

A Stochastic Model for Simulation of Transformers Supplying the Recharge of Electric Vehicles

W. B. Pereira, L. A. P. Peres, *Member, IEEE*, and J. F. M. Pessanha

Abstract— This paper presents a stochastic simulation model to evaluate the recharging of electric vehicles in power distribution networks, focusing on the adequacy of the capacity of transformers and their feeder. The model includes the effects of random variables related to distances previously traveled and connection times of electric vehicles to the grid.

Keywords— electric vehicles, energy efficiency, battery charging, smart grids, random variables.

I. INTRODUÇÃO

A NECESSIDADE de maior eficiência energética e diminuição dos impactos ambientais dos meios de transporte rodoviário à combustão interna vem dando lugar à penetração gradativa de veículos elétricos (VEs) em vários países. Neste sentido as empresas de energia elétrica se apresentam como agentes fundamentais neste processo [1]. A utilização de veículos elétricos a bateria (VEBs) na sua própria frota se mostra atrativa propiciando o uso da sua rede de energia para o reabastecimento e ganhos econômicos consideráveis [2]. Todavia, a despeito do acréscimo de faturamento com a recarga destes veículos para o atendimento aos seus clientes, faz-se imprescindível uma avaliação adequada dos sistemas de distribuição perante esta demanda suplementar a ser atendida, que também inclui os veículos elétricos não rodoviários [3]. Há em contrapartida a possibilidade do conceito *Vehicle-To-Grid* (V2G), que vem se mostrando oportuna [4]. Neste caso o VE possui a opção de compartilhar a energia armazenada no banco de baterias com a rede a fim de manter o atendimento, por exemplo, de uma residência, perante falhas do alimentador ao qual esteja conectado.

Estas concepções se inserem no contexto das redes inteligentes de energia para as quais novas arquiteturas vêm sendo desenvolvidas. Visam com isso contribuir para a eficiência energética de forma a fazer frente ao notório crescimento do consumo de energia bem como à necessária redução das emissões antropogênicas [5, 6].

Assim, este assunto vem merecendo uma atenção crescente de pesquisadores, empresas e montadoras no que tange a análise da penetração dos VEs quanto aos diferentes cenários de conexão à rede elétrica [7], além das várias incertezas associadas à utilização destes veículos por seus usuários [8, 9]. Contudo, as análises disponíveis mostram que, a despeito dos desafios desta mudança que visa à eletrificação do transporte

rodoviário, há argumentos consistentes que apontam para sua viabilização [1]. Neste sentido, este trabalho apresenta um modelo de análise dos efeitos da recarga dos veículos elétricos, através de simulações computacionais, com enfoque em redes de distribuição residenciais. O método leva em conta o processo estocástico da recarga de VEBs considerando como variáveis aleatórias as distâncias percorridas previamente e o horário de conexão à rede, permitindo a avaliação da influência de cada variável e possibilitando a comparação com um caso determinístico extremo em que todos os VEBs percorrem o mesmo trajeto e se conectam no mesmo horário. A peculiaridade deste modelo é a facilidade da sua aplicação bastando dispor de amostras típicas de recarga do veículo e dados de placa das baterias de tração e dos carregadores.

II. CONTEXTO DO TRABALHO E OBJETIVO

O setor de transporte no Brasil consome praticamente 1/3 de toda a energia produzida e cerca de 90 % deste consumo é atribuído ao modal rodoviário. Devido ao uso maciço da tração por meio de combustão interna, o setor de transporte detém a maioria das emissões de dióxido de carbono com 45,7 % seguida da indústria que não ultrapassa 18,5 % uma vez que a motorização elétrica é predominante, mesmo consumindo praticamente 33 % de toda energia do país. Em contrapartida, a energia elétrica, que possui uma matriz energética cuja produção é 65,2 % hidráulica e com um enorme potencial eólico e solar, destina para o transporte 0,3 % [10].

Neste contexto se justifica a eletrificação do transporte rodoviário, visando reduzir as emissões atmosféricas e os danos decorrentes relacionados com a qualidade do ar. Trabalhos recentes identificaram a necessidade premente de políticas públicas visando alterar a legislação de tributos vigente no Brasil que privilegia veículos à combustão interna em detrimento de veículos elétricos [11,12].

Os objetivos específicos deste artigo visam apresentar uma nova metodologia de análise dos efeitos decorrentes da recarga de VEBs rodoviários focando na capacidade dos transformadores de distribuição, bem como de alimentadores, propiciando a gestão desta demanda inclusive no ambiente de redes inteligentes de energia. Procura-se, assim, atender a necessidade do planejamento das redes de distribuição, quanto à demanda e a energia requerida durante a recarga de VEBs. Esta metodologia utiliza para isto amostras de ensaios de recarga e as características técnicas dos seus respectivos bancos

W. B. Pereira, Grupo de Estudos de Veículos Elétricos (Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, windsonbraga@hotmail.com

L. A. P. Peres, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, lapp_uerj@yahoo.com.br

J. F. M. Pessanha, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, professorjfmpp@hotmail.com

de bateria e carregadores. Com isto, é possível modelar curvas de recarga correspondentes às diversas distâncias percorridas previamente pelos VEs e analisar a superposição dos seus efeitos na curva de demanda do transformador em simulações de reabastecimento [13, 14].

III. METODOLOGIA

O efeito da conexão de veículos elétricos rodoviários a um transformador de distribuição depende das características da recarga dos VEs, das características do transformador, do perfil de demanda das demais cargas atendidas, bem como de aspectos regulatórios, por exemplo, a política tarifária vigente.

Sem perda de generalidade, na metodologia proposta consideram-se apenas veículos elétricos rodoviários à bateria (VEB), sistema trifásico equilibrado com fator de potência normativo 0,92, indutivo. Adicionalmente, admite-se a recarga total das baterias a partir do estado de carga inicial.

Para representar a natureza estocástica do instante de conexão dos VEs à rede e da duração da recarga, propõe-se um modelo de simulação probabilística em que o horário de conexão e a duração da recarga são independentes. Adicionalmente, admite-se que as densidades marginais de probabilidade de ambas as variáveis seguem o modelo lognormal. Contudo, a função densidade de probabilidade referente à distância percorrida é truncada à direita de forma a levar em conta o valor finito da autonomia do VE.

A especificação dos parâmetros do modelo de simulação baseou-se em amostras de medições de recarga padronizadas, dados de placa das baterias de tração e dos carregadores dos VEs. Os demais aspectos do modelo de simulação são apresentados a seguir.

A. Caracterização da Recarga de Veículos Elétricos

A recarga de VEs se mostra mais conveniente no período noturno que compreende o intervalo de tempo que apresenta, em geral, valores reduzidos de demanda do transformador ou do alimentador da rede de baixa tensão. Este período corresponde também à tarifa de energia menor para os consumidores que já contam com medição diferenciada, tornando atrativa a recarga destes veículos neste período. No caso das redes inteligentes de energia é prevista a gestão da carga pelo lado da demanda (*Demand Side Management – DSM*), de modo que o usuário possa inclusive escolher, via smartphone, por exemplo, o momento oportuno do início da recarga de seu veículo elétrico.

B. Recarga de VEs em Transformadores

O nível máximo de potência ativa exigida durante o processo de recarga do VE é limitado pela potência do carregador projetado com este fim. Há necessidade, por meio de um retificador, de compatibilizar a tensão e a corrente alternada de entrada da rede de alimentação com a tensão do banco de baterias do VE e a respectiva corrente contínua de recarga. Procura-se deste modo que este processo seja realizado em um período de tempo razoável sem que cause danos às células das baterias, respeitando as normas de instalação elétrica específicas. Adicionalmente, os carregadores de bateria devem apresentar um elevado rendimento e atender normas que minimizem a introdução de componentes harmônicas na rede.

A curva de demanda típica diária dos transformadores de baixa tensão é representada pelas demandas médias em intervalos discretos de 15 minutos, adotados pelas empresas de distribuição. Assim, o perfil correspondente a 24 horas, composto pelas demandas médias verificadas em 96 intervalos de 15 minutos. Para a apresentação do desenvolvimento da metodologia, é considerada a curva de demanda típica de um transformador de distribuição. Desta forma, para se apreciar melhor os efeitos da recarga de um grupo de VEs em período noturno, inclusive de madrugada, foi adotada uma curva de demanda de 48 horas composta por duas curvas típicas diárias idênticas.

C. Curva de Recarga de Veículos Rodoviários Leves

O desenvolvimento da metodologia de avaliação dos efeitos da recarga é baseado nos resultados dos ensaios efetuados pelo Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV da UERJ com um Palio Weekend Elétrico. O veículo é montado pela empresa Itaipu Binacional através do acordo de cooperação tecnológica com a KWO – *Kraftwerke Oberhasli AG e MES-DEA*, da Suíça e em parceria com a FIAT do Brasil [15].

Consideraram-se estes ensaios de recarga representativos do comportamento da potência ativa fornecida ao VE pelo sistema de corrente alternada, uma vez que se baseiam no método combinado de tensão constante e corrente constante típico em diversos modelos de VEs [16]. Diversos ensaios de percursos foram realizados utilizando o VE mencionado seguidos pelos respectivos ensaios de recarga para a obtenção das amostras. Todos os ensaios de percurso foram iniciados com a bateria do VE em seu estado de carga máximo, 100 %.

Com respeito aos ensaios de recarga, estes foram iniciados tão logo o VE chegasse ao seu destino e finalizados ao ser completada a carga da bateria de tração. A demonstração da metodologia deste trabalho, para a qual se supõe conhecidas amostras representativas das curvas de recarga do VE, é explicitada através dos resultados da recarga de um ensaio de percurso urbano de 9 km. Para tanto, a medição das grandezas elétricas durante o ensaio de recarga do VE foi realizada com o analisador de energia MARH – 21/993 fabricado pela RMS.

Na Tabela I a seguir são apresentados os dados do banco de baterias do Palio Weekend Elétrico, utilizado para a demonstração da construção do modelo.

TABELA I
DADOS DO BANCO DE BATERIAS DO PALIO WEEKEND ELÉTRICO

Tensão Nominal (V)	Capacidade (Ah)	Rendimento do Conjunto Bateria – Carregador
253	76	0,95

Na Tabela II apresentam-se os valores medidos durante o teste de recarga do VE.

TABELA II
VALORES MEDIDOS DURANTE O TESTE DE RECARGA

Duração da Recarga (min)	Energia Gasta (Wh)	Potência Máxima Média (W)
52	1951	3250

A razão entre o tempo de recarga da Tabela II e a distância percorrida no ensaio de percurso informa a estimativa da taxa de recuperação da energia por quilômetro, neste caso igual a 5,78 min/km. Ou seja, a cada intervalo de 5,78 minutos de recarga é devolvida à bateria a energia utilizada para percorrer 1 km. Esta energia corresponde a 0,217 kWh/km neste caso, ou 0,78 MJ/km.

A Fig. 1 apresenta o comportamento da tensão V , em Volt, e da corrente I , em Ampère, resultantes do ensaio de recarga mencionado. A tensão média medida durante a recarga é de 219,9 V e a corrente elétrica máxima é de 15,1 A.

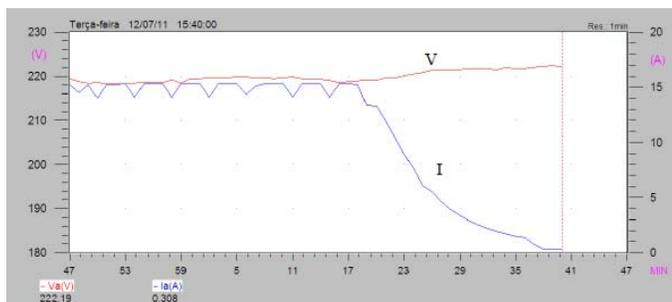


Figura 1. Tensão (V) e corrente (I) durante a recarga.

A Fig. 2, apresenta a potência ativa P , em kW, e da potência reativa Q , em kVar. A potência ativa máxima é de 3250 W e a potência reativa média é aproximadamente zero.

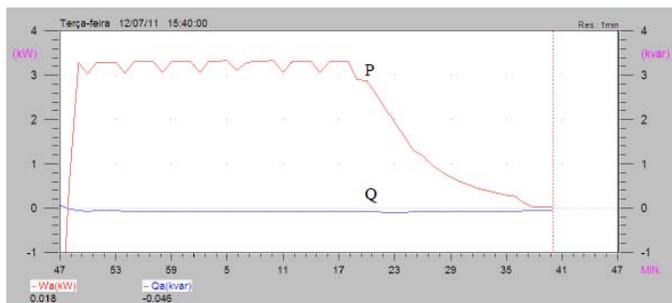


Figura 2. Potências ativa (P) e reativa (Q) durante a recarga.

As trajetórias da potência aparente S , em kVA e do fator de potência FP são ilustradas na Fig. 3. A potência aparente máxima média é de 3250 VA e o fator de potência permanece praticamente unitário durante o processo de recarga.

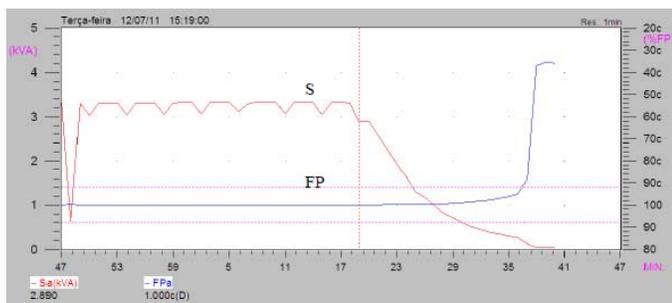


Figura 3. Potência aparente (S) e fator de potência (FP) durante a recarga.

D. Modelagem da Curva de Recarga de Veículos Elétricos

Os ensaios efetuados com o Palio Weekend Elétrico e outros veículos indicaram que os efeitos da tensão, da corrente e do fator de potência ao longo do processo de recarga resultam

numa forma característica da potência ativa. De fato, esta grandeza se mantém praticamente constante seguida de um decaimento que pode ser aproximado a uma rampa decrescente, conforme ilustrado na Fig. 2, onde se verifica que o trecho final se reduz a um valor residual quando, então, o estado de carga da bateria alcança 100 %. Esta forma se mantém alterando-se apenas o período em que a potência se mantém constante em função da menor ou maior energia requerida, que é função principalmente da distância percorrida limitada pela capacidade da bateria, a qual determina a autonomia do veículo.

Assim, para analisar a demanda da rede de suprimento dos VEs em recarga basta fazer a superposição das curvas de recarga dos veículos à curva de demanda do transformador da rede. Isto é oportuno uma vez que os demais VEs tais como, scooters, skates, etc. também apresentam o mesmo comportamento de recarga.

Esta concepção foi utilizada neste trabalho para análise da capacidade de transformadores trifásicos típicos de distribuição, como os conectados na rede de alta tensão dos alimentadores de 13,8 kV, objeto de análises específicas nas quais se deseja avaliar o suprimento adicional dos VEs.

O modelo desenvolvido consiste em estabelecer as curvas de recarga em termos de variáveis discretas para representá-las com intervalos de tempo correspondentes à medição convencional dos sistemas elétricos, igual a 15 minutos, e associá-las às distâncias previamente percorridas. Com isto, o tempo máximo de recarga será um múltiplo de 15, correspondente ao período de reposição de 100 % do estado de carga da bateria, cuja demanda máxima se relaciona com as características de potência e de rendimento do carregador. Quanto à energia consumida esta é uma função da capacidade do banco de baterias.

Portanto, consideram-se como referências os dados do banco de baterias, isto é, tensão nominal e a respectiva capacidade, conforme Tabela I. Adicionalmente, a distância percorrida no ensaio de percurso, bem como os resultados do ensaio de recarga em termos da energia consumida e da potência máxima assinaladas na Tabela II. Estes elementos são suficientes para, modelar, de início, a curva de recarga total do VE, relativa à sua autonomia. A energia total máxima da bateria, em Wh, é determinada pela equação (1):

$$E_{total} = \frac{V_b \cdot C_b}{\eta_{bc}} \quad (1)$$

em que V_b é a tensão da bateria, em Volts, C_b é a capacidade da bateria, em Ah, e η_{bc} é o rendimento do conjunto bateria-carregador.

A eficiência η_v do veículo, em Wh/km, é determinada pela equação (2):

$$\eta_v = \frac{E_{teste}}{S_{teste}} \quad (2)$$

em que E_{teste} é a energia consumida no ensaio de recarga, em Wh, e S_{teste} é a distância percorrida no ensaio de percurso, em km.

As estimativas acima permitem avaliar a autonomia do veículo ΔS por meio da equação (3), a seguir:

$$\Delta S = \frac{E_{total}}{\eta_v} \quad (3)$$

Para fins de simulação adota-se uma representação discreta da curva de recarga em N intervalos de 15 minutos, em que N é determinado pela razão entre a energia máxima da bateria (E_{total}), em Wh, e a potência máxima (P_{15}), em W, de acordo com a equação (4).

$$N = \frac{E_{total}}{\frac{P_{15}}{(1/4)}} \quad (4)$$

Conforme ilustrado na Fig. 4, o montante de energia correspondente ao último intervalo de 15 minutos é inferior ao montante dos demais intervalos da curva de recarga e seu valor é quantificado pela equação (5):

$$E' = (N - 1) \cdot P_{15} \cdot \frac{1}{4} \quad (5)$$

Consequentemente, a potência do último intervalo de 15 minutos, em W, é dada por (6):

$$P_{15final} = \frac{(E_{total} - E')}{1/4} \quad (6)$$

Os cálculos apresentados nas equações (1) a (6) foram modelados em ambiente MATLAB permitindo estabelecer os vetores cujos elementos são valores discretos representativos das grandezas envolvidas, isto é, a demanda de potência ativa, a energia para o reabastecimento e a distância previamente percorrida, correspondentes a cada intervalo de 15 minutos da curva de recarga.

Na Fig. 4 apresenta-se a curva de demanda da recarga prevista para a autonomia estimada do VE considerado, assumindo-se que a energia a ser suprida em cada intervalo de 15 minutos corresponde à iguais seguimentos de trajeto da distância percorrida. Assinala-se que a demanda do último termo é menor, pois representa a finalização do perfil de potência do teste de recarga, no qual esta decresce atingindo o valor praticamente nulo que assinala o final da recarga..

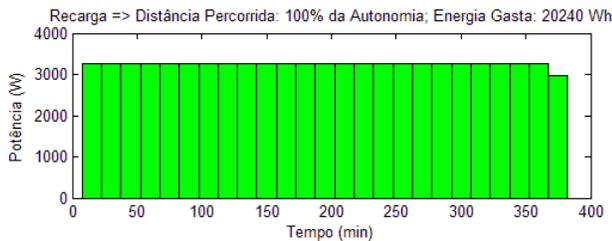


Figura 4. Curva de recarga da autonomia do Palio Weekend Elétrico.

Com base na curva de recarga total, é possível construir as curvas referentes às distâncias percorridas menores que a autonomia variando-se apenas o número de intervalos de 15 minutos cuja demanda é igual à potência máxima do teste de recarga.

Assinala-se que o modelo desenvolvido se aplica a carros e demais veículos elétricos submetidos à recarga normal com tensões na faixa de 110 V a 240 V. Para o veículo em análise, 15 minutos de recarga são equivalentes a percursos não superiores a 3,74 km. Assume-se, assim, que sejam muito poucos os VEs que, entre uma recarga e outra, percorram

distâncias menores que 3,74 km, garantindo, desta maneira, uma boa precisão para os resultados, desde que a amostra do ensaio de recarga e o percurso, ou ciclo de testes escolhido, apresente boa correlação com a condição de estudo.

Adotou-se a magnitude da potência no último intervalo de 15 minutos, igual em todas as curvas de recarga, 2960 W. Eventuais discrepâncias nos valores calculados para a energia consumida durante a recarga são influenciadas pelo rendimento do carregador do veículo, incluindo sua respectiva fiação, que nesta modelagem foi admitido ser igual a 95 %.

E. Superposição da Curva de Recarga na Curva de Demanda

Para simular a superposição da curva de recarga do veículo elétrico à curva de demanda do transformador, foi considerada a situação em que um grupo de VEs, idênticos ao veículo em análise, percorre distâncias distintas e iniciam suas respectivas recargas em horários diferentes.

As distâncias percorridas d seguem uma distribuição lognormal, cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma_d\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \mu_d}{\sigma_d}\right)^2\right] \quad (7)$$

em que $\ln d \sim N(\mu_d, \sigma_d)$.

O valor esperado E_d e a variância Var_d da distância percorrida guardam as seguintes relações com os parâmetros μ_d e σ_d :

$$E_d = \exp\left(\mu_d + \frac{\sigma_d^2}{2}\right) \quad (8)$$

$$Var_d = [\exp(\sigma_d^2) - 1] \cdot \exp(2 \cdot \mu_d + \sigma_d^2) \quad (9)$$

Logo, os parâmetros da distribuição de $\ln d \sim N(\mu_d, \sigma_d)$ podem ser determinados a partir do valor esperado e da variância da distância percorrida:

$$\mu_d = \ln\left(\frac{E_d^2}{\sqrt{Var_d + E_d^2}}\right) \quad (10)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{Var_d}{E_d^2}\right)} \quad (11)$$

Já os horários de conexão h seguem uma distribuição lognormal de três parâmetros, cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(h) = \frac{1}{(h-\lambda)\sigma_h\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(h-\lambda) - \mu_h}{\sigma_h}\right)^2\right] \quad (12)$$

em que λ é um parâmetro de localização que define o início do conjunto suporte da densidade de probabilidade do horário de conexão $f(h)$ e $\ln(h - \lambda) \sim N(\mu_h, \sigma_h)$.

O valor esperado E_h e a variância Var_h do horário de conexão guardam as seguintes relações com os parâmetros μ_h e σ_h :

$$E_h = \lambda + \exp\left(\mu_h + \frac{\sigma_h^2}{2}\right) \quad (13)$$

$$Var_h = [\exp(\sigma_h^2) - 1] \cdot \exp(2 \cdot \mu_h + \sigma_h^2) \quad (14)$$

O valor esperado μ_h e a variância σ_h são funções da média e do desvio padrão da distribuição lognormal com três parâmetros:

$$\mu_h = \ln \left[\frac{(E_h - \lambda)^2}{\sqrt{\text{Var}_h + (E_h - \lambda)^2}} \right] \quad (15)$$

$$\sigma_h = \sqrt{\ln \left[1 + \frac{\text{Var}_h}{(E_h - \lambda)^2} \right]} \quad (16)$$

A escolha da função densidade de probabilidade lognormal para a distância percorrida pelos veículos antes do início da recarga é decorrente de estatísticas pré-elaboradas com carros à combustão interna, uma vez que esta variável, em princípio, independe do veículo ser elétrico ou não, e teve como referência o relatório da *Electric Power Research Institute* – EPRI, de 1978, também utilizado em [17] e [18].

Quanto ao horário de conexão dos veículos à rede elétrica adotou-se a função densidade de probabilidade lognormal de três parâmetros tendo em vista a tendência da concentração da recarga após o horário de ponta devido ao custo atrativo da recarga para os usuários em um ambiente de tarifa diferenciada ou de rede inteligente de energia. Contribui para esta escolha o fato de que, em geral, os usuários tenderão a não adiar por demais a conexão depois do período da ponta visando garantir com isto haver tempo suficiente para o carro estar 100% carregado na manhã seguinte.

IV. SIMULAÇÕES

A simulação probabilística referente à distância percorrida e ao horário de conexão foi realizada por meio de rotinas de geração de números aleatórios disponíveis no MATLAB e configuradas de acordo com as funções densidades de probabilidade em (7) e (12).

Para a função densidade de probabilidade da distância percorrida (7) foi considerado o valor esperado E_d igual à distância percorrida de 48,55 km e o desvio padrão $\sqrt{\text{Var}_d}$ igual a 26,14 km. Substituindo estes valores nas equações (10) e (11) determinam-se os parâmetros μ_d e σ_d .

Por sua vez, para a função densidade de probabilidade do horário de conexão (12) foi considerado o valor esperado de conexão E_h igual ao horário de 23:45, acompanhado de uma constante de localização λ correspondente ao horário das 17:00 e desvio padrão $\sqrt{\text{Var}_h}$ igual a 4,5 horas. Substituindo estes valores nas equações (15) e (16) determinam-se os valores dos parâmetros μ_h e σ_h .

Para a realização das simulações, utilizou-se uma curva típica de demanda de um transformador de 75 kVA suprimindo uma área residencial com base na referência [19]. Desta forma assumiu-se, para a análise conduzida, a agregação adicional do reabastecimento de 27 carros elétricos idênticos, cujos dados de recarga constam nas Tabelas I e II. O período de demanda máxima do transformador inicia-se às 18:00, com o valor de 36,03 kW, atinge seu pico às 20:00, com 46,49 kW, e começa a decrescer a partir das 22:30, com 35,44 kW. A demanda média é de 22,37 kW, e o fator de carga é de 0,4812. O modelo de simulação assume a mesma curva de demanda ao longo de dois dias consecutivos, conforme ilustrado na Fig. 5.

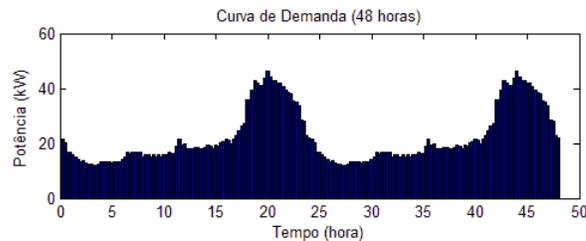


Figura 5. Curva de demanda das simulações.

A. Resultados da Simulação de Monte Carlo da Variável Distância e Horário

Esta simulação é considerada mais realista. Assim, na Fig. 6 constam na parte superior uma amostra da distribuição dos horários de conexão e na parte inferior a distribuição das distâncias percorridas dos 27 carros com as envoltórias das respectivas funções densidade de probabilidade lognormais oriundas das equações (7) e (12). A demanda média do carregamento da frota de carros elétricos, em verde, e sua superposição na curva de demanda do transformador são ilustradas na Fig. 7.

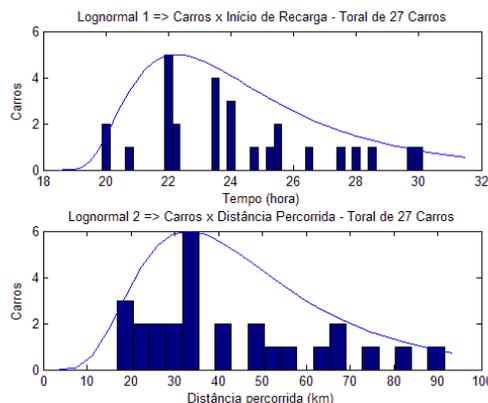


Figura 6. Distribuições lognormais das variáveis aleatórias.

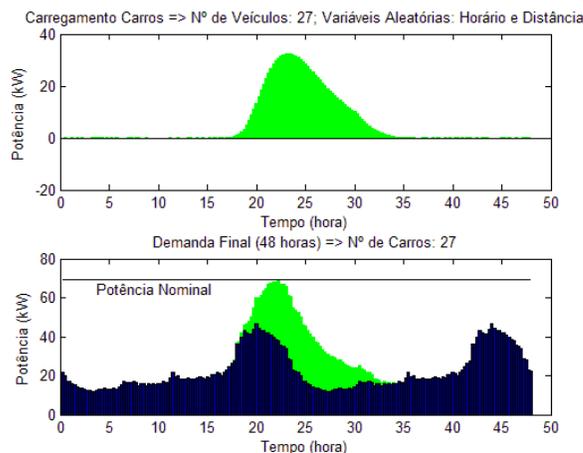


Figura 7. Carregamento da frota de carros e curva de demanda final.

Na Fig. 8 tem-se uma visualização completa dos resultados da Simulação de Monte Carlo, em que cada elemento de superfície representa a probabilidade relativa da ocorrência de carros que percorrem determinada distância e se conectam em determinado horário. Verifica-se que o somatório das

probabilidades dos elementos de superfície reproduz a unidade, demonstrando a coerência do modelo.

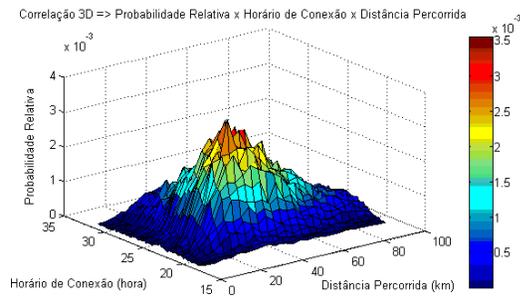


Figura 8. Probabilidade relativa dos carros em relação às variáveis aleatórias.

A barra de cores à direita da Fig. 8 reproduz a relação entre as cores dos elementos de superfície e os valores de probabilidade do eixo vertical. De acordo com as Figs. 6 e 7 foram obtidos os resultados apresentados na Tabela III.

TABELA III
RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA DE AMBAS AS VARIÁVEIS

Dados	Resultados
Distância máxima percorrida pelos VEs	33,61 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	6
Horário de máxima conexão de VEs	22:00
Número máximo de VEs que se conectam simultaneamente	5
Distância total percorrida pela frota	1146,6 km
Energia total consumida na recarga	259,65 kWh (934,75 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	68,78 kW (74,76 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	22:15
Fator de carga do transformador	0,4825

Verifica-se que nestas condições o reabastecimento dos VEs não resulta em sobrecarga no transformador.

Quanto à precisão das estimativas, o coeficiente de variação da demanda média é da ordem de 0,5 %, alcançado em uma simulação com 2000 sorteios, logo as estimativas estão bem precisas.

B. Resultados de Simulações Complementares

1) Influência da Variável Aleatória Distância Percorrida

Neste caso, a simulação de Monte Carlo da recarga de VEs é realizada com todos os carros iniciando suas recargas no mesmo horário e tendo percorrido diferentes distâncias antes da conexão com a rede elétrica, ou seja, com diferentes estados de carga iniciais das baterias. Os resultados encontrados nesta simulação estão apresentados na Tabela IV.

TABELA IV
RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA DA DISTÂNCIA PERCORRIDA

Dados	Carros
Distância máxima percorrida pelos VEs	29,88 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	5
Distância total percorrida pela frota	1243,7 km
Energia total consumida na recarga	259,84 kWh (935,43 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	128,41 kW (139,57 kVA)

Horário da demanda máxima do transformador	21:30
Fator de carga do transformador	0,2585

Diferentemente da simulação do item B, ao iniciar a recarga de todos os veículos simultaneamente, porém com todos os VEs percorrendo a mesma distância, os resultados desta simulação probabilística indicam elevada sobrecarga no transformador, atingindo 128,41 kW, conforme ilustrado na Tabela IV.

2) Influência da Variável Aleatória Horário de Conexão

Neste caso, na simulação de Monte Carlo considera-se que cada veículo inicia sua recarga em horários diferentes e percorrem a mesma distância referente a 80 % da sua autonomia. Os resultados encontrados nesta simulação estão apresentados na Tabela V.

TABELA V
RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA DO HORÁRIO DE CONEXÃO

Dados	Carros
Horário de máxima conexão de VEs	21:30
Número máximo de VEs que se conectam simultaneamente	4
Distância total percorrida pela frota	2117,6 km
Energia total consumida na recarga	458,73 kWh (1651,4 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	82,77 kW (89,97 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	23:00
Fator de carga do transformador	0,5012

Constata-se que, nesta condição, mesmo iniciando a recarga dos veículos em horários diferentes, porém com todos os VEs percorrendo a mesma distância, os resultados desta simulação probabilística indicam uma sobrecarga apreciável no transformador, atingindo 82,77 kW, conforme observado na Tabela V.

3) Simulação Determinística

Por fim, neste caso, cada veículo inicia a recarga no mesmo horário e percorre a mesma distância referente a 80 % de sua autonomia.

Nesta análise foram admitidas condições por demais conservativas e não realistas.

Os resultados encontrados nesta simulação estão apresentados na Tabela VI.

TABELA VI
RESULTADOS NUMÉRICOS DA SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA

Dados	Carros
Distância máxima percorrida pelos VEs	78,43 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	27
Distância total percorrida pela frota	2117,6 km
Energia total consumida na recarga	458,73 kWh (1651,4 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	128,43 kW (139,59 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	21:30
Fator de carga do transformador	0,3230

Nota-se que, neste caso, o tratamento determinístico da variável distância percorrida e do horário de conexão conduz à

simulação menos realista e com sobrecarga elevada da ordem de 128,43 kW e com longa duração de aproximadamente 5 horas e 15 minutos, conforme inferido da Tabela VI.

C. Comparação dos Resultados das Simulações

As simulações da recarga dos VEs permitiram verificar a influência na capacidade de um transformador de uma área residencial com respeito às variáveis aleatórias consideradas e a sua comparação com um caso puramente determinístico.

A seguir, na Tabela VII são reunidos os valores de demanda máxima do transformador suprimindo a recarga da frota de VEs considerada.

TABELA VII
COMPARAÇÃO DA DEMANDA DO TRANSFORMADOR NAS SIMULAÇÕES

Simulação	Demanda Máxima do Transformador
Probabilística de ambas as variáveis	68,78 kW (74,76 kVA)
Probabilística da distância percorrida	128,41 kW (139,57 kVA)
Probabilística do horário de conexão	82,77 kW (89,97 kVA)
Determinística	128,43 kW (139,59 kVA)

Constata-se que a demanda máxima é reduzida quando o horário de conexão é tratado como uma variável aleatória e possui o menor valor quando ambas as variáveis recebem tratamento probabilístico.

Merece destaque a análise do fator de carga do transformador levando em conta a recarga dos VEs, conforme reproduzido na Tabela VIII.

TABELA VIII
COMPARAÇÃO DO FATOR DE CARGA DO TRANSFORMADOR NAS SIMULAÇÕES

Simulação	Fator de Carga do Transformador
Probabilística de ambas as variáveis	0,4825
Probabilística da distância percorrida	0,2585
Probabilística do horário de conexão	0,5012
Determinística	0,3230

Os resultados encontrados indicam um aumento deste índice nas simulações onde o horário de conexão foi considerado uma variável aleatória. Trata-se de um resultado valioso que demonstra um maior aproveitamento do investimento nas instalações deste tipo. É importante lembrar que o fator de carga do transformador sem a recarga dos veículos elétricos é 0,4812.

O modelo desenvolvido permite o cálculo do consumo energético total e a respectiva eficiência média da frota de VEs. Em todos os casos simulados, como esperado, o valor do consumo energético médio é o mesmo e igual ao calculado após o teste de recarga, 0,78 MJ/km. Assim, este resultado pode ser comparado com os valores informados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE do INMETRO, referentes às eficiências energéticas dos veículos automotores de combustão interna [20].

Adicionalmente, foram definidos diversas especificações de fatores de diversidade a partir dos resultados das simulações probabilísticas em relação aos resultados da simulação determinística, para a distância percorrida (FD_d), para o horário

de conexão dos VEs (FD_c) e para a energia de recarga (FD_e), conforme indicado nas equações 17, 18 e 19, respectivamente.

$$FD_d = \frac{\text{Distância Percorrida no Caso Probabilístico}}{\text{Distância Percorrida no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (17)$$

$$FD_c = \frac{\text{VEs Conectados Juntos no Caso Probabilístico}}{\text{VEs Conectados Juntos no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (18)$$

$$FD_e = \frac{\text{Energia Gasta na Recarga no Caso Probabilístico}}{\text{Energia Gasta na Recarga no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (19)$$

Na Tabela IX apresentam-se os resultados dos cálculos dos fatores de diversidade para a simulação do item A, em que ambas as variáveis, distância e horário, receberam tratamento probabilístico.

TABELA IX
FATORES DE DIVERSIDADE PARA AMBAS AS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Fatores de Diversidade	Valores
Distância Percorrida – FD_d	54,1 %
Horário de Conexão – FD_c	18,5 %
Energia de Recarga – FD_e	56,6 %

Os cálculos apresentados são indicativos da necessidade e coerência do tratamento estocástico da recarga dos veículos elétricos, principalmente quanto ao horário de conexão. Considera-se bem coerente a proximidade dos valores encontrados para os fatores de diversidade tanto aqueles relativos às distâncias percorridas como às energias de recarga uma vez que a distância percorrida determina a energia consumida neste processo.

V. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um modelo de simulação para avaliação dos efeitos da recarga de VEBs sobre transformadores de distribuição sujeitos a este suprimento. Os resultados se mostraram satisfatórios tendo em vista que é possível aplicá-lo com facilidade, dispondo-se dos dados indicados.

O método proposto utiliza, além dos dados de placa do banco de baterias de tração e do respectivo carregador, informações oriundas de medições de recarga correspondentes às condições de trajeto específicas, como aquelas de ciclos de testes padronizados. Evidentemente o modelo não exclui curvas de recarga oriundas de simulações consideradas suficientes para a aplicação que se deseja. Vale mencionar que a simulação apresentada no trabalho, correspondente a um trajeto urbano, apresentou um consumo médio de 0,78 MJ/km e que é compatível com a faixa encontrada para os VEBs comercializados, citando-se o Tesla Model S com 0,79 MJ/km, o BYD E6 de 0,63 MJ/km e o BMW i3 de 0,46 MJ/km, por exemplo [21].

No que tange à demanda, principal foco do trabalho, em termos da capacidade do transformador, como o carregamento dos VEs adotado se baseia na potência dos respectivos carregadores, conclui-se que os resultados esperados das simulações são consistentes. Tal conclusão é confirmada pelo valor máximo obtido para o coeficiente de variação do estimador da demanda, cerca de 0,5 %, alcançado em uma simulação com 2000 sorteios. Isto mostra que os cálculos das

demandas apresentam precisão suficiente para ambas as variáveis aleatórias.

De forma geral, conclui-se que o reabastecimento para recarga de VEBs constitui um mercado propício às empresas de eletricidade, no contexto das redes inteligentes de energia, que direcionam o processo de recarga para horários convenientes e, inclusive, aos consumidores comerciais e industriais, que já possuem contratos cujas tarifas atendem a estes princípios. Este novo cenário necessita de políticas públicas adequadas que viabilizem economicamente a penetração de VEBs no Brasil. Estas perspectivas estão em conformidade com a eficiência energética e a redução das emissões atmosféricas preconizadas na parte que trata de transportes do documento “*The Future We Want*” elaborado por ocasião do evento internacional RIO + 20 e do qual o Brasil é signatário.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ pelo suporte e apoio para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] SERRA, J. V. F. *Electric Vehicles: Technology, Policy and Commercial Development*. New York. Earthscan. c2012. 224 p.
- [2] PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M.; SERRA, J. V. et al. *Analysis of the Use of Electric Vehicles by Electric Utilities Company Fleet in Brazil*. In: IEEE Latin America Transactions. [S.I.]. v. 9. n. 7. Dec. 2011.
- [3] PECORELLI PERES, L. A.; LAMBERT-TORRES, G.; HORTA, L. A. N. *Analysis and Discussion on Energy Supply to Non-Road Electric Vehicles in Brazil*. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY - T&D 2002 LATIN AMERICA CONFERENCE. Mar. 2002. São Paulo.
- [4] LOPES, J. A. P.; SOARES, F. J.; ALMEIDA, P. R. M. *Integration of Electric Vehicles in the Electric Power Systems*. In: Proceedings of the IEEE. V. 99. n. 1. Jan. 2011. ISSN: 0018-9219.
- [5] BATISTA, N. C.; MELÍCIO R.; MENDES, V. M. F. *Layered Smart Grids architecture approach and Field tests by ZigBee technology*. In: ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT. v. 88. f. 49-59. Dec. 2014.
- [6] PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M.; SERRA, J. V. F. et al. *Infrastructure Plan for Charging Stations for Electric Vehicles in Rio de Janeiro*. In: THE 26th INTERNATIONAL BATTERY, HYBRID AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM – EVS26. May 2012. Los Angeles.
- [7] TAYLOR, J.; MAITRA, A.; ALEXANDER, M.; BROOKS, D.; DURVALL, M. *Evaluation of the Impact of Plug-in Electric Vehicle Loading on Distribution System Operations*. In: Power & Energy Society General Meeting – PES '09. IEEE. Jul. 2009. Calgary. ISSN: 1944-9925. ISBN: 978-1-4244-4241-6
- [8] QIAN, K.; ZHOU, C.; ALLAN, M.; YUAN, Y. *Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems*. In: IEEE Transactions on Power Systems. v. 26. n. 2. May 2011. ISSN: 0885-8950.
- [9] RICHARDSON, P.; TAYLOR, J.; FLYNN, D.; KEANE, A. *Stochastic Analysis of the Impact of Electric Vehicles on Distribution Networks*. In: 21st International Conference on Electricity Distribution – CIRED. Jun. 2011. Frankfurt.
- [10] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balço Energético Nacional 2015: Ano base 2014*. Rio de Janeiro. 2015. CDU: CDU 620.9:553.04(81).
- [11] DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A. *Electric Vehicles: Energy Efficiency, Taxes and Public Policy in Brazil*. In: Law and Business Review of the Americas. [S.I.]. v. 19. n. 1. f. 55-78. Winter 2013. ISSN – 1571-9537J.
- [12] DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A.; SEROA DA MOTTA, R. *Environmental Regulation and Automotive Industrial Policies in Brazil. The case of “INOVAR-AUTO”*. In: Law and Business of Americas. [S.I.]. v. 20. n. 3. f. 399-420. Summer 2014.
- [13] PECORELLI PERES, L. A.; PEÇANHA, M. L. P.; PESSANHA, J. F. M.; PEREIRA, W. B.; CALDEIRA, J. F. *Development of Recharge Panels for Electric Vehicles at Buzios Smart City*. In: European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress. European Electric Vehicle Congress – EEVC. Dec. 2015. Brussels.
- [14] PEREIRA, W. B. *Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos no contexto das redes inteligentes de energia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 162 f. Set. 2015. Rio de Janeiro. CDU 004.89:629.113.6.
- [15] PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M.; PEÇANHA, M. L. P. et al. *Test Procedures and Measurements for Recharge Evaluation of Battery Electric Vehicles in Power Concessionaires in Brazil*. In: THE 24th INTERNATIONAL BATTERY, HYBRID AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM – EVS24. May 2009. Stavanger.
- [16] GARCIA-VALLE, R.; LOPES, J. A. P. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. Berlin. Springer. c2013. 312p.
- [17] ORR, J. A.; EMANUEL, S. M.; OBERG, K. W. *Current Harmonic Generated by a Cluster of Electric Vehicles Battery Chargers*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Massachusetts. v. PAS-101. n. 3. Mar. 1982.
- [18] STAATS, P. T.; GRADY, W. M.; ARAPOSTATHIS, A.; THALLAM, R. S. *A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers*. In: IEEE Transactions on Power Delivery. [Austin]. v. 12. n. 3. July 1997.
- [19] JARDINI, J. A.; TAHAN, C. M. V.; GOUVEA, M. R.; AHN, S. U.; FIGUEIREDO, F. M. *Daily Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers*. In: IEEE Transactions On Power Delivery. v. 15. n. 1. f. 375-380. Jan. 2000.
- [20] INMETRO. *Programa Brasileiro de Etiquetagem: Veículos automotores leves*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. [S.I.]. 2015.
- [21] ELECTROMAPS, *Carros Elétricos*. Disponível em: <<http://www.electromaps.com/coches-electricos>>. Acesso em: 22 Ago. 2015.



Windson Braga Pereira received his M.Sc. degree in Mechanical Engineering from Rio de Janeiro State University – UERJ in 2015 and B.Sc. degree in Electrical Engineering from Rio de Janeiro Federal University in 2012. His main research interest focuses on integration of electric vehicles in distribution networks and also electric propulsion systems. Windson published some papers in these areas. He worked with the CEFEN (Studies Center of the Engineering Faculty / Rio de Janeiro State University) and currently he is an independent consultant on electric systems and member of GRUVE (Electric Vehicles Studies Group) at UERJ.



Luiz Artur Pecorelli Peres received his D.Sc., in 2000, and M.Sc., in 1977, degrees from Itajubá Federal University and a B.Sc. degree from Rio de Janeiro Federal University in 1970 – All the three degrees in Electrical Engineering. He is currently a Professor at Rio de Janeiro State University – UERJ. He is a professor of Electromechanical Energy Conversion Systems and coordinates the Vehicle Propulsion Systems Laboratory as well the GRUVE (Electric Vehicles Studies Group). Dr. Pecorelli Peres worked on planning and power system operation with Eletrobras and Furnas Centrais Elétricas for more than 30 years. He is a member of IEEE, founder of the Brazilian Association of Electric Vehicles - ABVE and was coordinator member of Electric Vehicle Network of Ministry of Science Technology and Innovation and also author of books, technical studies and several papers.



José Francisco Moreira Pessanha received his D.Sc. degree from Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro in 2006 and his M.Sc. degree from Rio de Janeiro Federal University in 1999, both in Electrical Engineering. He has a B.Sc. degree in Electrical Engineering from Rio de Janeiro State University in 1994 and a B.Sc. degree in Statistics from National School of Statistical Science in 1992. Dr. Pessanha is researcher at the Brazilian Electric Power Research Center (CEPEL) and Professor in the Statistics Department at the Rio de Janeiro State University. Recently, Dr. Pessanha carried out a post-doc study on wind power probabilistic forecasting at INESC TEC at Porto, Portugal.