

Operação Ótima de uma Microrrede em um Campus Universitário

Jéssica Alice A. Silva* Luiza Higino S. Santos* Rodolfo Quadros**
Juan Camilo López* Marcos J. Rider* Luiz C. P. da Silva*

* Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC),
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), SP, (e-mail:
j262748@dac.unicamp.br).

** Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato
Grosso (UFMT), MT

Abstract: The paper proposes a methodology that combines the OpenDSS simulator with a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model to determine the optimal microgrid operation at a University Campus. The microgrid is a distributed energy system integrating generation sources, energy storage, and loads. The proposed model considers the control of the Battery Energy Storage System (BESS) and demands balancing as variables. The objective of the MILP is to optimize the microgrid operation by minimizing operational costs, maximizing the utilization of renewable energy, and ensuring the quality of energy supply. The proposed model is applied using data from the CampusGRID microgrid being implemented at UNICAMP in Campinas - SP, Brazil. The results demonstrate its effectiveness in achieving optimal microgrid operation, contributing to decision-making and efficient planning of distributed energy systems.

Resumo: O artigo propõe uma metodologia que combina o simulador OpenDSS com um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para determinar a operação ideal de uma microrrede em um Campus Universitário. A microrrede é um sistema de energia distribuída que integra fontes de geração, armazenamento e carga. O modelo proposto considera como variáveis o controle do sistema de armazenamento de energia (BESS - *Battery Energy Storage System*) e o balanceamento da demanda. O objetivo do PLIM é otimizar a operação da microrrede, minimizando os custos operacionais, maximizando a utilização de energia renovável e garantindo a qualidade do fornecimento de energia. O modelo proposto é aplicado considerando dados da microrrede CampusGRID que está sendo implantada na UNICAMP, em Campinas - SP. Os resultados demonstram sua eficácia na obtenção de uma operação ótima da microrrede, contribuindo para a tomada de decisões e o planejamento eficiente de sistemas de energia distribuída.

Keywords: Battery Energy Storage Systems; Distributed Generation; Microgrids; Mixed Integer Linear Programming.

Palavras-chaves: Geração Distribuída, Microrredes; Programação Linear Inteira Mista; Sistema de Armazenamento de Energia.

NOMENCLATURA

Parâmetros

α^{B+}	Custo de recarga do sistema de armazenamento de energia (BESS) [R\$/kW]
α^{PAC}	Custo de compra de energia da rede [R\$/kW]
Δt	Duração de cada intervalo de tempo [h]
$E^{B,t-1}$	Energia do BESS no instante de tempo anterior [kWh]
\bar{E}^B	Energia máxima do BESS [kWh]
\underline{E}^B	Energia mínima do BESS [kWh]
\bar{P}^{B+}	Potência máxima de carga do BESS [kW]
\bar{P}^{B-}	Potência máxima de descarga do BESS [kW]
\underline{P}^{B+}	Potência mínima de carga do BESS [kW]
\underline{P}^{B-}	Potência mínima de descarga do BESS [kW]
\bar{P}^D	Demanda de potência ativa [kW]
P^{FV}	Geração fotovoltaica [kW]

Variáveis Contínuas

E^B	Energia no BESS [kWh]
P^{B+}	Potência de carga do BESS [kW]
P^{B-}	Potência de descarga do BESS [kW]
P^{PAC}	Potência no ponto de acoplamento comum (PAC) [kW]
P^{PAC-}	Potência negativa no PAC [kW]
P^{PAC+}	Potência positiva no PAC [kW]
P^{PAC+}	Potência positiva no PAC [kW]

Variáveis Binárias

b^{B+}	Representa a carga do BESS [-]
b^{B-}	Representa a descarga do BESS [-]

1. INTRODUÇÃO

As microrredes têm ganhado destaque como soluções eficientes e inovadoras para atender às necessidades energéticas em diversos setores. Elas integram fontes de gera-

ção, como energia solar, eólica, biomassa, e sistemas de armazenamento de energia (BESS - *Battery Energy Storage Systems*), em conjunto com cargas locais, permitindo uma transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável (Ton and Smith, 2012). No entanto, otimizar a operação de microrredes é um desafio que requer a coordenação eficiente de diferentes recursos distribuídos de energia (REDS).

O sistema de gerenciamento de energia (EMS - *Energy Management System*) desempenha um papel fundamental no controle e monitoramento do consumo e distribuição de energia em um sistema, visando à redução de custos e ao aprimoramento da eficiência energética (Zia et al., 2018; Silva et al., 2021). Um EMS pode ser implementado de forma centralizada, distribuída ou hierárquica (Elmouatamid et al., 2021). A operação ideal da microrrede, por meio do EMS, exige a resolução de um problema de otimização (Mischos et al., 2023). Nesse problema, é essencial minimizar os custos operacionais ao longo do horizonte de tempo. A solução desse problema define as operações dos recursos distribuídos, os despachos de geradores distribuídos despacháveis durante operações isoladas e o controle das cargas, priorizando as cargas classificadas como críticas.

Diferentes métodos têm sido propostos para o problema de gerenciamento energético de microrredes, combinando ferramentas de otimização com abordagens clássicas de operação de sistemas de distribuição, como o simulador OpenDSS (Dugan and Montenegro, 2018). Em um estudo recente conduzido por Gangwar et al. (2022), foi apresentada uma abordagem para o gerenciamento de energia em uma rede de distribuição desequilibrada. Essa abordagem utiliza uma combinação do simulador OpenDSS em conjunto com a plataforma MATLAB, proporcionando uma solução abrangente e eficaz para o problema em questão. Da mesma forma, o OpenDSS também foi utilizado em conjunto com MATLAB em outro estudo (Prabpal et al., 2021), visando determinar o dimensionamento e a localização ótima de um BESS. O dimensionamento ótimo do BESS foi obtido por meio de técnicas de otimização, como algoritmo genético e otimização por enxame de partículas. Em um contexto semelhante, o OpenDSS foi utilizado para o projeto de sistemas de distribuição, em conjunto com o MATLAB, para deslocamento de demanda e otimização da operação do sistema (Nonzol et al., 2023).

Outras abordagens propõem o uso de programação quadrática via MATLAB e OpenDSS para definir o despacho econômico de uma microrrede (Satya and Bhanu, 2022), ou a aplicação de técnicas de aprendizado por reforço profundo em conjunto com o simulador OpenDSS para dimensionamento e operação de microrredes (Huang et al., 2022). Além disso, o software PSCAD também é utilizado em conjunto com modelos de otimização, conforme proposto por Bassey et al. (2021), onde duas formulações lineares de fluxo de potência foram desenvolvidas para microrredes isoladas controladas por droop.

Nesse contexto, este artigo apresenta uma metodologia que integra o OpenDSS com um modelo de programação linear inteiro misto (PLIM) com o objetivo de definir a operação ótima de uma microrrede em um Campus Universitário. O foco principal é a maximização da utilização de energia renovável, a minimização de custos e a garantia da qua-

lidade no fornecimento energético. O cálculo do fluxo de carga é realizado no OpenDSS, e os resultados são enviados ao PLIM para determinar o despacho ideal do BESS em cada instante. Posteriormente, esse despacho é utilizado como entrada para uma nova simulação de fluxo de carga no OpenDSS, e esse processo é repetido de forma contínua até o último período de tempo. Os testes são realizados utilizando dados da microrrede CampusGRID, que está sendo implantada na UNICAMP. É válido ressaltar que a abordagem proposta detém flexibilidade, permitindo sua aplicação em diversos EMS voltados para microrredes. Um dos pontos centrais consiste na ênfase dada à exploração dos recursos energéticos renováveis locais, considerando suas vantagens quanto aos baixos custos operacionais e à maior eficiência inerente.

2. METODOLOGIA

2.1 Formulação do Problema

O sistema de gerenciamento energético para microrredes pode ser definido como um PLIM, conforme expresso em (1)–(10). A função objetivo (1) tem como objetivo minimizar o custo de operação da microrrede, levando em consideração o custo de aquisição de energia da rede principal e um custo de recarga do BESS. O custo de recarga do BESS é determinado visando otimizar a utilização da geração fotovoltaica (FV), reduzindo a dependência da energia proveniente da rede elétrica para esse propósito. Assim, α^{B+} será igual a R\$0,20/kWh quando a demanda for maior que a geração FV. Caso contrário, α^{B+} será igual a -R\$0,20/kWh, caso a demanda seja menor ou igual a geração FV.

$$\min \Delta t \{ (\alpha^{PAC} \cdot P^{PAC+}) + (\alpha^{B+} \cdot P^{B+}) \} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$P^{PAC} + P^{FV} + P^{B-} - P^{B+} = P^D \quad (2)$$

$$P^{PAC+} - P^{PAC-} = P^{PAC} \quad (3)$$

$$\underline{P}^{B+} \cdot b^{B+} \leq P^{B+} \leq \overline{P}^{B+} \cdot b^{B+} \quad (4)$$

$$\underline{P}^{B-} \cdot b^{B-} \leq P^{B-} \leq \overline{P}^{B-} \cdot b^{B-} \quad (5)$$

$$P^{B-} \leq P^D \quad (6)$$

$$E^B = E^{B,t-1} + (P_t^{B+} - P_t^{B-}) \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\underline{E}^B \leq E^B \leq \overline{E}^B \quad (8)$$

$$b^{B+} + b^{B-} \leq 1 \quad (9)$$

$$b^{B+}, b^{B-} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

A restrição (2) realiza o balanço de potência do sistema, considerando a demanda, a geração FV, as potências de carga e descarga do BESS, bem como a potência no ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede principal. A restrição (3) separa a potência do PAC em duas variáveis contínuas positivas, que determinam se o fluxo de potência no PAC é positivo (P^{PAC+}) ou negativo (P^{PAC-}). Isso é realizado para garantir que a função objetivo não incorpore valores de fluxo de potência negativos no PAC.

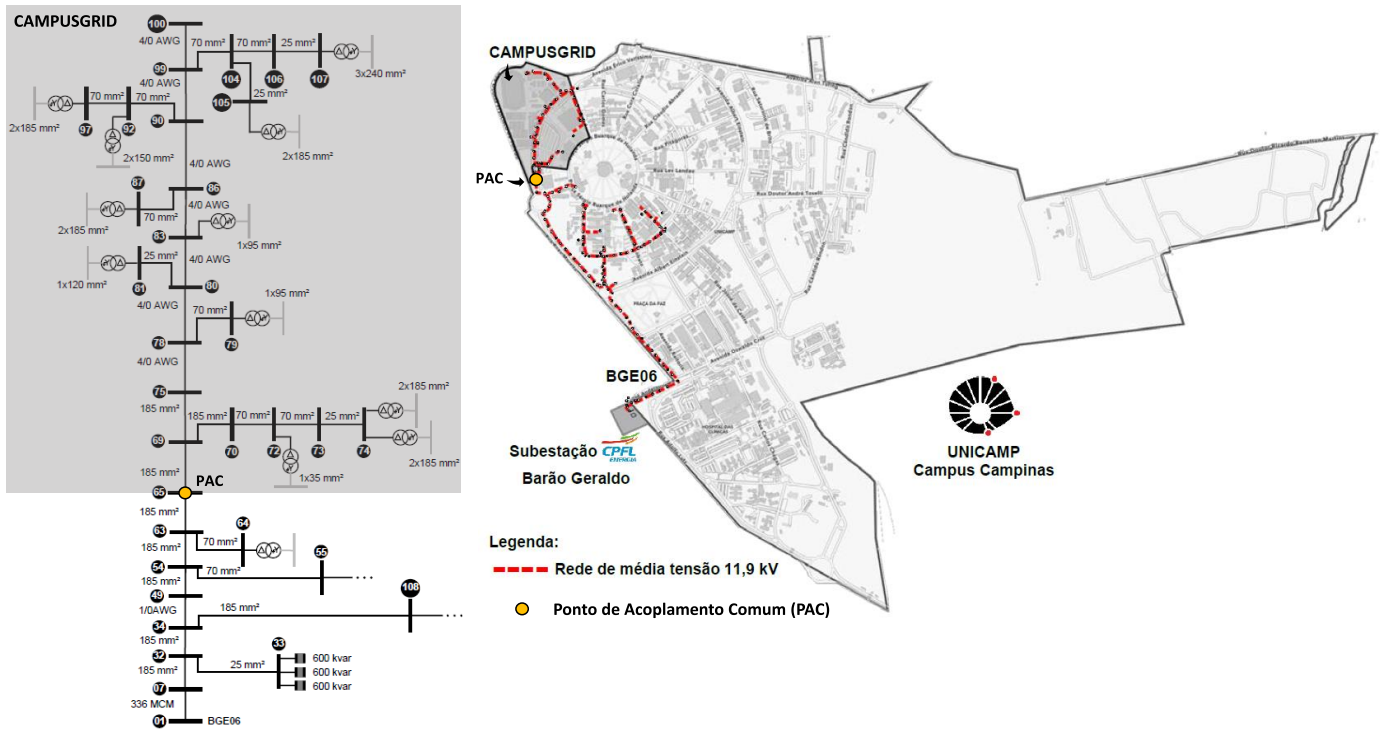


Figura 1. Localização de implantação e diagrama da microrrede CampusGRID no campus da UNICAMP. Adaptado de Quadros (2023).

As restrições (4)–(10) modelam a operação do BESS. Os limites máximos e mínimos de potência de carga e descarga do BESS são definidos pelas restrições (4) e (5), respectivamente. A restrição (6) previne que parte da energia do BESS seja injetada na rede sem nenhum benefício econômico, indicando que a potência máxima de descarga do BESS deve estar atrelada à demanda da microrrede. A equação (7) define a energia do BESS em função da energia no instante de tempo anterior ($E^{B,t-1}$). Para que a energia do BESS não ultrapasse seus limites máximos e mínimos a restrição (8) é estabelecida. Por outro lado, a restrição (9) garante que o BESS não carregue e descarregue ao mesmo tempo e (10) define as variáveis binárias de decisão do problema.

2.2 Integração entre OpenDSS e modelo de otimização PLIM

Neste estudo, o OpenDSS desempenha o papel de uma ferramenta de simulação que fornece dados e insights sobre o comportamento do sistema elétrico da microrrede. Esses insights são então usados como entrada para o modelo de otimização do PLIM, conforme detalhado na Seção 2.1.

A integração entre o OpenDSS e o PLIM é realizada por meio das bibliotecas *DSS-Python* e *OpenDSSDirect*, usando a linguagem de programação *Python* (Python Software Foundation, 2023). O PLIM é implementado utilizando o pacote de programação matemática *PuLP* (Mitchell et al., 2009) em *Python*, e a otimização é conduzida pelo solver livre CBC (COIN-OR, 2016). Nesse cenário, a simulação de fluxo de carga é executada no OpenDSS, diretamente a partir de *Python* a cada minuto, enquanto determinados parâmetros são transmitidos ao PLIM para otimizar a operação do BESS. Posteriormente, esse despacho otimizado é empregado como entrada para uma nova

simulação de fluxo de carga no OpenDSS no instante de tempo $t+1$. Esse ciclo se repete para períodos subsequentes até o último período de tempo.

3. TESTES E RESULTADOS

3.1 Microrrede CampusGRID

A formulação para o problema gerenciamento energético de microrredes apresentado anteriormente, é validado utilizando dados de uma microrrede real, chamada CampusGRID, que está sendo desenvolvida sob o âmbito do Projeto MERGE - *Microgrids for Efficient, Reliable and Greener Energy* (López et al., 2020; Quadros et al., 2021), na UNICAMP, em Campinas - São Paulo. A Figura 1 apresenta toda a área da UNICAMP em cinza claro e a região delimitada para implantação da microrrede CampusGRID em cinza mais escuro, assim como também o diagrama de barras da microrrede ao lado esquerdo.

As cargas que integram a microrrede CampusGRID são compostas pelos prédios da Faculdade de Educação Física, Ginásio Multidisciplinar, Biblioteca de Obras Raras, Biblioteca Central e iluminação pública. Essas cargas em conjunto demandam uma potência que varia de 475 kW a 768 kW. Além disso, a CampusGRID irá possuir um BESS com capacidade aproximada de 500 kW/810 kWh, um gerador a gás natural de 150 kW e uma capacidade total instalada de geração FV de 736 kWp (Silva et al., 2023). No presente estudo, o gerador a gás natural foi desconsiderado, uma vez que estudos anteriores já inviabilizaram seu uso, por questões de grandes custos operacionais, na operação conectada à rede.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros iniciais utilizados para resolver o modelo PLIM.

Tabela 1. Parâmetros iniciais do modelo PLIM

Δt [h]	1	\overline{E}^B [kWh]	810
$\overline{P}^{B+}/\overline{P}^{B-}$ [kW]	0	\overline{E}^B [kWh]	162
$\overline{P}^{B+}/\overline{P}^{B-}$ [kW]	500	\overline{E}^B [kWh]	810
α^{PAC} fora ponta	R\$8,23/kW	α^{PAC} ponta	R\$17,16/kW

Quatro casos de estudo foram avaliados, variando o estado de carga (SoC - *State of Charge*) do BESS e a disponibilidade de geração FV, conforme descrito abaixo:

- Caso I - BESS com SoC inicial de 100% e geração FV disponível
- Caso II - BESS com SoC inicial de 20% e geração FV disponível
- Caso III - BESS com SoC inicial de 100% e geração FV indisponível
- Caso IV - BESS com SoC inicial de 20% e geração FV indisponível

Para avaliação destes casos de estudo, a cada instante de simulação eram enviados ao modelo de otimização os dados da demanda atual da microrrede (demanda + perdas), a geração FV e a energia do BESS provenientes da simulação no OpenDSS.

3.2 Resultados

A Figura 2 apresenta as curvas de potência de carga e descarga do BESS, enquanto a Figura 3 apresenta a energia armazenada no BESS, para todos os casos de estudo. No Caso I (Figura 2a e 3a), pode-se observar que o BESS é descarregado inicialmente, passa por um processo de recarga durante a manhã e, posteriormente, é descarregado novamente durante o período de pico de demanda. De maneira análoga, no Caso II (Figura 2b e 3b), o BESS realiza a recarga ao longo da manhã aproveitando a geração FV. No entanto, a descarga do BESS ocorre exclusivamente durante o horário de pico.

O caso III (Figura 2c e 3c) corresponde a um SoC de 100%, porém com a geração FV indisponível. Nesse cenário, é perceptível que o BESS realiza descarga nas primeiras horas de operação, enquanto a recarga não ocorre. Esse comportamento é resultado da ausência de geração FV e dos custos associados à recarga do BESS. Por outro lado, no caso IV (Figura 2d e 3d), em que o SoC inicial é de 20% e a geração FV também está indisponível, o BESS não é ativado, justamente pelos mesmos motivos mencionados anteriormente.

A Figura 4 apresenta as potências no PAC, a geração FV, a demanda e a potência no BESS. A operação da microrrede para os casos I e II é semelhante, conforme mostra as Figuras 4a e 4b. A diferença ocorre apenas no início da operação, onde o BESS descarrega no Caso I. Além disso, para ambos os casos I e II, após o BESS atingir o SoC máximo próximo às 9:00 horas, a microrrede começa a exportar o excedente de energia até próximo das 16:00 horas, momento este onde o BESS começa a descarga até o SoC mínimo de 20%, auxiliando na redução de custos de operação.

Por outro lado, como pode ser verificado na Figura 4c após o BESS atingir o SoC mínimo de 20% toda a demanda é suprida pela rede até o final da operação, indicando que se não houver geração fotovoltaica a melhor opção para

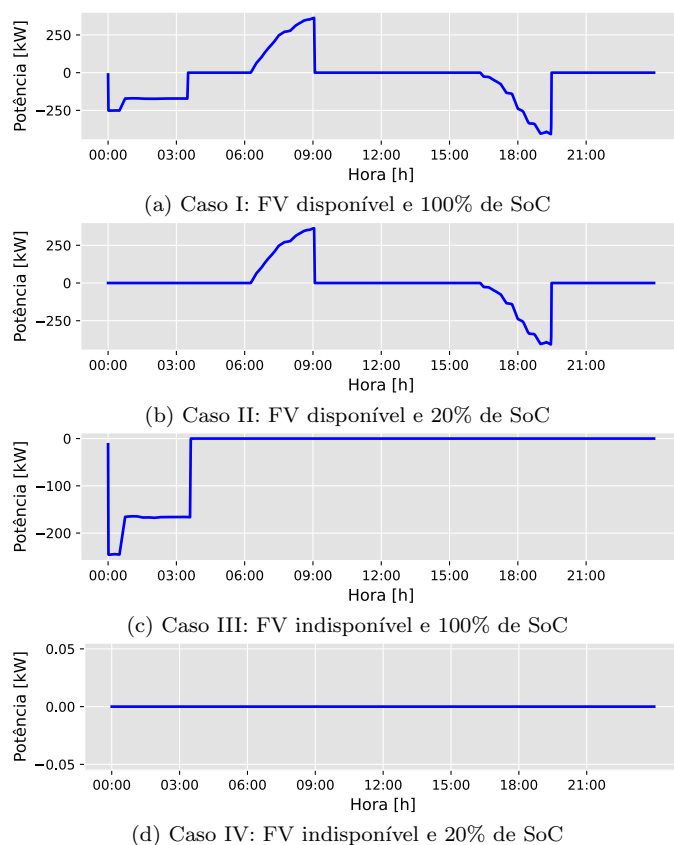


Figura 2. Potência de carga e descarga do BESS para todos os casos.

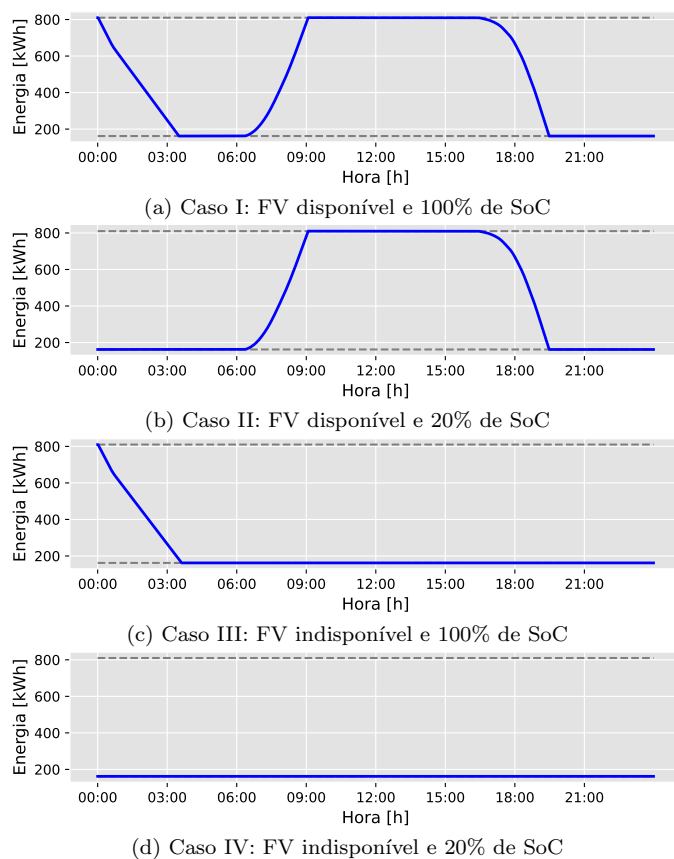
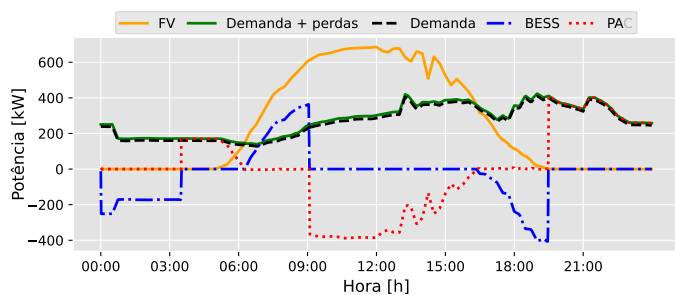
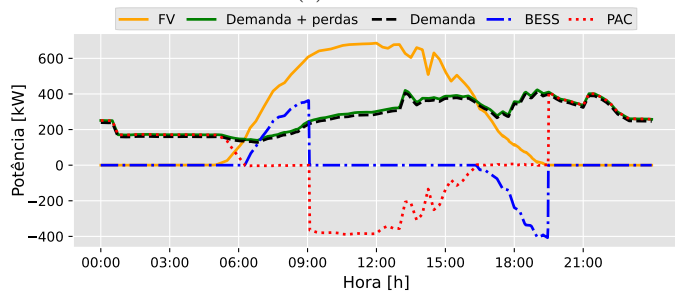


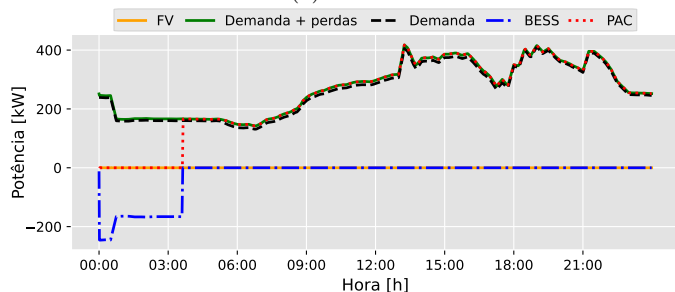
Figura 3. Energia do BESS para todos os casos.



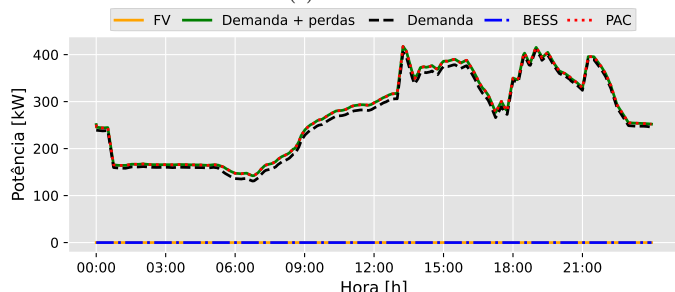
(a) Caso I



(b) Caso II



(c) Caso III

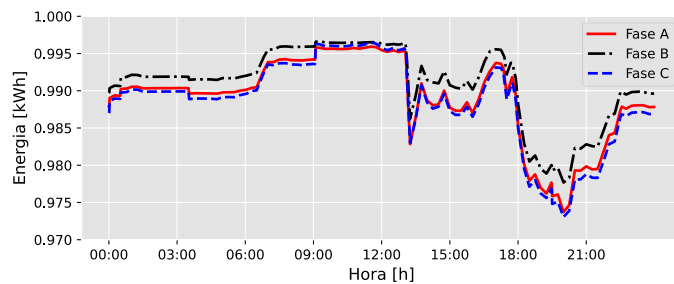


(d) Caso IV

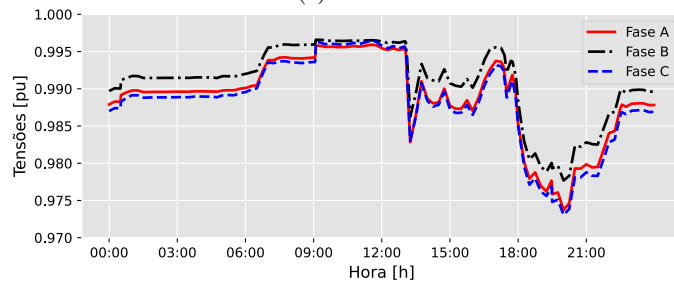
Figura 4. Potência ativa no PAC, FV, carga e BESS para todos os casos

redução dos custos é deixar o BESS com SoC mínimo. Adicionalmente, na Figura 4d é possível observar que toda a demanda é suprida pela rede, pois não há geração FV e o BESS não opera.

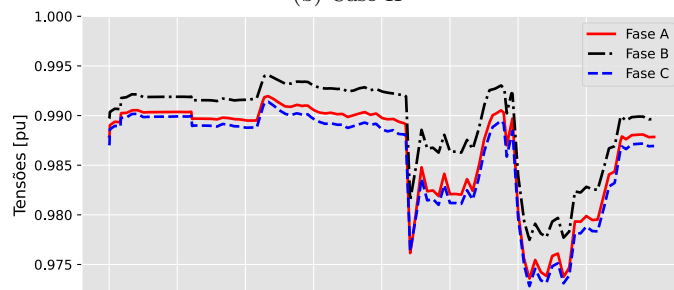
Na Figura 5, são apresentados os perfis de tensão por fase no PAC da microrrede para todos os casos. Pode-se verificar que as magnitudes de tensão para todos os casos estão dentro da faixa adequada de 0,93 a 1,05 pu, conforme PRODIST (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021). Além disso, é possível observar nas Figuras 5a e 5b, que a geração FV eleva um pouco os perfis de tensão entre as 9:00 horas e 13:00 h, em comparação com as Figuras 5c e 5d. Adicionalmente, durante o horário de ponta, momento em que o BESS está descarregando (Figuras 5a e 5b), a queda de tensão é um pouco menor em comparação aos



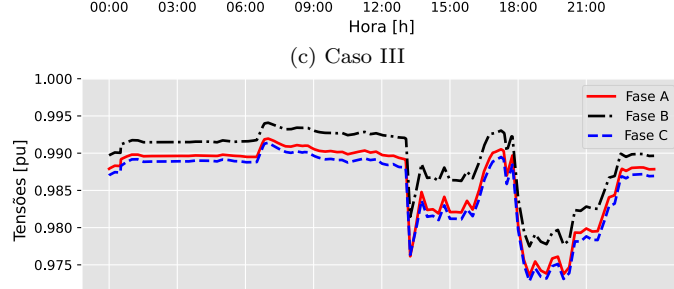
(a) Caso I



(b) Caso II



(c) Caso III



(d) Caso IV

Figura 5. Perfis de tensão para todos os casos

casos em que o BESS não descarrega durante o horário de ponta (Figuras 5c e 5d).

Os resultados apresentados estão alinhados com as conclusões de (Santos et al., 2021; Silva et al., 2023), que também observaram a importância do uso de geração fotovoltaica para a recarga do BESS e, conseqüentemente, a redução dos custos operacionais de microrredes.

4. CONCLUSÃO

Este estudo propôs uma nova metodologia que combina o simulador OpenDSS com um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para otimizar a operação de uma microrrede em um Campus Universitário. Essa abordagem tem potencial para contribuir para o planejamento eficiente e a tomada de decisões no desenvolvimento e im-

plantação de microrredes. Além disso, ao considerar o controle do sistema de armazenamento de energia (BESS) e o balanceamento da demanda, o modelo proposto permite uma melhor integração de fontes renováveis intermitentes, impulsionando a transição para uma matriz energética mais sustentável.

Os resultados obtidos ao aplicar o modelo à microrrede CampusGRID, que está sendo implantada na UNICAMP, em Campinas - SP, demonstraram a eficácia dessa abordagem na obtenção de uma operação ótima. Os benefícios observados incluem a redução dos custos operacionais, o aumento da utilização de energia renovável e a garantia da qualidade do fornecimento de energia. No entanto, é importante ressaltar que, durante operações conectadas à rede, quando a geração fotovoltaica é indisponível, as recargas do BESS podem não ser atrativas devido aos seus custos operacionais.

Embora os resultados sejam promissores, existem oportunidades de aprimoramento. Pesquisas futuras podem se concentrar na modelagem e operação da microrrede de forma isolada da rede principal, e na consideração de incertezas nos dados, para desenvolver estratégias robustas e adaptáveis. Portanto, a metodologia proposta contribui para a evolução contínua da otimização de microrredes e sistemas de energia distribuída, promovendo a transição para um futuro energético mais sustentável, principalmente no contexto brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Bolsas: 2019/17306-1, 2022/03441-7 e 2019/01906-0; e projetos temáticos 2021/11380-5 e 2016/08645-9. Este trabalho também é desenvolvido no âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico PD-00063-3058/2019 - PA3058: “MERGE – Desenvolvimento de Microrredes Eficiente, Confiáveis e Sustentáveis”, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em parceria com as distribuidoras do grupo CPFL Energia.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (2021). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist, módulo 8 – qualidade da energia elétrica. URL https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf.
- Bassey, O., Chen, C., and Butler-Purpy, K.L. (2021). Linear power flow formulations and optimal operation of three-phase autonomous droop-controlled microgrids. *Electric Power Systems Research*, 196, 1–11.
- COIN-OR (2016). COIN-OR branch and cut solver (CBC). URL <https://www.coin-or.org/>.
- Dugan, R.C. and Montenegro, D. (2018). *EPRI Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*. Electric Power Research Institute, Inc. [s.l.: s.n.].
- Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., Kamoun, N., Khaidar, M., and Zine-Dine, K. (2021). Review of control and energy management approaches in microgrid systems. *Energies*, 14,168, 1–30.
- Gangwar, T., Padhy, N.P., and Jena, P. (2022). Management of energy storage dispatch in unbalanced distribution networks using openss. In *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*. Trivandrum, India.
- Huang, Y., Li, G., Chen, C., Bian, Y., Qian, T., and Bie, Z. (2022). Resilient distribution networks by microgrid formation using deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Smart Grids*, 13, no. 6, 4918–4930.
- López, J.C., Ota, J.I.Y., Rider, M.J., Pomilio, J.A., da Silva, L.C.P., and Bento, R.G. (2020). Objetivos e desafios do projeto de p&d merge: Microgrids for efficient, reliable and greener energy. In *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020)*. Santo André, SP.
- Mischos, S., Dalagdi, E., and Vrakas, D. (2023). Intelligent energy management systems: a review. *Artificial Intelligence Review*.
- Mitchell, S., Kean, A., Mason, A., O’Sullivan, M., Phillips, A., and Peschiera, F. (2009). Optimization with PuLP. version 2.6. URL <https://coin-or.github.io/pulp/>.
- Nonzol, R.A., Tulliao, Y.P., and Pacis, M.C. (2023). An optimal distribution load scheduling considering the loss of energy expectation (loee) and loss of load expectation (lole). In *2023 the 15th International Conference on Computer and Automation Engineering*. Sydney, Australia.
- Prabpal, P., Kongjeen, Y., and Bhumkittipich, K. (2021). Optimal battery energy storage system based on var control strategies using particle swarm optimization for power distribution system. *Symmetry*, 13.
- Python Software Foundation (2023). Welcome to Python. URL <https://www.python.org/>.
- Quadros, R., Jucá, J.L., Cypriano, J.G.I., da Silva, R.P.B., da Silva, L.C.P., and Bento, R.G. (2021). Implementation of microgrid on the university campus of UNICAMP- Brazil: Case study. *J. Electron. Advanced Electr. Eng.*
- Quadros, R. (2023). *Contribuições ao Planejamento, Projeto e Implantação de Microrredes CA no Contexto Brasileiro: Caso CAMPUSGRID - UNICAMP*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Santos, L.H.S., Silva, J.A.A., López, J.C., Arias, N.B., Rider, M.J., and Da Silva, L.C.P. (2021). Integrated optimal sizing and dispatch strategy for microgrids using homer pro. In *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, 1–5. IEEE.
- Satya, G.T.V. and Bhanu, C.V.K. (2022). Economic dispatch of an islanded microgrid. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 11, no. 3, 199–208.
- Silva, J.A.A., López, J.C., Guzman, C.P., Arias, N.B., Rider, M.J., and Silva, L.C.P. (2023). An IoT-based energy management system for AC microgrids with grid and security constraints. *Applied Energy*, 337, 1–16.
- Silva, J.A.A., López, J.C., Arias, N.B., Rider, M.J., and da Silva, L.C. (2021). An optimal stochastic energy management system for resilient microgrids. *Applied Energy*, 300, 117435.
- Ton, D.T. and Smith, T.M. (2012). The u.s. department of energy’s microgrid initiative. *Electr. J.*, 25, 84–94.
- Zia, M.F., Elbouchikhi, E., and Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Appl. Energy*, 222, 1033–1055.