

Plataforma para Simulação de Redes de Distribuição Residenciais

Fábio Monteiro¹, Ricardo Torquato², Walmir Freitas³

Departamento de Sistemas e Energia (DSE)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas, Brasil

{¹engfabio; ²torquato; ³walmir}@dsee.fee.unicamp.br

Resumo—A atual evolução das redes de distribuição resultou em diversas pesquisas voltadas ao estudo da demanda, tais como monitoramento não intrusivo de eletrodomésticos; análise da conexão de novos dispositivos (painéis fotovoltaicos, veículos elétricos, armazenamento de energia); técnicas de gerenciamento da resposta da demanda etc. O desenvolvimento e validação destas técnicas requer um modelo detalhado de consumo residencial. Neste contexto, este trabalho apresenta uma plataforma que modela o perfil de consumo/geração dos equipamentos presentes em redes residenciais. São utilizadas técnicas de modelagem probabilística, visto que o perfil de comportamento destes equipamentos é aleatório. O estado da rede é determinado por meio da solução de fluxo de carga na frequência fundamental e nas harmônicas, além de simular a partida de motores, durante o período de 1 dia (24 horas). São apresentadas quatro aplicações da plataforma que comprovam sua aplicabilidade.

Palavras-chave—plataforma de simulação, qualidade de energia, redes residenciais de baixa tensão.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as redes residenciais têm mudado consideravelmente, por exemplo, com a maior utilização de cargas não lineares, novos dispositivos, como painéis fotovoltaicos e veículos elétricos, a existência de tarifas horárias diferenciadas etc. Devido a estas evoluções, existe a necessidade de ferramentas capazes de modelar e simular redes secundárias residenciais de maneira realista e eficiente. Estas ferramentas podem auxiliar pesquisas voltadas ao estudo da demanda, tais como: monitoramento não intrusivo de eletrodomésticos; análise da qualidade de energia em redes modernas; análise dos impactos da conexão de novas cargas (painéis fotovoltaicos, veículos elétricos, armazenamento de energia); técnicas de gerenciamento da resposta da demanda etc.

Entretanto, é impossível determinar de forma determinística o perfil de consumo residencial, visto que o comportamento dos eletrodomésticos ao longo do dia, a geração de painéis fotovoltaicos e a recarga de veículos elétricos apresentam diversas incertezas. Assim, a ideia do artigo é apresentar uma metodologia para determinar este perfil a partir de métodos probabilísticos, considerando as características dos dispositivos presentes na rede.

Métodos probabilísticos para determinar os perfis de consumo residencial foram inicialmente propostos por [1], [2]. Porém, aqui são apresentados avanços em relação aos modelos de [1], [2]. Destacam-se como principais contribuições a

modelagem comportamental de cargas tipicamente encontradas em redes brasileiras (chuveiro elétrico, ar condicionado, ferro elétrico), de novos dispositivos, como por exemplo, diferentes tipos de veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia. A modelagem comportamental representa o maior avanço da plataforma apresentada em relação a outras existentes. Os simuladores existentes focam, principalmente, na resolução do modelo elétrico da rede, sendo que o comportamento das cargas e geradores no tempo deve ser fornecido externamente pelo usuário, a partir de medições ou perfis de consumo/geração típicos.

A partir dos modelos comportamentais desenvolvidos, são apresentadas e discutidas quatro aplicações práticas da plataforma, as quais incluem: comparação entre o comportamento de redes brasileiras e canadenses, operação de geradores fotovoltaicos com armazenamento de energia, controle local de tensão pelos geradores fotovoltaicos.

II. MODELO COMPORTAMENTAL

São apresentadas técnicas para modelar a operação de cargas residenciais (aparelhos eletrodomésticos, veículos elétricos e dispositivos de armazenamento de energia), e de geradores fotovoltaicos. As características probabilísticas da operação de cada dispositivo são modeladas durante o período de 1 dia.

A. Aparelhos Eletrodomésticos

O funcionamento de cada eletrodoméstico é determinado por três fatores principais: instante em que a carga é ligada, duração do ciclo de operação da carga e comportamento da potência demandada durante o ciclo de operação. Tais fatores são descritos a seguir.

1) Instante de acionamento da carga

Variável aleatória que depende do número de ocupantes da casa, do padrão de permanência dos ocupantes na casa (PP), do número médio de operações diárias da respectiva carga, e das chamadas curvas de probabilidade de uso (P_r).

O PP é uma variável binária que indica se a residência está ocupada ou não em cada instante do dia. No simulador aqui apresentado, são considerados 5 PP s, os quais estão descritos na Tabela I. Já as curvas de probabilidade de uso indicam a probabilidade de determinado dispositivo ser ligado em cada instante do dia. Elas foram obtidas de enquetes oficiais [3]-[5].

Este trabalho foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n° 2014/09538-6, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos n° 132371/2014-6, 481195/2013-0 e 307763/2015-3, pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), processo PD-0063-3012/2014 e pela CAPES - Brasil.

TABELA I. PADRÕES DE PERMANÊNCIA.

Dia	Tipo Trabalho	Horário Acordar	Período Trabalho	Horário Dormir
Dia de Semana	Integral	6h-7h30	8h-17h	22h-24h
	Parcial Manhã	6h-7h30	8h-12h	22h-24h
	Parcial Tarde	6h-8h	13h-17h	22h-24h
	Sem Trabalho	6h-8h	N/A	22h-24h
Final de Semana	N/A	7h-9h	N/A	22h-24h

Cada eletrodoméstico é associado a uma curva de probabilidade de uso, sendo que estas curvas estão divididas em 10 grupos de atividades: iluminação, ar condicionado, chuveiro, ferro, computador, televisão, limpeza, cozinha, lavanderia e café da manhã. Para exemplificar, é exibido na Fig. 1 duas curvas de probabilidade de uso: ar condicionado e chuveiro.

A partir das variáveis descritas acima, é possível determinar a probabilidade do eletrodoméstico ser acionado (P) em determinado instante do dia. A probabilidade é dada por (1), em que t é o instante simulado; c é o fator de ocupação, m é o número médio de acionamentos de cada eletrodoméstico por dia [2]; e k é a razão entre o número de ocupantes da casa e o número médio de pessoas por casa, obtido em [6].

$$P(t) = P_r(t) \times c \times m \times k \quad (1)$$

O fator c é calculado para que a área da curva P_r nos instantes em que a residência está ocupada ($PP(t)=1$) seja igual a 1, como apresentado em (2).

$$c = \begin{cases} 0, & PP(t) = 0 \\ 1, & PP(t) = 1 \\ \frac{24h}{\sum_{t=0h}^{24h} P_r(t) \times PP(t)}, & PP(t) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Por fim, para determinar se um dado eletrodoméstico é acionado ou não no instante t , gera-se um número aleatório com distribuição uniforme entre 0 e 1. Se esse número for menor que $P(t)$, então a carga é ligada nesse instante.

2) Duração do Ciclo

Variável aleatória com distribuição uniforme entre valores mínimo e máximo típicos de utilização, obtidos de [2].

Aplicando-se os dois fatores acima, é possível obter os estados de operação de todas as cargas de uma ou mais residência. É apresentado na Fig. 2 um exemplo de perfil, o qual mostra os períodos em que as cargas de uma residência foram e permanecem ligadas.

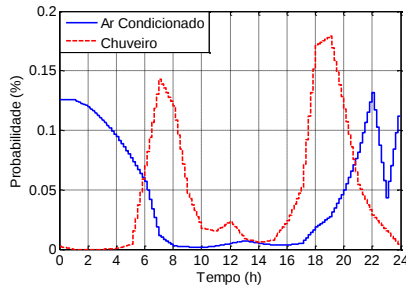


Fig. 1. Curva de probabilidade de uso do ar condicionado e do chuveiro.

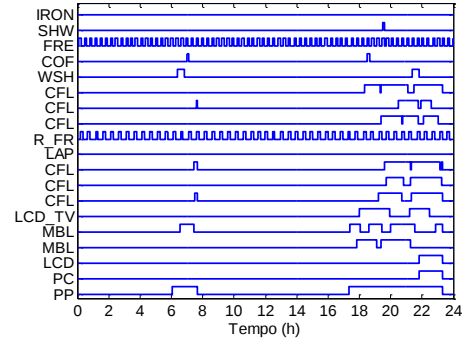


Fig. 2. Exemplo de perfil de utilização das cargas de uma residência.

3) Comportamento da Demanda dos Eletrodomésticos

A maioria dos eletrodomésticos apresenta uma característica comportamental de vários níveis de demanda. Assim, uma vez definido os períodos de utilização das cargas, como apresentado na Fig. 2, a plataforma também gera um conjunto de variáveis aleatórias para compor os perfis de demanda de todos os eletrodomésticos. É apresentado na Fig. 3 o modelo utilizado pela plataforma para representar os perfis da geladeira e do ferro elétrico. Estes perfis foram definidos através de medições realizadas em diversos eletrodomésticos. A Tabela II apresenta as variáveis aleatórias e suas funções densidade de probabilidade para determinar os perfis do ferro elétrico e da geladeira. Devido à limitação de espaço, são apresentados apenas os perfis de demanda de dois eletrodomésticos, porém são modelados todos os eletrodomésticos, de acordo com os comportamentos medidos.

B. Veículos Elétricos

São necessários três fatores principais para modelar a recarga dos veículos elétricos: o instante de início da recarga, o nível da bateria (NB) ao se conectar à rede e o comportamento da potência demandada durante a recarga. O modelo destes fatores é descrito a seguir.

1) Instante de início da recarga

Determinado, aleatoriamente, a partir de curvas de probabilidade semelhantes às utilizadas para determinar o

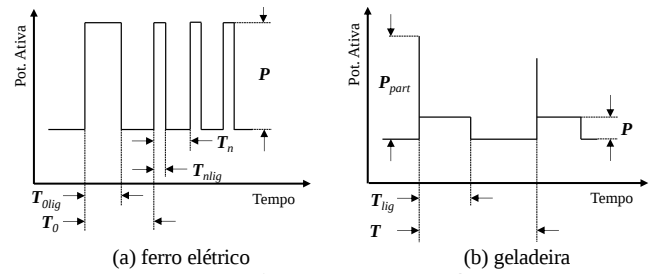


Fig. 3. Perfis de demanda multi-nível.

TABELA II. PARÂMETROS DO MODELO INTERNO DO FERRO E DA GELADEIRA.

Ferro Elétrico		Geladeira	
Variável	Valor	Variável	Valor
P	Definido pelo usuário	P	Definido pelo usuário
T_0	$Norm(220;4)$ seg	P_{part}	Executa subprograma
T_{olig} / T_0	$Unif(0,52;0,54)$ seg	T	$Norm(30;1,5)$ min
T_n	$Norm(100;2)$ seg	T_{lig}	$Norm(9,0,5)$ min
T_{nlig} / T_n	$Unif(0,18;0,2)$ seg		

comportamento dos aparelhos eletrodomésticos [7]. Para cada veículo, em determinado instante de tempo t , gera-se um número aleatório com distribuição uniforme entre 0 e 1 e compara-se este número com o valor correspondente ao instante t na curva de probabilidade. Caso o número gerado for menor que o da curva de probabilidade, neste instante, o veículo se conecta à rede para recarregar.

2) Nível da bateria (NB) ao se conectar à rede

Para determinar NB, é necessário definir a distância percorrida (d) pelo veículo durante 1 dia. De acordo com dados extraídos de [8], d é um número aleatório com distribuição log-normal com média de 87 km e variância de 24 km. Portanto pode-se definir o NB através de (3) [9], em que α é o número de dias que o veículo ficou sem recarga (normalmente 2 dias para carros de passeio); e d_{max} é a distância máxima percorrida com autonomia da bateria, sendo um valor típico de 128 km.

$$NB = \left(\frac{d_{max} - \alpha \times d}{d_{max}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

3) Potência demandada na recarga

O perfil de demanda durante a recarga depende do tipo da bateria utilizada no veículo elétrico. São modelados dois tipos de bateria, íon-lítio e chumbo-ácido, sendo determinado probabilisticamente qual tipo será utilizado para cada veículo existente na rede.

Tanto os perfis de recarga das duas baterias, quanto à duração da recarga, são totalmente diferentes. A recarga das baterias e seu estado de carga ao longo do processo são apresentados na Fig. 4, obtidos por meio de medições realizadas em veículos elétricos reais [10], [11].

C. Painéis Fotovoltaicos

A potência gerada por painéis fotovoltaicos depende diretamente do nível de radiação solar incidente no mesmo, o qual, por sua vez, apresenta caráter aleatório devido ao comportamento das nuvens [12]. O comportamento do nível de radiação solar é obtido a partir de medições da estação meteorológica de Congonhas (São Paulo), disponíveis online [13]. As medições utilizadas foram realizadas a cada 1 hora, durante 1 ano. Para o presente trabalho, foi obtida a média deste ano de medições, exibida na Fig. 5.

Como a curva de radiação apresenta diversas incertezas, considera-se na plataforma um fator de correção para cada instante do dia, a fim de incluir aleatoriedade na curva. Este fator possui distribuição normal, com média da radiação medida no instante e desvio padrão de 5% do valor medido, como apresentado em (4).

$$rad(t) = \text{Norm}[\mu = rad_m(t), \sigma = rad_m(t) \times 5\%] \quad (4)$$

Após determinar a curva de radiação solar, a potência gerada pelo painel pode ser calculada. Estudos indicam que a potência de saída do painel é relacionada linearmente com o nível de radiação solar [14]. Adicionalmente, manuais de fabricantes tipicamente informam a potência máxima gerada por um painel quando a radiação solar é 1.000 W/m^2 [15]. Com isso, a potência

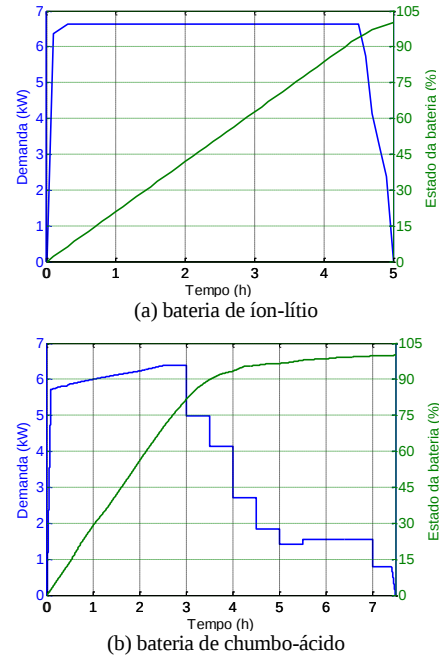


Fig. 4. Perfil de recarga para duas tecnologias de baterias.

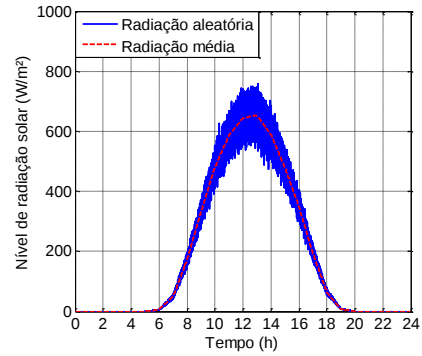


Fig. 5. Curva de radiação solar média de 1 ano.

de saída de um gerador fotovoltaico pode ser estimada por (5), em que P_{nom} representa a potência nominal do gerador e $rad(t)$ é a radiação solar no instante t .

$$P_{inj} = \frac{rad(t)}{1000 \text{ W/m}^2} \times P_{nom} \quad (5)$$

D. Armazenamento de Energia

Para o armazenamento de energia, foram consideradas as baterias de íon-lítio, similares às utilizadas nos veículos elétricos, as quais apresentam perfil típico de recarga semelhante ao apresentado na Fig. 4(a).

Como valor padrão, considera-se que no simulador a capacidade de armazenamento das baterias é 7,75 kWh (4 vezes menor que a capacidade típica de uma bateria de veículo elétrico – 31 kWh). Entretanto, este dado pode ser alterado caso o usuário possua informação precisa a respeito da bateria que deve ser estudada.

As baterias são utilizadas em determinado consumidor somente quando este também possui um painel fotovoltaico. Elas são carregadas diretamente a partir da potência injetada pelos painéis fotovoltaicos. Sua recarga é modelada matematicamente por (6) [16], em que NB_{pv} é o nível de carga

da bateria dado em porcentagem, sendo que o mínimo NB_{PV} considerado é de 5% para não afetar a vida útil da bateria; P_{inj} é a potência produzida pelo painel fotovoltaico do consumidor; Δt é a resolução da simulação; E_M é a energia máxima armazenada pela bateria.

$$NB_{PV}(t + \Delta t) = NB_{PV}(t) + \frac{P_{inj} \times \Delta t}{E_M} \quad (6)$$

Adota-se que o início da recarga da bateria ocorre quando P_{inj} supera 20% da potência nominal do painel. Por outro lado, P_{inj} não pode ser maior que um limite estabelecido pela bateria (limite de 1,65 kW é assumido neste artigo, ou seja, 4 vezes menor que a bateria de um veículo elétrico típico).

Durante a descarga, o perfil de potência injetada é semelhante ao perfil de recarga apresentado na Fig. 4 (a).

Na Fig. 6 é apresentado um exemplo de recarga e descarga de uma bateria, juntamente com seu NB_{PV} para cada instante. Potência positiva corresponde ao período de recarga e negativa ao de descarga.

III. MODELO ELÉTRICO

Após determinar os perfis de demanda e geração para as variáveis do estudo, ou seja, definido o cenário de simulação para o período simulado, o problema torna-se determinístico. Realiza-se, então, o cálculo de fluxo de carga temporal para obter o estado de operação da rede em cada instante do dia. São realizados 86.400 cálculos de fluxo de carga para o período de 24 horas (resolução de 1 segundo).

O estado de operação da rede é determinado nas frequências fundamental e harmônica, utilizando o procedimento descrito em [17], [18]. O pico de potência consumida durante a partida de motores de indução (os quais estão presentes na geladeira, freezer, etc.) também é modelado, conforme descrito em [19].

Os métodos empregados no cálculo de fluxo de carga e no cálculo do pico de corrente durante a partida de motores de indução são bem conhecidos. Por este motivo e devido à limitação de espaço, o procedimento detalhado de cálculo do estado de operação da rede não é apresentado neste artigo.

IV. ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO

A estrutura de simulação está apresentada no fluxograma na Fig. 7 e descrita a seguir. Inicialmente são carregados os dados de entrada, os quais são divididos em dois arquivos.

O primeiro contém os parâmetros elétricos da rede, ou seja, informações da rede da distribuidora, como, parâmetros do transformador, parâmetros das linhas de distribuição,

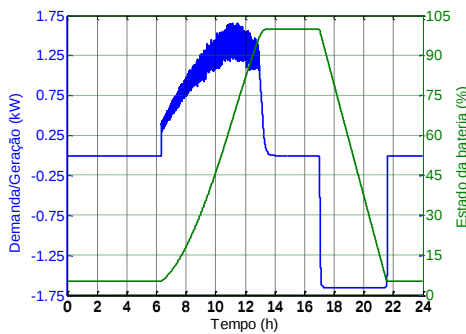


Fig. 6. Perfil de recarga e descarga de uma bateria.

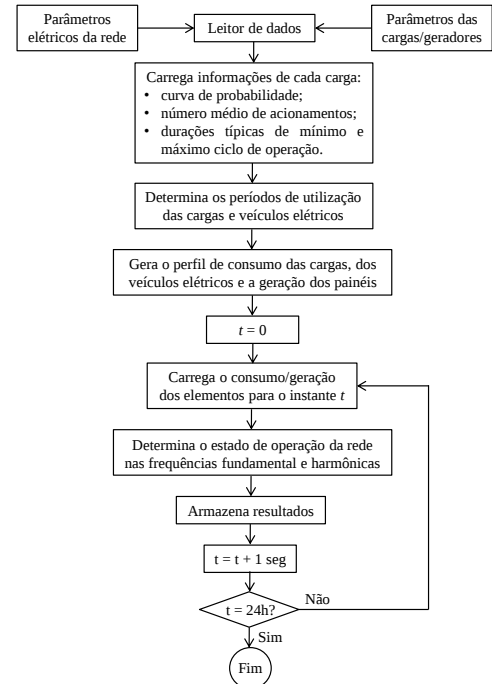


Fig. 7. Fluxograma do método de simulação proposto.

impedâncias de aterramento, e o equivalente da rede primária. Cada parâmetro possui um valor típico, caso o usuário não possuía as informações detalhadas da distribuidora.

O segundo arquivo contém as informações das conexões internas das casas. O usuário apenas necessita informar quais são os elementos existentes em cada compartimento de cada casa. A única informação elétrica necessária dos elementos são a potência nominal e fator de potência. Caso o usuário não tenha essas informações utiliza-se os valores típicos. Devido à diversidade de tipos de eletrodomésticos e à flexibilidade em sua quantidade, permite-se assim, a criação de cenários realistas. Em relação à quantidade de eletrodomésticos existentes em cada casa pode-se utilizar a quantidade média brasileira, obtida em [3]. Em seguida, determina-se a solução comportamental dos elementos existentes na rede, ou seja, o perfil de consumo e geração para um período de 24 horas.

Com isso, para cada instante (1 segundo) é obtido o estado da rede na frequência fundamental e posteriormente nas frequências harmônicas. Os resultados fornecidos pelo simulador são o estado da rede para todo o período simulado. Toda a estrutura de simulação apresentada foi desenvolvida utilizando o software MATLAB.

V. APLICAÇÕES E RESULTADOS

Os resultados de quatro estudos utilizando a plataforma proposta são apresentados e discutidos.

A. Comparação entre a Rede Brasileira e a Rede Canadense

O simulador proposto contempla dispositivos utilizados tanto em residências brasileiras quanto em residências canadenses. Inicialmente, compara-se o consumo médio de um consumidor brasileiro com o consumo médio de um consumidor canadense. Para isso, são consideradas uma rede secundária real brasileira (13 consumidores) e uma rede canadense (10 consumidores). O perfil médio de demanda (por consumidor) para ambas as redes

é apresentado na Fig. 8. Nota-se que o consumo de redes canadenses é significativamente superior ao brasileiro. Na simulação, obteve-se um consumo médio de 6,72 kWh em casas canadenses, e de 3,69 kWh nas brasileiras, ou seja, o consumo canadense mostrou-se quase 100% superior ao brasileiro. Na Fig. 9 comparam-se as tensões harmônicas médias (por consumidor) das duas redes. Já as tensões harmônicas no transformador estão apresentadas na Fig. 10. A partir dessas figuras, é possível observar um maior nível de harmônicos entre 19:00 e 23:00 horas, visto que, um maior número de cargas não-lineares estão conectadas à rede neste período. Adicionalmente, as tensões harmônicas no transformador são inferiores às tensões no painel de serviço dos consumidores, sugerindo que ocorre cancelamento entre as correntes harmônicas injetadas pelos diversos consumidores.

B. Geração Fotovoltaica com Veículos Elétricos

Geração fotovoltaica e veículos elétricos apresentam impactos opostos na rede. Entretanto, não existe compensação entre os mesmos, visto que seus ciclos de operação ocorrem em instantes distintos do dia. O perfil de consumo de uma residência com geração fotovoltaica e veículo elétrico é apresentado na Fig. 11.

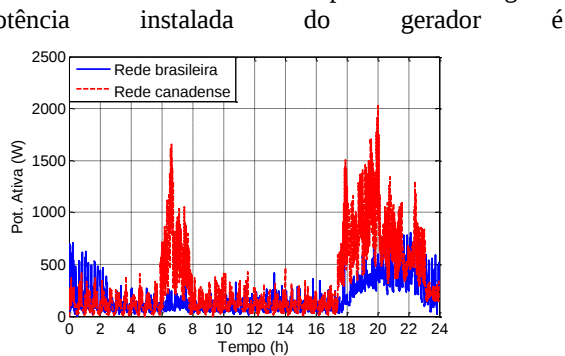


Fig. 8. Perfil médio de demanda para as redes simuladas.

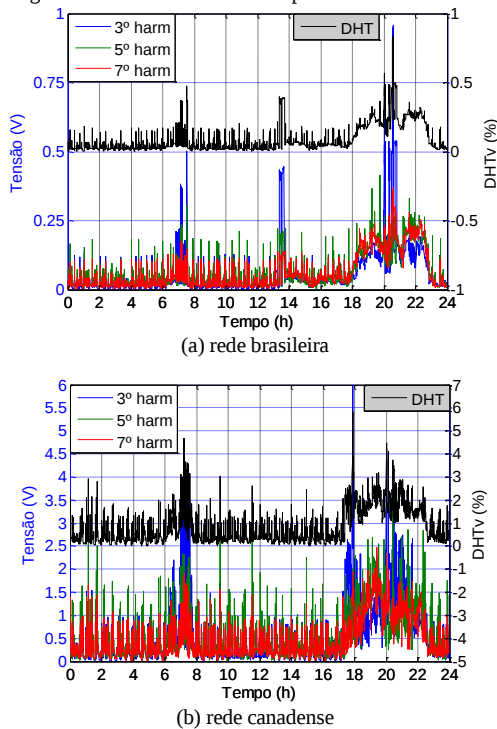


Fig. 9. Média das tensões harmônicas da Fase A por consumidor.

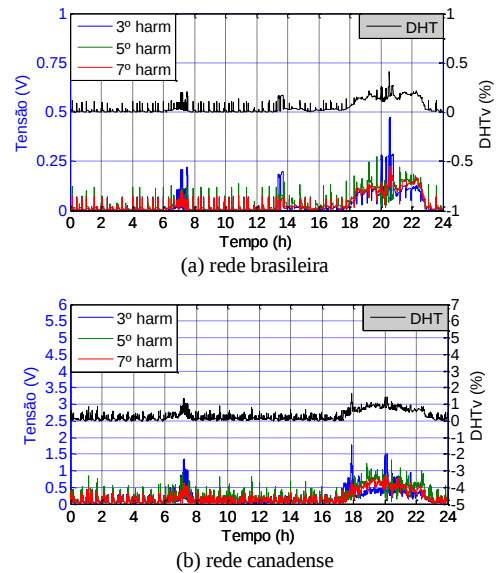


Fig. 10. Tensões harmônicas no transformador.

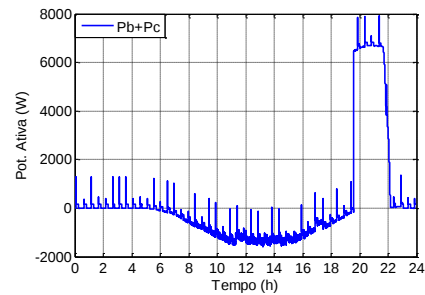


Fig. 11. Perfil de consumo/geração total de uma residência.

2 kWp bifásico, enquanto a bateria do veículo elétrico possui capacidade de 31 kWh e carregador bifásico de 6,6 kW. Nota-se injeção de potência na rede por volta do meio-dia, e consumo elevado no período de pico de carga; fenômeno que está sendo denominado “curva do pato” (em inglês, *duck curve*) [20].

A disparidade de consumo ao longo do dia é indesejável para a concessionária, pois indica que suas redes estão utilizadas de forma inadequada (baixo fator de carga).

C. Geração Fotovoltaica com Armazenamento de Energia

Neste estudo, avalia-se o impacto da conexão de baterias na rede para armazenar a energia produzida por geradores fotovoltaicos durante o dia e injetá-la no período de máxima carga. Isto pode melhorar o fator de carga da rede. Na Fig. 12 é apresentado o perfil da potência ativa de uma residência considerando dois cenários. No primeiro, apenas com painéis fotovoltaicos totalizando 2 kWp instalados. Já no segundo estudo, avalia-se a operação do mesmo sistema, em conjunto com uma bateria com capacidade de 7,75 kWh. Toda a energia armazenada na bateria é injetada na rede durante o período de máxima carga (entre 17:00 e 22:00). Ao injetar energia no período de máxima carga, é possível aproveitar também a diferença tarifária, presente na tarifa branca. Ao utilizar a tarifa branca da CPFL [21], em um período de 24 horas, obtém-se uma remuneração de R\$ 0,7624 quando há apenas o painel, e R\$ 1,5268 com o sistema painel-bateria, ou seja, um aumento de mais de 100% na remuneração obtida pelo consumidor.

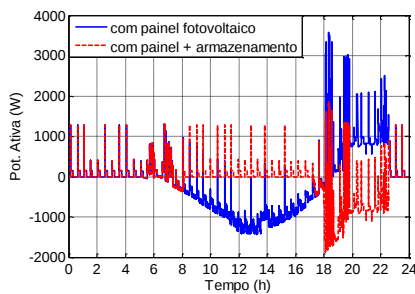


Fig. 12. Perfil da potência ativa de uma residência.

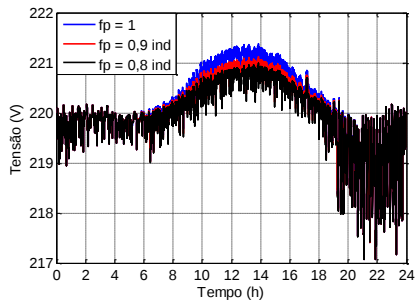


Fig. 13. Perfis de tensão para diferentes fatores de potência dos painéis.

D. Controle de Tensão com Geração Fotovoltaica

A elevação no perfil de tensão é um dos principais fatores técnicos que limitam a conexão de painéis fotovoltaicos. Para limitar este impacto e adiar possíveis reforços nas redes, alguns métodos empregam a capacidade de absorção de potência reativa pelos sistemas fotovoltaicos [22]. Neste estudo, avalia-se o uso de painéis fotovoltaicos com fator de potência indutivo para controlar a tensão. Na Fig. 13, são apresentados os perfis de tensão em uma residência com painéis totalizando 2 kWp instalados e operando com diferentes fatores de potência. Nota-se que a maior elevação de tensão acontece quando o conjunto de painéis opera com fator de potência unitário. À medida que painéis são operados com fator de potência indutivo, a elevação de tensão é amenizada. Portanto, operar o conjunto de painéis consumindo potência reativa tem o potencial de compensar parte dos impactos na tensão.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma plataforma para simulação das redes de baixa tensão. Foi observado que a operação de tais redes pode ser desacoplada em dois modelos principais, o modelo comportamental e o modelo elétrico. A partir do modelo comportamental, são determinadas as características aleatórias de operação das cargas e geradores, tais como instante de conexão e desconexão da rede, número de ciclos de operação por dia etc. O modelo elétrico é utilizado para determinar o estado de operação da rede em cada instante do dia. Com esta plataforma, é possível obter, por exemplo, perfis bastante realistas do consumo residencial brasileiro e canadense; obter o impacto instantâneo e global da recarga de veículos elétricos; obter o impacto de geradores fotovoltaicos operando em conjunto com dispositivos armazenadores de energia etc. Isto foi mostrado por meio de quatro estudos.

REFERÊNCIAS

[1] R. Torquato, Q. Shi, W. Xu, e W. Freitas, "A Monte Carlo Simulation Platform for Studying Low Voltage Residential

Networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2766–2776, Nov. 2014.

[2] D. S. Corrêa, "Methodology for Evaluating the Collective Harmonic Impact of Residential Loads in Modern Power Distribution Systems," Universidade de Campinas, 2012.

[3] PROCEL e Eletrobrás, *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso*, 2005.

[4] Ipsos-RSL e Office for National Statistics, *United Kingdom Time Use Survey, 2000*, 3rd ed Colchester, Essex, U.K., 2003.

[5] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, e C. Conor, "Domestic electricity use : a high-resolution energy demand model," *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1878–1887, 2010.

[6] IBGE, *Censo Demográfico 2010 - Famílias e Domicílios*, 2010.

[7] P. Richardson, A. Maitra, A. Keane, J. Taylor, e M. Moran, "Impact of electric vehicle charging on residential distribution networks: An Irish demonstration initiative," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4.

[8] Department for Transport, *Transport Statistics Bulletin - National Travel Survey 2008*, 2009.

[9] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, e Y. Yuan, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 802–810, 2011.

[10] Southern California Edison, *Performance Characterization GM EV1*, 2000.

[11] Southern California Edison, *Performance Characterization Nissan Altra-EV*, 1999.

[12] G. S. Campbell, e J. M. Norman, *An Introduction to Environmental Biophysics*, vol. 1, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2000, pp. 173–175.

[13] (Nov 2015). *Solar and Wind Energy Resource Assessment* [Online]. Disponível: <http://en.openei.org/apps/SWERA/>

[14] G. Tamizhmani, K. Paghasian, J. Kuitche, M. G. Vemula, e G. Sivasubramanian. (2011). *Photovoltaic module power rating per IEC61853-1 standard: A study under natural sunlight*, Solar America Board for Codes and Standards, Mesa, AZ, USA.

[15] Sunpower, (Jul 2015). *E20/435 Solar Panel*, Datasheet [Online]. Disponível: <http://www.solarplaza.com/top10-monocrystalline-cell-efficiency/#Suntech>.

[16] J. Munkhammar, "Distributed Photovoltaics, Household Electricity Use and Electric Vehicle Charging," 2015.

[17] Task force on harmonics modeling and simulating. "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. part I. Concepts, models, and simulation techniques," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 452–465, Jan. 1996.

[18] W. Xu, "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique," The University of British Columbia, UBC, 1989.

[19] P. C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, vol. 1, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1997.

[20] California Independent System Operator, *What the duck curve tells us about managing a green grid*, 2013.

[21] ANEEL, (Out 2015). *Tarifas de Aplicação*, [Online]. Disponível: http://www.aneel.gov.br/atosdodia_reducaotarifaria/atos/reh_1449_24012013_anexo_dir.pdf.

[22] A. Ballanti, F. Pilo, A. Navarro-Espinosa, e L.F. Ochoa, "Assessing the benefits of PV var absorption on the hosting capacity of LV feeders," in *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES*, vol., no., pp.1–5, 6–9, Oct. 2013.