

CURVA DE CARGA OTIMIZADA PARA ARMAZENADORES DE ENERGIA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM A PRESENÇA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

GABRIELA PESSOA CAMPOS*, MÁRIO OLESKOVICZ*, PAULO ESTEVÃO TEIXEIRA MARTINS*,
MAURICIO BICZKOWSKI†

**Universidade de São Paulo (USP)*
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
São Carlos, SP, Brasil

†*COPEL Distribuição S.A.*
Curitiba, PR, Brasil

Emails: gabrielacampos@usp.br, olesk@sc.usp.br, pauloetm@usp.br,
mauricio.biczkowski@copel.com

Abstract— This paper aims to generate a battery-optimized charge curve using Ant Colony Optimization (ACO). The goal is smooth the voltage on the bus that a Distributed Generator (DG) has been allocated, adjusting the voltage levels of the bus to the limits, specified by PRODIST. The voltage variations, which may lead to problems in the electric power supply, occur due to the DG intermittency, a photovoltaic system, and the behavior of the connected loads. For this scenario, the European 14-bus CIGRÉ's benchmark distribution system was simulated with presence of a DG, in the case, characterized by photovoltaic panels, and a battery bank, in a Real Time Digital simulator (RTDS). After the modeling and simulation of the system, the data were extracted and the ACO algorithm was modeled on Matlab. Then, after applying the optimization, a charge curve was found for the battery, so this curve implies a smoother voltage in the bus which the GD and the battery were allocated and the voltage in steady state within the limits according to standard.

Keywords— Distributed Generation, Energy Storage System, Optimization, ACO.

Resumo— O enfoque principal deste artigo é gerar uma curva de carga otimizada para uma bateria, utilizando Otimização por Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*). O objetivo é suavizar a tensão em um barramento que possui um Gerador Distribuído (GD) alocado, adequando os níveis de tensão do barramento para os limites especificados pelo PRODIST. As variações de tensão que podem vir a caracterizar problemas da energia elétrica no fornecimento ocorrem no sistema em detrimento da intermitência do GD, um sistema fotovoltaico, e do comportamento das cargas conectadas. Para este cenário, foi simulado o sistema de distribuição de média tensão europeu do CIGRÉ com a presença de um GD, no caso, caracterizada por painéis fotovoltaicos, e um banco de baterias, em um simulador em tempo real (RTDS – *Real Time Digital Simulation*). Após a modelagem e simulação do sistema, os dados foram extraídos e modelou-se o algoritmo ACO em ambiente Matlab. Após o processo de otimização foi encontrada uma curva de carga para a bateria, de modo que essa curva implica em uma tensão mais suavizada na barra em que o GD e a bateria estão alocados e com a tensão em regime permanente dentro dos limites propostos em norma.

Palavras-chave— Geração Distribuída, Sistema de Armazenamento de Energia, Otimização, ACO.

1 Introdução

A geração distribuída, de acordo com Ziadi et al. (2014) tem um grande potencial econômico e ambiental, especialmente quando baseada em fontes de energia renováveis. No entanto, uma grande penetração de Geradores Distribuídos (GDs) em um sistema de distribuição pode causar extrapolação dos limites de tensão definidos em norma, bem como fluxo reverso para o transformador da subestação, acarretando em aumento das perdas no sistema. Ainda de acordo com Ziadi et al. (2014), a natureza intermitente de fontes como solar e eólica pode afetar de maneira significativa a confiabilidade e a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) dos sistemas de distribuição, provocando, por exemplo, flutuações de tensão e variações na frequência.

Assim, torna-se interessante mitigar tais problemas causados pela intermitência, visando uma maior aplicação de fontes renováveis em sistemas de distribuição. Uma das medidas mitigatórias

consiste no uso de sistemas de baterias em conjunto com o GD. Segundo Resch et al. (2017), as baterias podem regular a tensão dos sistemas nos quais são instaladas, bem como auxiliar na restauração do sistema após uma falta ou interrupção, além de servir como uma fonte de alimentação ininterrupta, auxiliar na compensação de reativo, do mesmo modo que atuar na regulação da frequência.

Para tal, um sistema de baterias requer um sistema de gerenciamento de energia (EMS – Energy Management System) que irá tomar decisões acerca da operação da bateria, baseadas nas características do armazenador, do sistema no qual se encontra, do clima, das características das cargas. O gerenciador deve definir a energia consumida ou injetada, bem como os parâmetros para o controle do conversor. De acordo com Zhang et al. (2018), o EMS é o responsável por definir o cronograma de uso das baterias, e gerenciar a energia armazenada. Nesse contexto, o EMS pode conter algoritmos de otimização visando o melhor

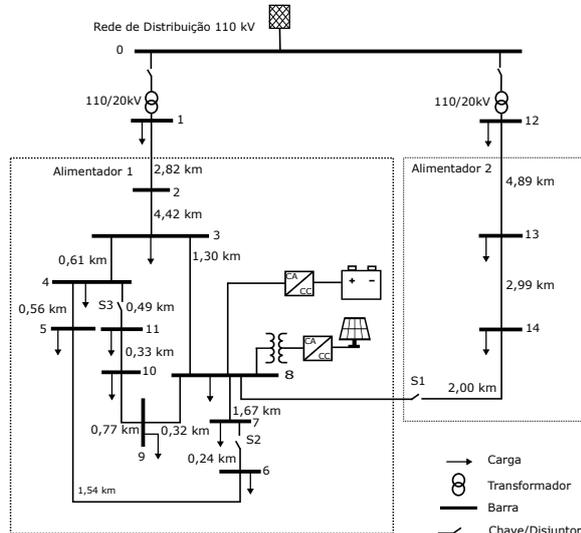
perfil de atuação do armazenador.

Neste cenário, o presente artigo tem como objetivo gerar uma curva de carga otimizada para um banco de baterias em um sistema de distribuição com a presença de um gerador fotovoltaico, utilizando a Otimização por Colônia de Formigas (ACO - *Ant Colony Optimization*). A otimização proposta tem como intuito, a suavização da tensão no barramento em que o GD e a bateria estão conectados, além de adequar a tensão em regime permanente, melhorando, dessa maneira, a QEE, de acordo com as especificações estabelecidas pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2018).

2 Sistema de Distribuição com Geração Fotovoltaica

Para este trabalho, foi modelado o sistema de distribuição de média tensão europeu proposto em Cigré (2014) com a presença de um GD, no caso, caracterizado por painéis fotovoltaicos, de acordo com a Figura 1. O sistema foi simulado e analisado via um simulador digital em tempo real (RTDS - *Real Time Digital Simulation*). No entanto, em virtude da capacidade de processamento do simulador, apenas o alimentador 1 do sistema foi modelado.

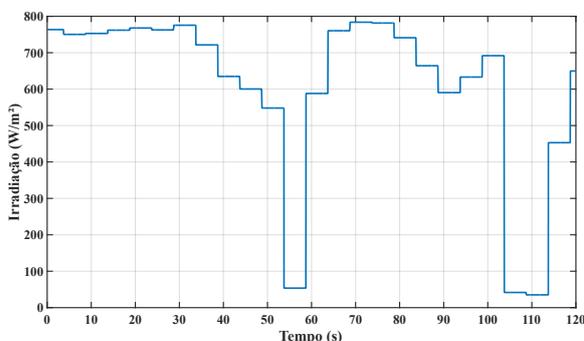
Figura 1. Sistema de Média Tensão Europeu, com a presença de geração fotovoltaica e um sistema de baterias.



A geração distribuída foi alocada na barra 8 do sistema, por ser uma barra central do sistema e estar conectada a um número maior de barras. O GD é caracterizado por um sistema fotovoltaico de 2MW, composto por módulos fotovoltaicos e um inversor de frequência, com emprego da técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), que busca sempre o ponto de máxima transferên-

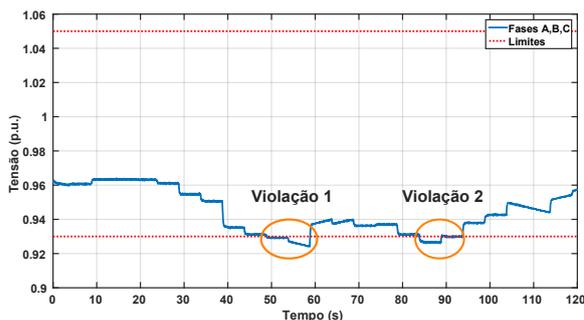
cia de potência do painel fotovoltaico para a rede, diante diferentes condições de irradiação e temperatura. Além disso, para acoplar o sistema fotovoltaico no sistema de distribuição, foi utilizado um transformador elevador. Para uma caracterização mais real do sistema, foi considerada a curva de irradiação para o painel fotovoltaico, ilustrada na Figura 2, baseada em Trindade et al. (2017).

Figura 2. Curva de irradiação.



Além disso, nas barras 8 e 9 foram inseridas curvas de consumo para as cargas locais. Devido ao limite de processamento do RTDS, somente essas barras receberam curvas de carga, enquanto que nas demais barras as cargas são constantes. Após essa modelagem, foi verificado, por meio da Figura 3, que em dois momentos o limite de tensão em regime permanente na barra 8 foi violado, devido à intermitência da geração e das cargas. Ademais, percebe-se que a tensão está variando, também devido à intermitência.

Figura 3. Perfil de tensão na barra 8.



Com o objetivo de mitigar os problemas que surgiram em virtude da inserção do GD e do comportamento das cargas, é proposto a utilização de baterias com a finalidade de suavizar a tensão na barra 8, além de adequar o nível de tensão em regime permanente, de acordo com os limites regulamentados. Para isso, a bateria foi alocada na mesma barra que o GD, e foi gerada uma curva de carga otimizada para a bateria, por meio do método de otimização ACO.

3 Algoritmo ACO

O algoritmo ACO é uma meta-heurística baseada em comportamentos encontrados na natureza para solução de problemas de otimização combinatorial (Dorigo and Blum, 2005). A inspiração para esse método consiste na observação comportamental de formigas, que quando procuram por alimento, inicialmente, exploram a área ao redor do formigueiro de maneira aleatória. Então, ao encontrar uma fonte de comida, a formiga avalia a quantidade e a qualidade do suprimento e retorna para o formigueiro. Durante o retorno, a formiga deixa uma substância, denominada feromônio, ao longo do caminho.

Ainda de acordo com Dorigo and Blum (2005), a quantidade de feromônio depositada depende das características do alimento, de modo que a trilha gerada irá guiar as outras formigas do grupo. Assim, uma outra formiga, ao sair em busca de alimento, influenciada pelo feromônio, tem a probabilidade de seguir o mesmo caminho. Então, com o passar do tempo, todas as formigas do grupo tenderão a buscar comida pelo mesmo caminho até que a fonte se esgote. Esse caminho tende a ser o mais curto.

O algoritmo ACO é apresentado na Figura 4, sendo que neste algoritmo: $max_i t$ representa o número máximo de iterações e também o critério de parada do algoritmo; N é o número de formigas; T_0 é a taxa de feromônio inicial dos caminhos; e $best$ é a melhor solução encontrada. A constante e indica a quantidade de arestas do grafo que representa o problema de otimização.

Figura 4. Algoritmo ACO.

Algoritmo 1 ACO (DORIGO; BLUM, 2005)

Entrada: $max_i t, N$ e T_0
Saída: $best$

início

- inicializa T_0
- inicializa $best$
- posiciona cada formiga em uma aresta selecionada aleatoriamente
- $t \leftarrow 1$
- enquanto $t < max_i t$ faça
 - para $i = 1$ até N faça
 - cria uma possível solução utilizando a regra de transição probabilística $(e - 1)$ vezes
 - fim
 - é calculado o custo de cada possível solução
 - se uma solução melhor for encontrada então
 - atualiza a melhor solução encontrada ($best$)
 - fim
 - atualiza as trilhas de feromônio
 - $t \leftarrow t + 1$
- fim

fim

retorna $best$

Vale ressaltar que este método de otimização não leva em conta possíveis restrições, então foi feita uma modificação com relação a este fato que será detalhado na próxima seção.

4 Metodologia Utilizada na Geração da Curva de Carga para a Bateria

Inicialmente, como citado na seção 2, foi verificado que o limite de tensão em regime permanente

foi extrapolado na barra 8, em virtude da intermitência da geração e das cargas. Além disso, percebe-se uma variação na tensão, que em determinados casos pode ser prejudicial para o sistema. Sendo assim, o primeiro passo para gerar a curva de carga da bateria foi verificar o momento em que ocorreu a extrapolação citada, e injetar uma determinada potência que mitigue esse problema.

No entanto, é necessário se atentar para o estado de carga (SOC – *State of Charge*) da bateria, que de acordo com Bastos (2013) é a quantidade de carga presente na bateria com relação à carga máxima. Ou seja, esse parâmetro informa quanta energia tem disponível na bateria. É importante, então, manter o SOC em um nível que seja possível a bateria atuar sempre que necessário. Dessa maneira, o objetivo da otimização é suavizar a tensão no barramento, porém, mantendo o estado de carga final da bateria no mesmo nível que o inicial, pois, desse modo, a bateria poderá ser usada em outra ocasião tanto para absorver, quanto para injetar potência ativa. Além disso, a curva de carga da bateria precisará manter os níveis de tensão dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST.

Assim, tendo em vista essas premissas, foi verificado que ocorreu violação de tensão em regime permanente em dois momentos, assim como verificado na Figura 3. Também foi constatado que uma potência de 0,7 MW injetada pela bateria no sistema, em cada um dos momentos citados, eleva os níveis de tensão, fazendo com que as violações sejam mitigadas. Além disso, o SOC da bateria foi ajustado, inicialmente, em 50%. Então, será necessário que a bateria absorva, a mesma potência que foi injetada, em outros dois momentos, de modo que, ao final da curva, o SOC da bateria se mantenha em 50%.

Deste modo, o problema a ser resolvido com o ACO é encontrar dois momentos em que a bateria deve absorver a mesma potência que foi injetada para adequar a tensão em regime permanente. Além disso, deve suavizar a tensão no barramento 8, encontrando a solução que apresenta o menor desvio padrão. Vale frisar que a solução encontrada não deve infringir os limites de tensão estabelecidos pela norma ao absorver a potência necessária.

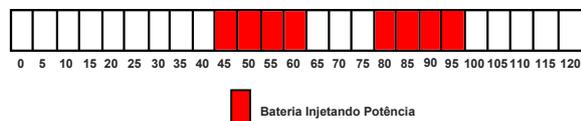
4.1 Construção das Possíveis Soluções

Como a resolução da curva de irradiação e das curvas de cargas são de 5 segundos, o perfil de tensão apresentado na Figura 3 foi seccionado em intervalos de 5 segundos. Cada um desses intervalos pode ser escolhido para a bateria absorver a potência necessária.

Assim, a combinação dos intervalos escolhidos serão os caminhos que as formigas irão trilhar. Cada formiga irá escolher uma quantidade de intervalos em que a bateria irá absorver potência do

sistema, equivalente a que foi injetada pela bateria para adequar os limites de tensão. A Figura 5 apresenta os intervalos do perfil de tensão analisados, e mostra os intervalos em que a bateria irá injetar potência para mitigar as violações.

Figura 5. Intervalos analisados para a geração da curva de carga.



Como pode ser observado, os intervalos em vermelho são aqueles em que a bateria está injetando potência, sendo que ao todo houve injeção de potência em 8 intervalos. Dentre os intervalos que sobraram, devem ser escolhidos 8 intervalos para a bateria absorver potência equivalente a que foi injetada. Ou seja, devem ser escolhidos oito intervalos para a bateria absorver 0,7 MW de potência em cada um deles.

Para facilitar as simulações, separou-se esses oito intervalos que devem ser escolhidos pelo ACO em dois grupos, e cada grupo com quatro intervalos. Para encontrar possíveis soluções, cada formiga deve escolher 2 grupos em que a bateria irá absorver potência, de modo que nenhum grupo se sobreponha ao outro. Isso garantirá que a mesma potência injetada seja posteriormente consumida, mantendo o SOC em 50%.

Além disso, é importante frisar que combinações de mesmo índice são consideradas iguais a nível de solução. Exemplificando, se uma formiga escolhe os grupos 1 e 2 para uma possível solução, a escolha 2 e 1 irá apresentar o mesmo efeito, sendo consideradas como uma mesma solução. Deste modo, existem 15 combinações de grupos possíveis que são apresentadas na Tabela 1.

4.2 Função Objetivo

A função objetivo deste problema consiste na função desvio padrão, apresentado na expressão (1). Foi escolhida essa função para avaliar o sistema, pois como está ocorrendo variação na tensão, a solução que apresentar o menor desvio padrão, irá, conseqüentemente, apresentar a solução com o perfil de tensão mais suavizado. Nesse caso, após cada possível solução ser escolhida pelas formigas, estas serão avaliadas de acordo com o desvio padrão que a tensão na barra 8 apresenta.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_A)^2}{n}} \quad (1)$$

O desvio padrão (σ) é a raiz quadrada da relação do somatório, desde a primeira posição ($i = 1$) até a última posição (n), do quadrado da média

Tabela 1. Combinações de intervalos possíveis.

Soluções possíveis	Combinação de Intervalos
1	1,2
2	1,3
3	1,4
4	1,5
5	2,4
6	2,5
7	3,4
8	3,5
9	3,6
10	4,6
11	4,7
12	4,8
13	5,6
14	5,7
15	5,8

aritmética dos dados (M_A) subtraída do valor na posição i do conjunto de dados (X_i), e da quantidade de dados (n).

4.3 Restrições

Como o algoritmo ACO não leva em conta restrições, não é possível desconsiderar uma possível solução que infrinja algum limite. No entanto, no caso deste problema, uma solução que apenas possua o menor desvio padrão não é suficiente. Logo, deve-se encontrar uma curva de carga para a bateria, que além de apresentar o menor desvio padrão, também possua todos os valores de tensão dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Limites para a tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tensão de atendimento	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$

Sendo assim, para este problema, todas as possíveis soluções serão avaliadas quanto ao nível de tensão, e se em alguma solução o limite de tensão for violado, essa solução será descartada, ainda que esta possua o menor desvio padrão. Dessa forma, a solução encontrada atenderá à função objetivo e às restrições citadas.

4.4 Modelagem do Problema

Para gerar a curva de carga da bateria que apresente a tensão na barra 8 mais suavizada, e que

não exceda nenhum limite estabelecido, cada formiga irá escolher dois grupos em que a bateria irá absorver o equivalente da potência anteriormente injetada no sistema, de modo a extinguir os afundamentos de tensão, mantendo o SOC em 50%. Então, a otimização tem por objetivo (2), em que $f(X)$ é o desvio padrão das soluções possíveis, definido em (1).

$$Fun = \min(\sigma) \quad (2)$$

Os intervalos que pertencem às soluções escolhidas receberão determinada quantidade de feromônio que depende da qualidade da solução e de quantas formigas caminharam por esses intervalos. A qualidade da solução dependerá do desvio padrão da mesma. Ou seja, como o objetivo das formigas é encontrar a solução com menor desvio padrão, os intervalos associados as soluções com valores menores para a função objetivo receberão uma taxa de feromônio maior. As expressões usadas para modelagem do problema são encontradas em Dorigo and Blum (2005).

Assim, após todas as formigas finalizarem suas rotas, as trilhas de feromônio devem ser atualizadas. Para isso, é utilizada a expressão (3) para tal atualização, de modo que, a taxa de feromônio no instante subsequente à escolha da formiga é igual à taxa no instante anterior multiplicada por um fator ρ , mais um incremento de feromônio.

$$\tau_i(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_i(t) + \frac{Q}{fo} \quad (3)$$

Nesta expressão, ρ representa a constante de evaporação do feromônio. Cada formiga que passa por um intervalo, deposita uma quantidade de feromônio, sendo representada pela parcela Q/fo , em que Q é uma constante definida pelo usuário e fo é o valor da função objetivo para aquela determinada solução. Assim, a formiga que apresentar a solução de melhor desempenho, ou menor valor da função objetivo, colocará a maior quantidade de feromônio em cada trilha.

Outro fator importante no algoritmo é a escolha dos intervalos. Para a primeira iteração, os dois intervalos são escolhidos de maneira randômica. Ao final da primeira iteração, as trilhas serão atualizadas com as taxas de deposição e de evaporação de feromônio. Então, nas próximas iterações, o primeiro intervalo sempre será escolhido de maneira aleatória. Porém, o segundo intervalo será definido de acordo com a expressão (4).

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_j \cdot H_j}{\sum_{r \in N_k} \tau_r \cdot H_r}, & \text{se } j \in N_k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

Onde $P_{ij}^k(t)$ representa a probabilidade da formiga k escolher o intervalo j como destino no instante t , estando situada no intervalo i . N_k representa o conjunto de todos os intervalos possíveis para escolha como destino. Por fim, H_j representa a heurística da probabilidade. Essa última variável é uma informação heurística que representa alguma característica do sistema que fará com que a formiga tenda a escolher determinado intervalo. No caso da curva de carga, cada intervalo possui um valor médio de tensão. Esse valor foi utilizado como heurística para auxiliar no direcionamento das rotas das formigas. Dessa forma, quanto maior o seu valor, mais a formiga será influenciada a escolher esse intervalo, pois essa tensão está mais longe de infringir o limite permitido ao absorver potência.

5 Resultados e Discussões

Após a modelagem do sistema no RTDS e da extração dos dados para a geração da curva de carga da bateria, foi implementado o algoritmo ACO em ambiente Matlab. Como citado na seção IV, existem 15 possibilidades de combinações de intervalos para a bateria absorver potência. Assim, existem 15 possíveis soluções que são apresentadas na Tabela 3. Essa tabela também mostra se em alguma solução houve ocorrência de violação dos limites de tensão em regime permanente.

Tabela 3. Combinações de intervalos possíveis.

Soluções	Desvio Padrão	Violação dos Limites de Tensão
1	0,0068	Não
2	0,0093	Não
3	0,0090	Não
4	0,0083	Sim
5	0,0099	Não
6	0,0096	Não
7	0,0110	Sim
8	0,0108	Sim
9	0,0081	Sim
10	0,0092	Não
11	0,0090	Não
12	0,0094	Não
13	0,0088	Não
14	0,0089	Não
15	0,0092	Não

Como pode ser verificado na Tabela 3, existem algumas soluções que apresentam infração dos limites de tensão. Então, essas soluções devem ser descartadas caso o algoritmo as encontre, e uma nova solução que não apresente tal problema deve

ser escolhida.

Ademais, a partir da Tabela 3 é possível perceber que a solução ótima para o problema é a solução 1, que apresentou o menor desvio padrão e não apresentou violação de tensão. Essa foi a resposta encontrada pelo ACO. Assim, é apresentada na Figura 6 a curva de carga otimizada da bateria. Já a Figura 7, é apresentada a tensão na barra 8 após a inserção da bateria com a curva de carga otimizada.

Figura 6. Curva de carga gerada com o ACO.

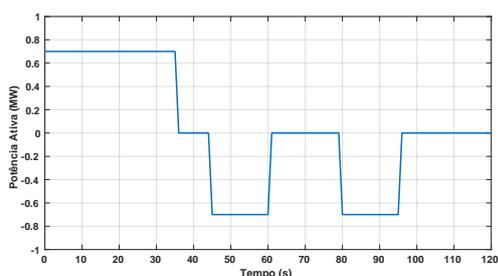
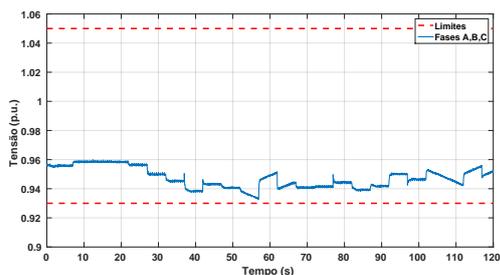


Figura 7. Tensão na barra 8 após a conexão do GD e da bateria com a curva de carga otimizada.



A partir da Figura 7 é possível observar uma tensão mais suavizada em relação à tensão da barra 8 observada na Figura 3. O perfil de tensão obtido com a curva de carga da bateria resultante da solução 1 encontrada pelo ACO, possui um desvio padrão de 0,0068, um valor 53,54% menor do que o desvio padrão inicial da curva.

Deste modo, verifica-se que o ACO mostrou um bom desempenho ao encontrar a curva de carga otimizada para a bateria. Assim, permitiu suavizar a tensão na barra 8, além de mitigar as infrações de tensão em regime permanente que haviam ocorrido e não permitir que outras violações dos limites de tensão ocorressem, em virtude da absorção de potência pela bateria.

6 Conclusões

A partir deste estudo, verificou-se que as baterias se mostram como uma ferramenta para melhorar a QEE de um sistema na presença de um GD. Foi desenvolvida uma curva de carga otimizada que suaviza a tensão na barra em que a bateria e o

GD estão alocados, além de adequar as tensões em regime permanente no barramento especificado.

Para gerar a curva de carga foi utilizado o algoritmo ACO, que apresentou uma boa resposta para esse problema. O método apresentou como solução ótima uma curva de carga que não violou nenhum limite de tensão e apresentou o menor desvio padrão, apresentando uma curva de tensão mais suavizada para a barra 8. Tal curva de carga possui um desvio padrão significativamente menor do que o desvio padrão da tensão na barra 8 antes da inserção da bateria. Ademais, devido ao fato do ACO não contemplar restrições, foi necessário fazer uma adequação para aplicar esse algoritmo no problema, e verificou-se que tal adequação se mostrou satisfatória.

É importante salientar que essa curva de carga foi gerada de maneira *offline*, extraíndo-se os dados do RTDS e modelando o problema em ambiente Matlab. No entanto, para trabalhos futuros, torna-se interessante desenvolver métodos de carga e descarga adaptativa da bateria, levando-se em consideração as premissas citadas durante o trabalho. Além disso, é interessante também verificar o dimensionamento ótimo da bateria no sistema estudado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pela infraestrutura proporcionada, assim como ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à Copel Geração e Transmissão S/A e à Copel Distribuição S/A, pelo suporte financeiro disponibilizado em partes distintas da realização desta pesquisa. A mesma está relacionada ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica Regulado pela ANEEL: PD- 2866-0454/2016 - Sistema de Armazenamento Transportável para Suporte a Contingências Programadas em SEs (EESC-USP, CPqD e COPEL).

Referências

- ANEEL (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica.
- Bastos, R. F. (2013). Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída, Universidade de São Paulo.
- Cigré, T. F. (2014). Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Dis-

tributed Energy Resources Task Force C
6.04, *Technical Report April*.

- Dorigo, M. and Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey, *Theoretical Computer Science* **344**(2-3): 243–278.
- Resch, M., Bühler, J., Klausen, M. and Sumper, A. (2017). Impact of operation strategies of large scale battery systems on distribution grid planning in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **74**(February): 1042–1063.
- Trindade, F. C. L., Ferreira, T. S. D., Lopes, M. G. and Freitas, W. (2017). Mitigation of Fast Voltage Variations During Cloud Transients in Distribution Systems With PV Solar Farms, **32**(2): 921–932.
- Zhang, C., Wei, Y. L., Cao, P. F. and Lin, M. C. (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **82**(November 2017): 3091–3106.
- Ziadi, Z., Taira, S., Oshiro, M. and Funabashi, T. (2014). Optimal power scheduling for smart grids considering controllable loads and high penetration of photovoltaic generation, *IEEE Transactions on Smart Grid* **5**(5): 2350–2359.