

Análise de Gerenciamento e Alocação de Baterias Considerando Custos e Profundidade de Descarga

Maria E. F. Octaviano, Eduardo M. Loureiro, Leandro R. Araujo, Débora R. R. P. Araujo

Abstract—With the growing demand for electricity and increase of renewable sources, new technologies are needed to maintain quality indicators. In this scenario, batteries stand out because their use can bring several advantages for the electrical systems, including voltage regulation and losses reduction, which shall be done in this work. The objective of the proposed method, besides battery allocation, is to define the impact which several batteries can bring into a system and what benefits can be obtained with their use. Besides that, a factor that couldn't be neglected is the depth of discharge because its consideration may affect some solutions making them unfeasible. To do this, this article proposes a method based on Genetic Algorithm considering costs.

Index Terms—Batteries, Lifespan, Distribution Systems, Optimization, Power Flow and Losses.

I. NOMENCLATURA

| | |
|------------------|---|
| Custo | Custo de Perdas de Energia Elétrica |
| Perdas | Perdas de Energia Elétrica |
| Dias | Número de Dias Simulado |
| $N_{bus,1}$ | Número de barras PQ e PV do sistema elétrico |
| $N_{bus,2}$ | Número de barras PQ do sistema elétrico |
| T | Último instante de tempo da curva de cargas |
| $\Delta P_{t,b}$ | Resíduo de potência ativa no tempo t e nó b |
| $\Delta Q_{t,b}$ | Resíduo de potência reativa no tempo t e nó b |
| $E_{f,t}$ | Energia armazenada na bateria no final do instante de tempo t |

| | |
|--------------|---|
| $E_{f,t-1}$ | Energia armazenada na bateria no final do instante de tempo t-1 |
| P | Potência da bateria nos processos de carga/descarga |
| t_d | Tempo de discretização |
| η_{ef} | Eficiência da bateria |
| P_{bat} | Potência que a bateria absorve ou fornece ao sistema |
| SOC_t | Estado de carga da bateria |
| $E_{nom,c}$ | Capacidade nominal da bateria |
| ΔSOC | Variação do estado de carga |
| V_b^t | Tensão convergida no nó b |

II. INTRODUÇÃO

COM o avanço tecnológico e a decorrente modernização dos sistemas de distribuição, novas tecnologias são capazes de auxiliar na manutenção de indicadores de qualidade. Dentre estas, destacam-se os sistemas de armazenamento de energia elétrica, BESS (do inglês: *Battery Energy Storage Systems*).

Devido à vasta aplicabilidade das baterias, os BESS têm sido fonte frequente de estudos. Sendo assim, objetivando demonstrar o estado da arte deste tema, alguns desses estudos serão mostrados resumidamente a seguir.

Em [1] é aplicado o algoritmo genético e programação linear inteira mista. Neste trabalho, é proposta uma otimização em duas camadas para maximizar os ganhos econômicos obtidos com a utilização de BESS.

No trabalho [2] observa-se a aplicação da bateria em sistemas com Geração Distribuída (GD). Neste artigo, os autores realizam um estudo das baterias a serem utilizadas bem como seus respectivos parâmetros para este propósito.

Ainda com a temática de estudo de diferentes tipos de bateria, em [3] é realizada uma análise que compara diferentes tecnologias de baterias e suas aplicações. Neste trabalho, são trazidos parâmetros como o custo e ciclo de vida.

This work was supported in part by the National Research Council, CNPq, CAPES and FAPEMIG.

Maria E. F. Octaviano, Federal University of Juiz de Fora, MG, Brazil (e-mail: elisa.octaviano@engenharia.ufjf.br).

Eduardo M. Loureiro, Federal University of Juiz de Fora, MG, Brazil (e-mail: eduardo.mendes@engenharia.ufjf.br).

L. R. Araujo is with the Department of Electrical Engineering, Federal University of Juiz de Fora, MG, Brazil (e-mail: leandro.araujo@ufjf.edu.br).

D. R. R. Penido is with the Department of Electrical Engineering, Federal University of Juiz de Fora, MG, Brazil (e-mail: debora.rosana@ufjf.edu.br).

Considerando o problema das perdas de energia elétrica, o artigo [4] realiza alocação de BESS utilizando duas estratégias: na primeira visando o custo das perdas e na segunda as perdas de potência ativa. Neste trabalho, são observadas as possíveis vantagens econômicas decorrentes da alocação de baterias.

Observando-se o emprego das baterias de lítio, promissoras devido à sua baixa autodescarga e elevada densidade de energia, o trabalho [5] busca modelar o custo de envelhecimento das células destas baterias através de um modelo semiempírico.

Em [6] é realizado um estudo que pode ser aplicado para baterias como *backups* de energia. Neste artigo, é utilizado o modelo da bateria como circuito elétrico para desenvolvimento de um método de cálculo do SOC (do inglês: *State of Charge*).

O trabalho [7] tem como objetivo a minimização de perdas de energia elétrica anuais através da alocação e do dimensionamento de BESS em um sistema com geração fotovoltaica. A otimização proposta utiliza o algoritmo genético como método de solução.

Por fim, em [8] é realizado o gerenciamento ótimo do consumo energético em uma indústria na qual há sistemas de armazenamento de energia e geração local. O método de solução utilizado é a programação inteira mista não linear.

Diante da análise dos trabalhos acima, pode-se afirmar que os BESS possuem vasta aplicabilidade. No entanto, mesmo que esta seja uma temática bastante atual, há possibilidade de melhoria nos trabalhos apresentados. Uma destas seria a preservação da vida útil das baterias utilizadas que, dentre diversos fatores, é afetada pela profundidade de descarga.

Desta forma, o presente trabalho mostra um método de alocação e gerenciamento de baterias objetivando minimizar as perdas de energia elétrica, considerando alguns parâmetros como, por exemplo, as descargas profundas, que podem ser prejudiciais para as baterias.

Nos resultados serão apresentadas algumas análises para demonstração da aplicabilidade do método. Isso será feito através de diferentes alocações de baterias para avaliação dos impactos que estas possuem sobre os sistemas elétricos. Ressalta-se que isto será feito considerando alguns parâmetros que, se negligenciados, podem levar à escolha de soluções que podem provocar danos nas baterias alocadas.

III. CONCEITOS BÁSICOS

A. OpenDSS

O OpenDSS é um *software* utilizado para realização de simulações em sistemas de distribuição. Dentre a sua vasta aplicabilidade, está a possibilidade de interfaceamento com o MATLAB.

Neste trabalho, o OpenDSS será utilizado como ferramenta de solução dos fluxos de potência, enquanto o MATLAB será uma ferramenta auxiliar na otimização.

B. Baterias

As baterias são equipamentos capazes de converter energia química em elétrica e podem ser utilizadas para realizar o

suprimento energético de um determinado sistema, ou seja, fornecendo e armazenando energia em momentos estratégicos.

Dentre os fatores que afetam a operação das baterias, pode-se citar o SOC, a autodescarga e a eficiência. O SOC é a quantidade de energia de uma bateria armazenada num determinado período em relação à sua capacidade nominal. Neste trabalho, devido ao perfil mostrado na Fig. 1, foram considerados aceitáveis valores de SOC entre 10% e 90%.

A consideração acima foi feita, uma vez que neste intervalo, o valor da tensão interna da bateria, V_{int} , apresenta um valor aproximadamente constante, o que representa uma baixa possibilidade de dano ao equipamento e consequente preservação de sua vida útil.

Ainda sobre a operação dos BESS, pode-se definir o fenômeno da autodescarga que se trata de um processo interno natural da bateria caracterizado pela perda de energia devido as reações químicas. Ressalta-se que este fenômeno pode ser acentuado por altas temperaturas.

Com relação ao circuito utilizado para modelagem da bateria, neste artigo será utilizado o modelo disponibilizado pelo OpenDSS mostrado na Fig. 2.

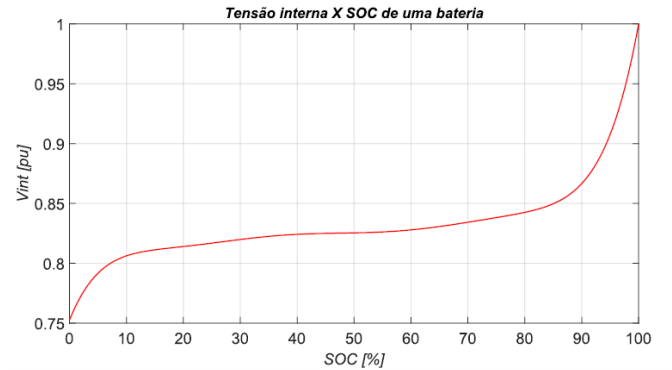


Fig. 1. Curva que relaciona o SOC e a tensão interna de uma bateria [9]

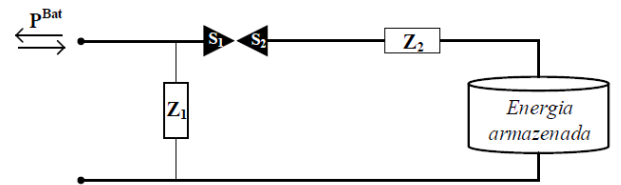


Fig. 2. Circuito do modelo de bateria disponibilizado pelo OpenDSS [10]

Para entender o funcionamento do circuito acima, deve-se compreender o fenômeno das perdas por eficiência que são caracterizadas pela impedância Z_2 . Desta forma, a potência que chega ao bloco “energia armazenada” no caso da carga, é menor do que P_{bat} , potência que o sistema entregou à bateria. De maneira análoga, as perdas por eficiência ocorrem na descarga.

Os elementos S_1 e S_2 representam a direção do fluxo de potência na bateria (carga/descarga) e a impedância Z_1 , as perdas por autodescarga, fenômeno descrito anteriormente.

Como o presente trabalho foi feito através da codificação do estado de carga da bateria, o modelo acima foi implementado em MATLAB interfaceado com o OpenDSS.

IV. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

As equações mostradas a seguir modelam o problema resolvido neste trabalho.

A. Formulação Matemática

$$\min \quad \text{Custo} * \text{Perdas} * \text{Dias} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_{bus,1}} \Delta P_{t,b} = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_{bus,2}} \Delta Q_{t,b} = 0 \quad (3)$$

$$E_{f,t} = \begin{cases} E_{f,t-1} + P_{t,d} \eta_{ef}, & P_{bat} \geq 0 \\ E_{f,t-1} + \left(\frac{P_{t,d}}{\eta_{ef}} \right), & P_{bat} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$SOC_t = \left(\frac{E_{f,t}}{E_{nom,c}} \right) 100\% \quad (5)$$

$$\Delta SOC \leq \Delta SOC_{max} \quad (6)$$

$$V_{min} \leq V_b^t \leq V_{max} \quad (7)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_{bat}^t \leq SOC_{max} \quad (8)$$

Em (1) é mostrada a função objetivo (Fob) do problema de otimização a ser solucionado. Pode-se perceber que a função é formulada com o propósito de minimização de custos. Neste trabalho, as simulações foram feitas considerando Dias = 365 e Custo = 552,22 R\$/MWh.

De acordo com (2) e (3), a solução deverá atender às restrições impostas pelo fluxo de potência. Sendo assim, é necessário que o somatório das potências ativa e reativa em cada nó seja igual a zero. Isso deve ocorrer para todos os instantes de tempo (1 a T).

Em (4) são apresentadas as perdas de energia elétrica decorrentes do processo de transformação químico-elétrico na bateria. Conforme pode ser percebido, estas perdas ocorrem tanto nos processos de carga quanto de descarga, nos quais se tem $P_{bat} \geq 0$ e $P_{bat} < 0$, respectivamente.

Em (5) é mostrada a expressão matemática do estado de carga. Ressalta-se que o SOC possui relação com a energia armazenada na bateria, previamente calculada em (4).

Em (6) é modelada a carga/descarga máxima permissível em cada intervalo de tempo. Sendo assim, as baterias evitam descargas profundas, que são prejudiciais à sua vida útil, conforme discutido em [11].

Como a alocação de baterias também pode ser feita com o intuito de regulagem de tensão, em (7) observa-se que as tensões em cada nó dos circuitos devem estar entre um valor mínimo e máximo. Neste trabalho, $V_{min} = 0.93$ p.u. e $V_{max} = 1.05$ p.u. Caso alguma tensão esteja fora desses limites, configura-se um problema de tensão.

Por fim, de acordo com os conceitos discutidos no capítulo anterior, o SOC também deve estar entre um valor mínimo e máximo, de acordo com [9]. Isso é enunciado em (8) e, neste trabalho, $SOC_{min} = 10\%$ e $SOC_{max} = 90\%$.

B. Algoritmo Genético

Conforme pode ser observado na seção anterior, o problema a ser solucionado neste artigo é não linear com variáveis contínuas e discretas.

Além disso, a formulação também se caracteriza pela presença de acoplamento temporal na medida em que são resolvidos fluxos de potência sequenciais em que a solução de um determinado estágio depende do anterior.

Devido a tudo isso, decidiu-se utilizar o Algoritmo Genético (AG) para solucionar o problema.

Uma das premissas importantes para execução do AG é a definição do cromossomo. A Fig. 3 mostra como foi feita a codificação neste trabalho e, para exemplificar, é mostrada a alocação de três baterias monofásicas independentes (uma por fase) numa mesma barra de alocação.

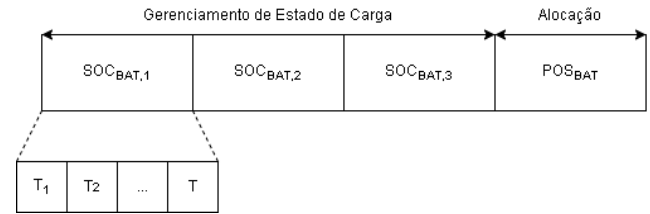


Fig. 3. Representação do Cromossomo Utilizado

Diante da representação acima, pode-se perceber que os primeiros genes dizem respeito aos estados de carga das baterias. Este valor é especificado para T instantes de tempo. Neste trabalho, $T = 24$. O gene POS_{BAT} refere-se à posição na qual as baterias serão alocadas.

Conforme pode ser observado na Fig. 4, o AG irá trabalhar os cromossomos formados com o padrão acima em diversas etapas. Algumas delas serão destacadas a seguir, bem como suas respectivas taxas.

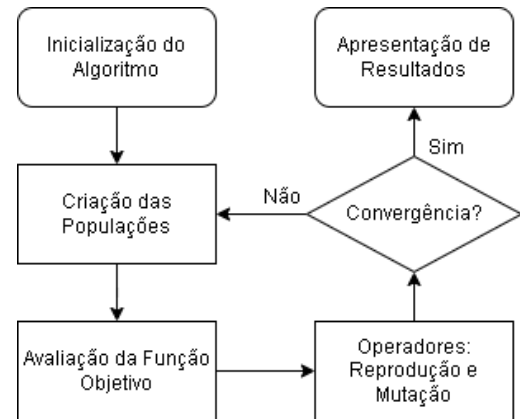


Fig. 4. Representação do Cromossomo Utilizado

Na inicialização do algoritmo, é definida a quantidade de baterias no sistema bem como seus respectivos parâmetros nominais para que, em seguida, sejam formados os cromossomos de cada indivíduo de acordo com o padrão já

estabelecido.

Após isso, um conjunto de indivíduos forma uma determinada população. Neste trabalho, o tamanho da população configurada foi de 300 indivíduos.

Em seguida, como pode ser observado, os indivíduos são avaliados através da função objetivo. Desta forma, aqueles que possuem melhores aptidões terão uma maior chance de se reproduzir. Neste trabalho, o operador *crossover*, que representa este fenômeno, foi de 80%.

Outro parâmetro importante que deve ser modelado, é a mutação, sendo este responsável pela inserção de novos indivíduos as atuais populações. Neste trabalho, utilizou-se a função gaussiana *default* do MATLAB associada a uma taxa de 10%. Em [12] há outras informações a respeito das taxas do AG utilizado.

Após as etapas prévias, é avaliada a convergência do método. Caso o critério seja verificado, o algoritmo apresenta os resultados. Se não, forma-se outra população de acordo com os parâmetros obtidos na iteração e o processo continua. Neste trabalho, o critério de convergência utilizado foi o tempo computacional de 2 horas para cada alocação.

V. RESULTADOS

O método acima descrito foi implementado computacionalmente, conforme enunciado. Os resultados mostrados a seguir referem-se ao sistema IEEE 123 Barras.

Devido à característica inerente de variação de cargas no sistema de distribuição, considerou-se uma curva de variação diária mostra na Fig. 5.

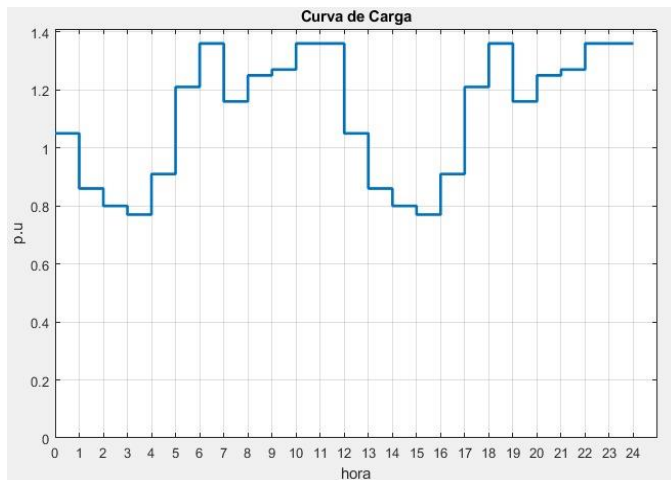


Fig. 5. Curva de Cargas Utilizadas nas Simulações

A. Sistema IEEE 123 Barras

Esta seção traz os resultados obtidos através da utilização do IEEE 123 Barras [13] conforme mostrado na Fig. 6. Este sistema pode ser caracterizado pela presença de capacitores e pelo perfil de elevadas quedas de tensão compensadas por reguladores.

Para este sistema foram realizadas as alocações dispostas na Tabela I, que serão comentadas posteriormente. Conforme pode ser observado, foram alocadas diferentes quantidades de baterias para que pudessem ser observados os benefícios

decorrentes da utilização destes equipamentos nos sistemas elétricos.

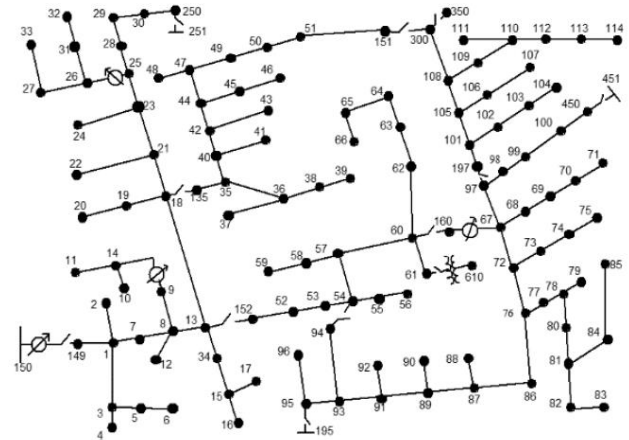


Fig. 6. Sistema IEEE 123 Barras [13]

TABELA I
RESULTADOS OBTIDOS PARA O IEEE 123 BARRAS

| Caso | Perdas Sistema (kWh) | Perdas BESS (kWh) | | | | | | Problemas de tensão |
|------|----------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| | | BESS 1 | BESS 2 | BESS 3 | BESS 4 | BESS 5 | BESS 6 | |
| A | 2968.18 | 50.18 | - | - | - | - | - | 16 |
| B | 2966.83 | 46.95 | 47.65 | - | - | - | - | 18 |
| C | 2966.61 | 64.7 | 51.1 | 50.44 | - | - | - | 5 |
| D | 2957.09 | 51.28 | 48.74 | 50.15 | 49.52 | - | - | 6 |
| E | 2955.20 | 51.84 | 53.65 | 51.05 | 47.26 | 50.99 | - | 0 |
| F | 2945.43 | 61.41 | 47.45 | 49.98 | 57.03 | 42.28 | 56.07 | 0 |

Diante da observação da Tabela I, pode-se perceber que, no caso A, é feita a alocação de uma bateria monofásica no sistema. Essa alocação é feita na barra 197 e há melhorias tanto no quesito perdas de energia elétrica quanto na regulação de tensão. O perfil da solução obtida é mostrado na Fig. 7 e pode-se perceber que a bateria se comportou conforme esperado: fornecendo energia nos momentos de carga pesada e absorvendo na carga leve.

Já a observação do caso B, nos permite concluir que a alocação de mais baterias, embora mais onerosa financeiramente permite uma maior redução de perdas de energia elétrica no sistema. Entretanto esta alocação não foi tão benéfica para as tensões quanto a do caso A.

Analisando os resultados obtidos no caso C, percebe-se uma pequena queda nas perdas de energia do sistema em relação ao caso B. No entanto, ressalta-se que esta redução pode ser significativa no horizonte de um ano. Observa-se também uma melhoria significativa nas tensões do sistema.

A comparação com o caso D mostra que houve uma redução significativa nas perdas de energia elétrica em relação a C. Já em relação as tensões, não há melhoria considerável na comparação entre os casos.

Na alocação proposta no caso E, o sistema atinge a regulação de tensão para todos os patamares de carga do

sistema. Isso ocorre juntamente com uma redução significativa no valor das perdas de energia do sistema.

Por fim, no caso F, atinge-se o melhor desempenho possível nas perdas de energia elétrica do sistema, bem como nas tensões. Isso mostra que a alta penetração de baterias, isto é, a alocação de baterias em diferentes barras do sistema, traz resultados melhores para as restrições de tensão.

Além disso, o perfil desta solução, mostrado na Fig. 8 permite observar que, embora haja a alocação de muitas baterias, estas também se comportam conforme esperado, ou seja, de modo a realizar o suprimento energético do sistema.

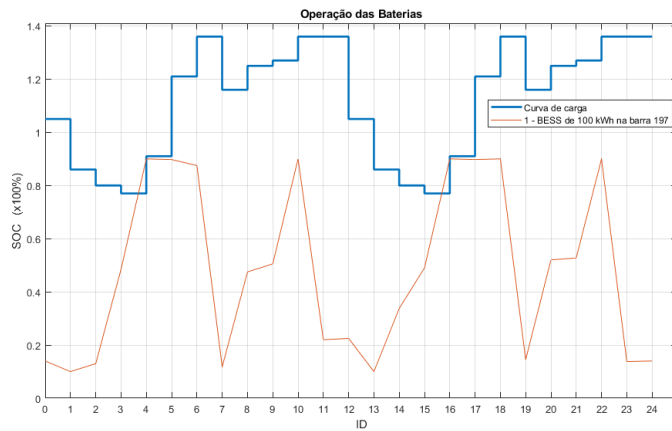


Fig. 7. Curva de Carga e SOC do BESS alocado no Caso A

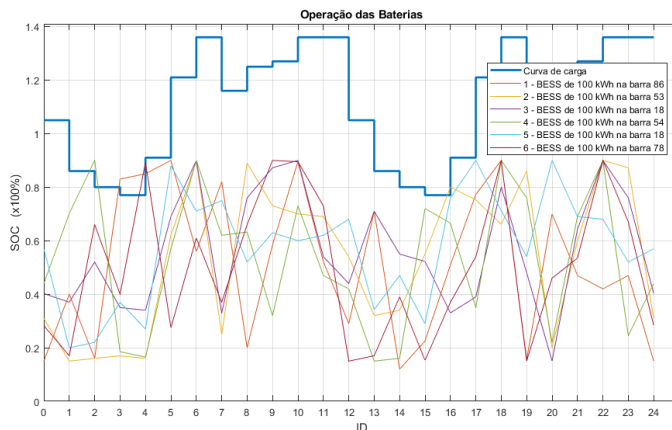


Fig. 8. Curva de Carga e SOC dos BESS alocados no Caso F

VI. CONCLUSÕES

Diante dos resultados dispostos acima, percebe-se que a realização de uma análise dos impactos da alocação de baterias é importante, já que se pode realizar a observação de diversos benefícios que estes equipamentos podem trazer para os sistemas elétricos.

Sendo assim, neste trabalho, foram realizadas diversas alocações de baterias considerando descargas profundas que, se realizadas, reduzem a vida útil das baterias. Desta forma, a não consideração desse parâmetro pode levar o algoritmo a soluções ineficazes.

Observa-se também a inserção de uma curva de cargas no sistema IEEE 123 Barras que permite a realização de uma análise mais realista da operação das baterias, a qual, por sua vez, ocorreu como esperado. Sendo assim, estas forneceram

energia nos momentos de carga mais alta e absorveram nos momentos de carga leve.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode ser realizada a inclusão do efeito da temperatura nas baterias, bem como a realização da otimização de outras variáveis como, por exemplo, a capacidade nominal dos BESS. Além disso, podem ser avaliados outros métodos de otimização na resolução do presente problema.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, CNPq, CAPES e INERGE pelo incentivo.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] D. Wu, Q. Gui, W. Zhao, J. Wang, S. Shi and Y. Zhou, "Battery Energy Storage System (BESS) Sizing Analysis of Bess-Assisted Fast-Charge Station Based on Double-Layer optimization Method," *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, 2020, pp. 658-662.
- [2] S. Sano, Y. Ito, Y. Hirose, H. Takeuchi and S. Aone, "Development of long cycle life valve-regulated lead-acid battery for large-scale battery energy storage system to utilize renewable energy," *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2015, pp. 1-6.
- [3] X. Hu, C. Zou, C. Zhang and Y. Li, "Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 20-31, Sept.-Oct. 2017.
- [4] J. V. de Souza, W. R. Faria, F. M. dos S. Monteiro, R. B. Otto, M. Biczkowski and E. N. Asada, "Battery Energy Storage System Allocation in Distribution Systems for Power Loss and Operational Costs Reduction," *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 2019, pp. 1-6.
- [5] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson and D. S. Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1131-1140, March 2018.
- [6] M. I. Wahyuddin, P. S. Priambodo and H. Sudibyo, "State of Charge (SoC) Analysis and Modeling Battery Discharging Parameters," *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1-5.
- [7] P. Saini and L. Gidwani, "Optimal siting and sizing of battery in varying PV generation by utilizing genetic algorithm in distribution system," *2020 21st National Power Systems Conference (NPSC)*, 2020, pp. 1-6.
- [8] M. Choobineh and S. Mohagheghi, "Optimal energy management in an industrial plant using on-site generation and demand scheduling," *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2015, pp. 1-8.
- [9] T. T. de Oliveira, "Método para Alocação e Operação Ótima de Baterias em Sistemas de Distribuição com Restrições de Tensão e Redução das Perdas," *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora*, 2018.
- [10] T. T. de Oliveira, M. E. F. Octaviano, A. S. C. Martins, V. T. S. Rodrigues, M. W. Barbosa, L. R. Araujo, D. R. R. P. Araujo, "Redução de Perdas em Sistemas de Distribuição Empregando Baterias" *INDUSCON 2018 – 13th IEEE/IAS International Conference*, 2018, pp. 789-794.
- [11] A. R. Camargo, "Alocação e operação ótima de dispositivos de armazenamento de energia em sistemas de distribuição considerando a preservação da vida útil das baterias," *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas*, 2016.
- [12] O. Tahvonen, S. Niinimäki, "On the economics of optimal timber production in boreal Scots pine stands," in *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 43, no. 8, pp. 719-730, August 2013.
- [13] "Distribution Test Feeders - Distribution Test Feeder Working Group - IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee." [Online]. Available: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. [Accessed: 08-August-2022].

IX. BIOGRAFIAS



Maria Elisa Fernandes Octaviano possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2018), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2021) e cursa doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, desde 2021. Atualmente atua como Bolsista de Doutorado da CAPES no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.



Eduardo Mendes Loureiro está cursando graduação em Engenharia Elétrica com habilitação em Sistemas de Energia pela Universidade Federal de Juiz de Fora, desde 2020. Atualmente atua como Bolsista de Iniciação Científica do BIC Universidade Federal de Juiz de Fora, desde 2021.



Leandro Ramos de Araujo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE (2005). Desde 2009 é professor do Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, sendo professor associado.



Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2002), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2004) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE (2010). Desde 2009 é professora do Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, sendo professora associada.