentados os resultados obtidos durante a primeira etapa do projeto relacionados com a operação em regime permanente. São identificados, caracterizados e analisados os impactos provocados por VEs no perfil de tensão, no desequilíbrio de tensão, no fluxo de correntes nos ramos e no carregamento do transformador, nas perdas elétricas e no balanço energético do

(*) R. Doutor Ricardo Benetton Martins, s/n - Parque II do Polo de Alta Tecnologia, CEP 13086-902, Campinas, SP – Brasil

circuito. A conexão residencial (monofásica/bifásica na rede secundária) é investigada da Seção 2.0 à Seção 6.0, enquanto a conexão de eletropostos (trifásica na rede primária) é investigada na Seção 7.0. Por fim, as principais conclusões são apresentadas na Seção 8.0.

2.0 - ANÁLISE DO PERFIL DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Nesta seção, determina-se o impacto da variação da potência demandada por um ou mais carregadores de VEs no perfil de tensão em regime permanente da rede em estudo. Tal impacto é quantificado por meio de repetitivos cálculos de fluxo de carga, variando-se a potência consumida pelo carregador, o qual é modelado como uma barra PQ (potência ativa e reativa constantes).

O estudo para avaliar o impacto de um VE na magnitude de tensão consiste em conectar um carregador de veículo entre as fases A e B da barra 22 da rede apresentada na Figura 1. Como o VE é uma carga adicional ao circuito, o mesmo provoca queda de tensão. Assim, o estudo consiste em incrementar gradualmente a potência consumida pelo carregador até que o limite inferior de tensão (0,92 pu) seja violado em alguma barra do sistema. Após realizar a simulação, o comportamento obtido da magnitude das tensões na barra 22 é apresentado na Figura 2, sendo que a potência máxima consumida por esse carregador sem a ocorrência de violações é 6,5 kW.

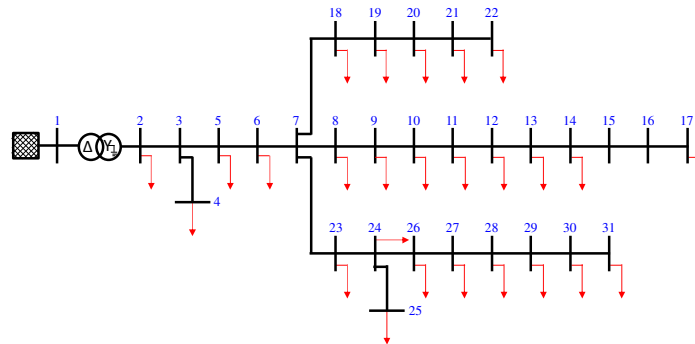


FIGURA 1 – Diagrama Elétrico Simplificado da Rede Secundária Estudada Neste Artigo

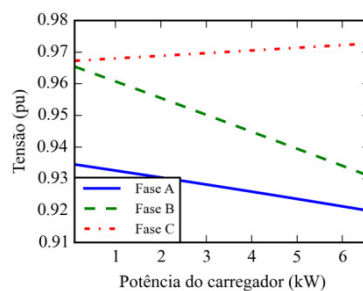


FIGURA 2 – Comportamento do Nível de Tensão Fase-Neutro nas Três Fases da Barra 22

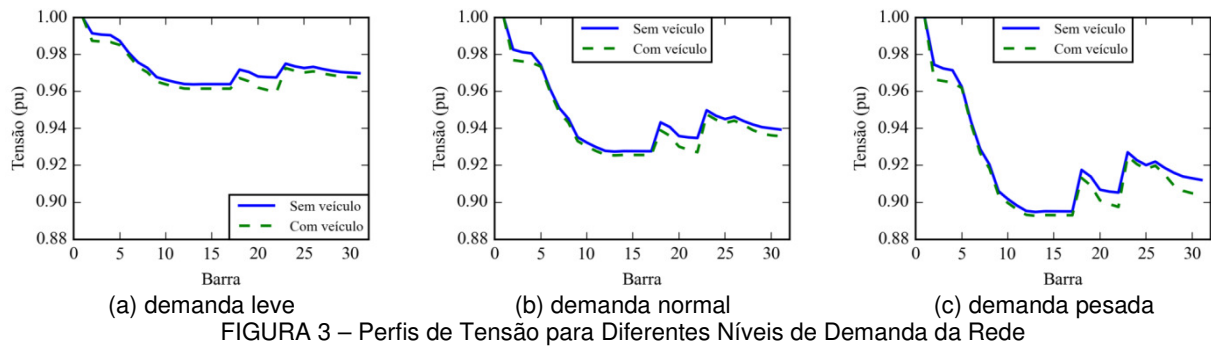
Pela Figura 2, nota-se que as tensões das fases A e B (em relação ao neutro) decrescem continuamente com o aumento da potência do carregador, limitando a quantidade de potência ativa que pode ser consumida por um VE conectado na barra 22. Além disto, a queda do nível de tensão em uma barra possui comportamento aproximadamente linear com a potência consumida, conforme previsto na teoria apresentada em (1).

Visto que a penetração de VEs pode violar os limites permissíveis de tensão em regime permanente, é importante também identificar os fatores que mais contribuem para que o nível do impacto seja mais ou menos pronunciado. Desse modo, a seguir é apresentado o comportamento da queda de tensão em regime permanente para casos em que são considerados: três níveis de carregamento do sistema; distância elétrica do carregador de VE ao transformador de distribuição; e conexão de múltiplos VEs.

2.1 Nível de carregamento do sistema

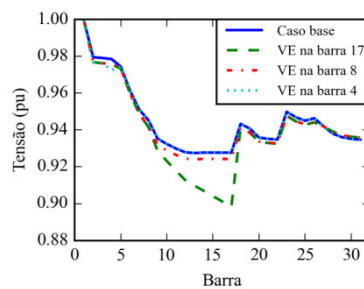
Esta subseção apresenta o impacto da conexão de um VE bifásico de 3,5 kW em uma rede operando com diferentes níveis de demanda. O VE é conectado entre as fases A e B da barra 22 da rede mostrada na Figura 1. Os níveis de demanda analisados são: demanda leve (50% da demanda normal); demanda normal; e demanda pesada (150% da demanda normal).

Os resultados são apresentados na Figura 3, a partir da qual se conclui que há queda de tensão nas barras da rede em todos os três casos (especialmente na barra 22). Entretanto, se a carga for maior, mais crítico será o impacto provocado pelo VE e, quanto menor a carga, a tendência é que uma potência maior possa ser drenada do sistema para carregar o VE. Isso mostra que, em um estudo da conexão de veículos elétricos, do ponto de vista da redução do perfil de tensão, a concessionária deve concentrar maior preocupação no cenário com máxima demanda em sua rede, pois não havendo violação de tensão nesse cenário, não haverá também nos demais.



2.2 Distância elétrica em relação ao transformador

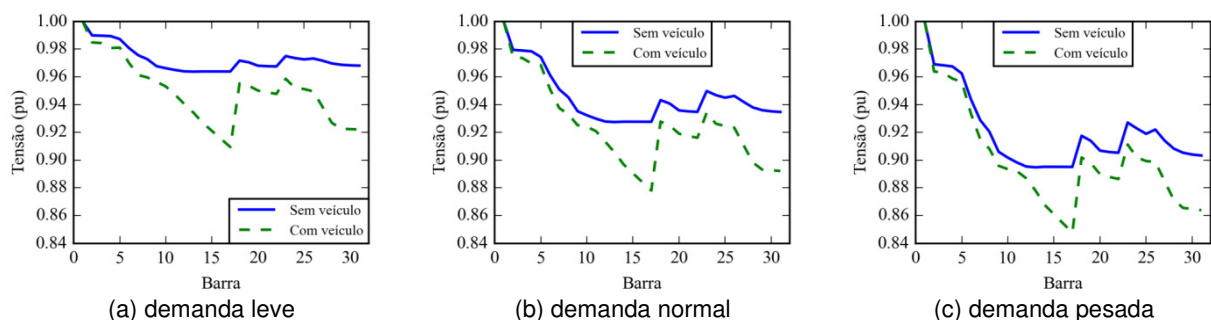
Outro fator responsável por alterar os limites da penetração de VEs é a distância elétrica entre o transformador de distribuição e o ponto de conexão do VE. Esse parâmetro pode ser associado também ao nível de curto-circuito da barra. O impacto do ponto de conexão é mostrado na Figura 4, em que foram conduzidas simulações variando-se o ponto de conexão de um VE bifásico de 3,5 kW na rede, a saber: final (entre fases A-B da barra 17), meio (entre fases A-B da barra 8) e início (entre fases A-B da barra 4) do ramal principal.



Nota-se que a maior queda de tensão proveniente da conexão do VE ocorre quando o mesmo é conectado à barra 17, por ser esta a barra com menor nível de curto-circuito da rede. Observa-se também que a recarga na barra 4 provoca um impacto menor em relação à recarga na barra 8, novamente explicado em função do nível de curto-circuito que é maior em 4 (mais próxima da subestação), em detrimento de 8. Portanto, considerando-se a queda de tensão em regime permanente, os estudos da concessionária devem dedicar maior atenção às conexões em barras com menor nível de curto-circuito de seu sistema, uma vez que maior impacto é sentido em tais localidades.

2.3 Conexão de múltiplos VEs

O cenário da conexão de múltiplos VEs também é avaliado. Para isto, considera-se a conexão de cinco VEs, sendo dois monofásicos (1,5 kW cada) e três bifásicos (3,5 kW cada), dispostos na rede elétrica da Figura 1 da seguinte forma: VE fase AB da barra 4; VE na fase C da barra 17; VE na fase AB da barra 22; VE na fase A da barra 28; e VE na fase AC da barra 29. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.



A Figura 5 apresenta o comportamento do perfil de tensão na fase A da rede (fase com tensões mais críticas) frente a diferentes níveis de demanda da rede.

O resultado obtido indica que, qualitativamente, não há diferenças significativas em relação ao caso com um único VE (subseção 2.1). No entanto, como o nível de potência consumida é maior em relação ao caso anterior (cinco VEs em detrimento de apenas um), o perfil geral de tensão do sistema ficou mais reduzido em todas as situações,

indicando o agravamento desse impacto para uma rede com múltiplos VEs. Assim, o limite de potência consumida individualmente por cada carregador é reduzido.

3.0 - ANÁLISE DO PERFIL DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

As redes de distribuição trifásicas brasileiras são, tipicamente, trifásicas e desequilibradas. O desequilíbrio é provém principalmente da conexão das cargas monofásicas e bifásicas. Como os carregadores de VEs são monofásicos ou bifásicos, os mesmos provocam impacto no nível de desequilíbrio de tensão da rede. Tal impacto é estudado nesta seção, sendo que o nível de desequilíbrio de cada barra é calculado pela razão entre a tensão de sequência negativa e a tensão de sequência positiva nesta barra.

O estudo apresentado na seção 2.1 é repetido nesta seção, porém monitora-se o impacto de um VE no nível de desequilíbrio de tensão da rede. Como o VE é uma carga desequilibrada, o mesmo provoca aumento no desequilíbrio de tensão. Assim, o estudo consiste em incrementar gradualmente a potência consumida pelo carregador até que o nível de desequilíbrio atinja 2,0%¹ em alguma barra do sistema. Após realizar a simulação, o comportamento obtido do desequilíbrio de tensão em três barras da rede (barras com baixo nível de curto-circuito) é apresentado na Figura 6, sendo que a potência máxima consumida por esse carregador sem a ocorrência de violações é 6,2 kW.

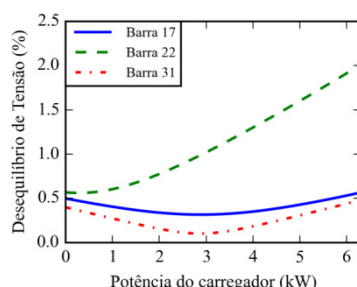


FIGURA 6 – Elevação do Desequilíbrio de Tensão em Diferentes Barras da Rede

Embora, na barra 22, o nível de desequilíbrio cresça de forma aproximadamente linear até atingir o limite de 2,0 %, este impacto é um fator não linear. Portanto, de acordo com o ponto de conexão do VE, é possível que o desequilíbrio seja reduzido. Isso ocorre caso o VE seja conectado em uma fase (e.g., fase A) cuja carga já existente seja menor que a carga das fases adjacentes (fases B e C). Nesta situação, o carregador na fase A auxilia o equilíbrio do sistema, reduzindo, portanto, o nível de desequilíbrio. Assim, se devidamente alocado, o carregador do VE pode melhorar o nível de desequilíbrio de tensão no sistema, reduzindo a taxa de correntes de sequências negativa e zero na rede elétrica, conforme previsto na discussão teórica apresentada. No caso simulado, é possível observar esse efeito (redução inicial no nível de desequilíbrio) nas barras 17 e 31.

Os estudos de sensibilidade realizados na seção anterior também são repetidos nesta seção, considerando-se o nível de desequilíbrio de tensão.

3.1 Nível de carregamento do sistema

Primeiramente, o impacto do VE no desequilíbrio de tensão é avaliado para três níveis de demanda distintos, como apresentado na seção 2.1. Os resultados obtidos (não apresentado neste artigo por restrições de espaço) indicam que, sob carga pesada, o nível de desequilíbrio de tensão das barras do sistema é maior em relação ao cenário com carga normal que, por sua vez, é maior em relação ao cenário com carga leve. Isso é explicado, porque o fato de multiplicar a carga por 1,5 aumenta a diferença entre as cargas de uma determinada barra, o que eleva a diferença entre as correntes que circulam nos condutores de cada fase para alimentar tais cargas, acentuando a desigualdade nas quedas de tensão em diferentes fases e, consequentemente, o desequilíbrio de tensão nas barras. Com o mesmo raciocínio explica-se a redução do nível de desequilíbrio para o cenário com carga leve, uma vez que, ao serem reduzidas pela metade, as cargas se aproximam numericamente entre as diferentes fases, fazendo com que o nível de desequilíbrio de tensão nas barras decresça.

Ressalta-se que, especialmente no cenário de demanda máxima, o ponto de conexão do VE também pode ser tal que provoque uma redução no nível de desequilíbrio da rede. Isto pode ocorrer se o VE for conectado na fase atendendo a menor carga de uma barra.

3.2 Distância elétrica em relação ao transformador

O impacto da conexão de VEs em diferentes pontos da rede (barras com diferentes níveis de curto-circuito) também é avaliado. A conexão de um VE na barra 17 provoca um impacto consideravelmente superior àquele provocado pelo acesso na barra 8, o qual também é superior ao observado na conexão de um VE na barra 4. Tal

¹ O limite de desequilíbrio de tensão em redes secundárias não é estabelecido pelo PRODIST. Portanto, adota-se o limite conservativo de 2,0% (limite estabelecido no PRODIST para redes primárias).

fato reforça mais uma vez a hipótese de que a potência máxima consumida por um carregador de VE é tanto maior quanto mais forte for a barra de acesso, ou seja, quanto maior for seu nível de curto-circuito.

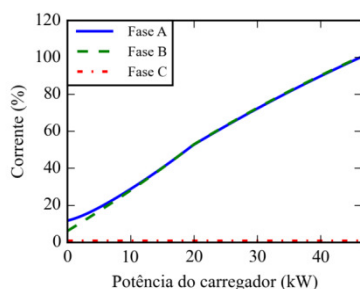
3.3 Conexão de múltiplos VEs

Por fim, foi avaliado o impacto da conexão de múltiplos VEs no nível de desequilíbrio da rede. Os resultados obtidos confirmam aqueles discutidos para o caso com apenas um carregador, embora os impactos sejam intensificados (superam 2,0% enquanto os impactos da conexão de apenas 1 VE são inferiores a 1,4%). Os resultados obtidos também reafirmam a necessidade de estudar-se o cenário com demanda pesada, que eleva o nível de desequilíbrio inicial da rede. Por outro lado, como o nível de desequilíbrio é um impacto não linear, o mesmo também pode crescer significativamente em cenários de demanda leve. Assim, o cenário de demanda leve também deve ser avaliado nos estudos da concessionária.

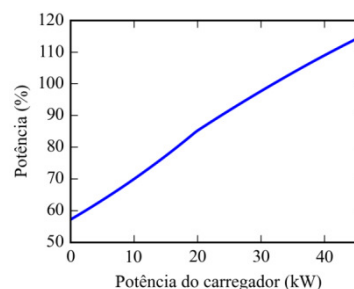
4.0 - ANÁLISE DO FLUXO DE CORRENTES E CARREGAMENTO DO TRANSFORMADOR

A conexão de uma carga adicional na rede (veículo elétrico) leva ao aumento do fluxo de correntes nos condutores que atendem tal carga, podendo causar violações nos limites térmicos dos cabos e/ou no carregamento dos transformadores, fazendo com que os mesmos percam algumas de suas propriedades originais. Assim, estes impactos são caracterizados a seguir.

Como nas seções anteriores, um estudo ilustrativo é inicialmente conduzido considerando-se a conexão de um VE bifásico na fase A-B da barra 22, a fim de caracterizar o impacto analisado nesta seção. Aumenta-se gradualmente o valor de potência consumido pelo mesmo até que o limite térmico de algum condutor da rede seja atingido. O resultado obtido é apresentado na Figura 7(a), sendo que o limite térmico foi atingido na fase A do ramo que conecta a barra 7 à barra 18.



(a) carregamento do ramo que liga barra 7 à 18



(b) carregamento do transformador

FIGURA 7 – Carregamento das Linhas e Transformador

A Figura 7(a) mostra que o fluxo de corrente nas fases A e B do ramo crítico cresce de forma aproximadamente linear com o aumento da potência do carregador. Na fase C, a variação é desprezível mostrando que o efeito a ser estudado pela concessionária é, de fato, aquele que ocorre na fase de conexão do VE. De forma similar, a Figura 7(b) também ilustra que o carregamento do transformador cresce linearmente com a potência consumida pelo VE sendo mais restritivo que o limite térmico das correntes nas linhas de distribuição. À medida que a penetração de veículos elétricos na rede é aumentada, podem começar a aparecer uma série de problemas relativos à sobrecarga no sistema de distribuição.

Ressalta-se, entretanto, que o limite de penetração de VE considerando-se o fluxo de correntes nos ramos (46,4 kW) e considerando-se o carregamento do transformador (32,0 kW) são consideravelmente superiores aos limites obtidos anteriormente, considerando-se magnitude e desequilíbrio de tensão.

Os estudos de sensibilidade realizados nas seções anteriores também são repetidos nesta seção, considerando-se o carregamento dos ramos e transformadores.

4.1 Nível de carregamento do sistema

Nesta seção, avalia-se o impacto de um VE de 3,5 kW no carregamento dos ramos, considerando-se diferentes demandas da rede. Os resultados obtidos mostram que a conexão do VE provoca elevação de corrente semelhante para as demandas avaliadas. Adicionalmente, a conexão do VE provocou crescimento dos fluxos de correntes apenas na sequência de ramos que conectam o VE até a subestação.

Em relação ao carregamento do transformador de distribuição (75 kVA), os resultados mostram que o impacto do VE é percentualmente maior durante o período de demanda leve, porém o crescimento durante o período de demanda pesada é considerável, e pode representar um problema caso o carregamento do transformador já esteja próximo do nominal.

4.2 Distância elétrica em relação ao transformador

Em geral, os condutores mais afetados pela conexão de um VE são aqueles localizados no entorno da barra de acesso. Logo, para diferentes locais de acesso, têm-se diferentes tipos de condutores críticos, com diferentes limites térmicos. Por esse motivo, não é representativo apresentar um estudo comparativo do comportamento observado para diferentes pontos de conexão do VE.

4.3 Conexão de múltiplos VEs

O cenário com a conexão de múltiplos VEs também foi avaliado e os resultados apresentam grande semelhança com aqueles obtidos na análise com apenas um VE, sendo que o cenário mais crítico a ser analisado pela concessionária é aquele no qual o sistema opera com demanda pesada.

5.0 - ANÁLISE DAS PERDAS ELÉTRICAS

Esta seção estuda o comportamento das perdas elétricas de um circuito frente à conexão massiva de veículos elétricos do tipo plug-in.

O impacto de um VE nas perdas elétricas totais (ativas e reativas) da rede é apresentado na Figura 8. Nota-se um comportamento quadrático das perdas totais em função do consumo de potência pelo carregador do VE. Este comportamento é esperado, visto que o aumento da carga conectada ao circuito (e.g., conexão do VE) eleva a corrente nos ramos que alimentam a carga da barra 22, e as perdas elétricas dependem do quadrado da corrente (3). Tal comportamento mostra-se preocupante do ponto de vista da concessionária e do sistema elétrico como um todo, visto que o aumento das perdas corresponde a elevado prejuízo econômico.

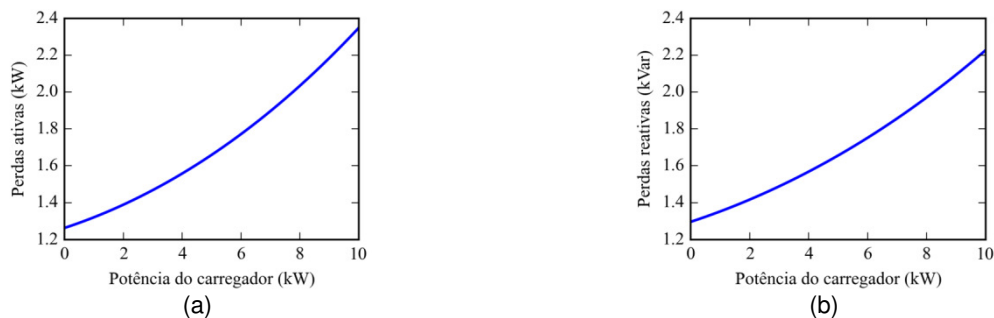


FIGURA 8 – Perdas Elétricas Totais Ativas (fig. a) e Reativas (fig. b) do Circuito

Os estudos de sensibilidade realizados nas seções anteriores também são repetidos nesta seção, considerando-se as perdas elétricas.

5.1 Nível de carregamento do sistema

Novamente, a primeira análise de sensibilidade consiste em comparar o comportamento do impacto técnico (neste caso as perdas elétricas totais da rede) para diferentes níveis de carregamento do sistema em estudo. Os resultados obtidos para três níveis de carregamento distintos indicam que, como a conexão de VEs representa cargas adicionais à rede, as perdas crescem em todos os cenários de demanda.

Entretanto, o crescimento mais acentuado ocorre quando a demanda é pesada (pico de carga), o que permite concluir definitivamente que o período de pico de carga é o cenário mais crítico para análise da conexão de VEs. Neste período, além dos impactos negativos já apresentados nas seções anteriores, as perdas elétricas são consideravelmente mais elevadas visto que o nível das correntes nos ramos é mais elevado.

5.2 Distância elétrica em relação ao transformador

O impacto nas perdas elétricas totais, assim como no caso do fluxo de correntes, depende, em maior grau, das características do condutor e do nível de carga conectada, em detrimento do nível de curto-circuito da barra de acesso. Portanto, este estudo torna-se desnecessário e não é apresentado neste artigo.

5.3 Conexão de múltiplos VEs

Assim como conduzido nos estudos técnicos anteriores, é importante identificar o comportamento das perdas elétricas totais em uma rede secundária com múltiplos VEs conectados. Os resultados deste estudo indicam que a elevada penetração de VEs pode tornar-se uma grande preocupação para as concessionárias, do ponto de vista de perdas elétricas. Conforme a carga adicional conectada à rede cresce, as correntes fluindo nos ramos também crescem como consequência imediata, levando ao aumento das perdas elétricas. Tal impacto pode ser agravado

caso os VEs estejam concentrados em um único ponto da rede, visto que as correntes nos condutores desta região serão ainda maiores, aproximando-se de seus limites térmicos.

6.0 - ANÁLISE DO BALANÇO ENERGÉTICO DO CIRCUITO

Esta seção analisa o impacto de VEs na curva de carga do circuito. São investigados os impactos provocados por três estratégias de recarga na curva de carga de uma rede residencial.

Nos estudos apresentados a seguir, 30% dos consumidores da rede em estudo são selecionados aleatoriamente para possuir 1 VE bifásico cada, cuja potência do carregador (conectado entre fases A e B) é igual a 3,5 kW. A curva de carga obtida após a inclusão dos VEs é apresentada na Figura 9 para três estratégias de recarga, a saber: (i) Recarga ocorre entre 19:00h e 03:00h; (ii) Recarga ocorre entre 21:00h e 05:00h; e (iii) Recarga ocorre entre 00:00h e 09:00h.

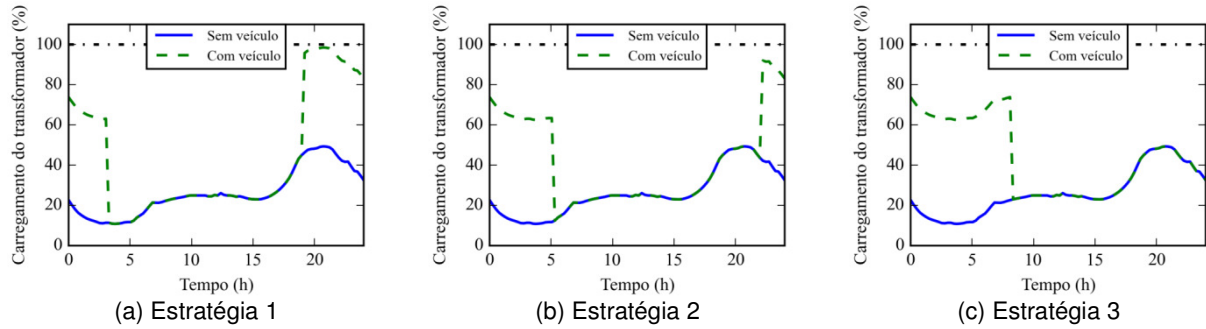


FIGURA 9 – Curva de Carga da Rede para Diferentes Estratégias de Recarga dos VEs

Os resultados obtidos indicam, inicialmente, que a recarga pela Estratégia 1 pode apresentar diversos problemas técnicos ao sistema, pois coincide com o pico de demanda da rede. As seções anteriores mostraram que quando o VE é conectado no período de demanda máxima, todos os impactos são agravados. No caso apresentado (Figura 9(a)), o transformador de 75 kVA opera com praticamente 100% de carregamento por cerca de 2 horas.

A recarga pelas Estratégias 2 e 3 melhora o cenário descrito no parágrafo anterior, visto que é realizada fora do pico de carga. Entretanto, a Estratégia 3 mostrou-se a melhor estratégia dentre as três, pois os VEs são carregados ao longo de toda a madrugada, período em que a rede opera com carga leve.

A superioridade da recarga inteligente pode também ser visualizada no fator de carga (FC) da rede, o qual indica se a estrutura da rede está sendo de fato utilizada durante todo o dia. Baixos FCs indicam que a rede está mal utilizada, pois na maior parte do tempo a carga atendida é consideravelmente inferior à carga para a qual a rede foi dimensionada. A concessionária busca, portanto, um FC mais próximo de 1. O fator de carga é definido pela razão entre a carga média em um determinado período de tempo e a carga máxima neste mesmo período. Seu valor para os cenários simulados está apresentado na Tabela 1.

A Estratégia 3 apresenta aproximadamente 13% de melhora no FC, enquanto as estratégias 1 e 2 pioram o FC. A recarga pela Estratégia 3 pode ser incentivada pela adoção das tarifas horossazonais, pois carregando seu VE durante a madrugada (carga leve), o consumidor será cobrado com menores tarifas.

TABELA 1 – Comportamento do Fator de Carga da Rede para as Diferentes Estratégias de Recarga dos VEs

Estratégia de recarga	Fator de carga	Aumento relativo ao caso base (%)
Caso base (sem VE)	0,53	----
Estratégia 1	0,44	-17,0
Estratégia 2	0,45	-15,1
Estratégia 3	0,60	13,2

7.0 - ANÁLISE DA OPERAÇÃO DOS POSTOS DE RECARGA RÁPIDA

Nesta seção, os estudos apresentados anteriormente são repetidos considerando-se a conexão de postos de recarga rápida (PRRs). Para isto, considera-se uma rede de distribuição real de 1700 barras, com carga total de 4,8 MVA. Quatro PRRs, cuja carga total máxima é 516 kW (10,8% da carga total do alimentador), são conectados diretamente na rede de média tensão por meio de transformadores dedicados.

Devido à falta de espaço, os resultados detalhados não são apresentados neste artigo. Entretanto, os resultados obtidos levam às seguintes conclusões:

- A conexão de um posto de recarga de VE apresenta impacto reduzido na rede da concessionária, em comparação com as conexões residenciais analisadas nas seções anteriores;

- Dos impactos analisados, o crescimento do fluxo de correntes (e consequentemente das perdas elétricas) e do pico de demanda de carga são mais pronunciados. Dentre estes, ressalta-se o aumento das perdas elétricas, visto que crescem de forma quadrática com a potência demandada pelo posto;
- Os possíveis métodos para mitigar os impactos analisados são os mesmos apresentados nas seções de estudo da conexão residencial. Ressalta-se, também, a importância de incentivar recargas fora do pico da demanda visto que o cenário de demanda máxima é o mais conservativo para todos os impactos.

8.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, foram apresentados e discutidos os principais impactos técnicos provocados em regime permanente pela conexão de veículos elétricos em redes de distribuição. Os resultados obtidos indicam que os impactos mais restritivos, ou seja, aqueles que merecem maior atenção da concessionária, são: (i) magnitude de tensão nas barras; (ii) desequilíbrio de tensão nas barras; e (iii) nível de carregamento dos condutores e transformadores. Destes, a magnitude de tensão mostrou-se o principal impacto, especialmente no cenário com a conexão de múltiplos VEs. As perdas elétricas não estão incluídas neste conjunto porque, embora representem uma característica de grande importância para os sistemas de energia elétrica, não apresentam limitação técnica de demanda de potência, mas sim limitação econômica.

Com relação aos postos de recarga rápida, de forma geral, o impacto provocado por estas conexões mostraram-se inferiores àqueles provocados por conexões residenciais. Os aspectos técnicos mais impactados foram o crescimento do fluxo de correntes (e consequentemente das perdas elétricas) e do pico de demanda de carga. O impacto na magnitude e desequilíbrio de tensão é desprezível.

A aquisição de tais conhecimentos auxilia na redução das barreiras para o aumento da penetração de VEs nas redes de distribuição brasileiras.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) JENKINS, N., EKANAYAKE, J.B., STRBAC, G. Distributed Generation; 1st Ed. London: Institution of Engineering and Technology. 2010.
- (2) PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL. Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica. 2015.
- (3) AYRES, H.M., SALLES, D., FREITAS, W. A Practical Second-Order Based Method for Power Losses Estimation in Distribution Systems with Distributed Generation. IEEE Trans. on Power Systems. 2014.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ricardo Torquato Borges (Nasc.: Catalão-GO, 1989): concluiu graduação e mestrado em engenharia elétrica na UNICAMP em 2011 e 2014, respectivamente. Atualmente é aluno de doutorado nesta mesma universidade e suas áreas de interesse incluem análise de sistemas de distribuição, geração distribuída e qualidade de energia.

Vitor Torquato Arioli (Nasc.: São Paulo-SP, 1984): concluiu graduação em engenharia elétrica na UNESP-Ilha Solteira em 2007. Atualmente é engenheiro eletricista na Fundação CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Suas áreas de interesse incluem armazenamento de energia, geração distribuída, energias renováveis e veículo elétrico.

Daniel Robson Pinto (Nasc.: Limeira-SP, 1988): concluiu graduação em bacharelado em física aplicada e em engenharia elétrica na UNICAMP em 2012 e 2013, respectivamente. Atualmente é engenheiro eletricista na Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Suas áreas de interesse incluem sistemas de distribuição de energia, geração distribuída e veículo elétrico.

Walmir de Freitas Filho (Nasc.: S. J. do Rio Preto-SP, 1971): concluiu doutorado em engenharia elétrica na UNICAMP em 2001. Atualmente é professor associado nesta mesma universidade e suas áreas de interesse incluem análise de sistemas de distribuição, geração distribuída e qualidade de energia.

Luiz Carlos Pereira da Silva (Nasc.: Guaratã-TO, 1971): concluiu doutorado em engenharia elétrica na UNICAMP em 2001. Atualmente é professor associado nesta mesma universidade e suas áreas de interesse incluem análise de sistemas de distribuição, geração distribuída e estabilidade de sistemas de potência.