

GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM TEMPO REAL DA MICRORREDE LABREI

Jéssica Alice Alves da Silva* – j262748@dac.unicamp.br

Derian Carlos Tairo Garcia*

Juan Camilo López Amézquita

Universidade de Twente, Departamento de Engenharia Elétrica e Matemática

Guilherme Souto Chagas*

Marcos Júlio Rider*

Luiz Carlos Pereira da Silva*

* Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Sistemas e Energia

Resumo. O artigo apresenta um estudo de caso realizado em uma microrrede real, chamada LabREI no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da UNICAMP, que utilizou uma ferramenta de gerenciamento de energia (EMS – Energy Management System) baseado em IoT (Internet of Things), para controle e monitoramento de sua operação. Um módulo é desenvolvido para integração e comunicação dos recursos energéticos distribuídos (REDs) da microrrede com o EMS. O despacho ótimo para uma operação do dia seguinte na microrrede é definido pelo módulo de otimização presente no EMS, com o objetivo de minimizar os custos de operação e maximizar o uso da geração solar fotovoltaica. A microrrede contém uma rede trifásica com treze barramentos, e componentes que simulam: o formador de rede, um sistema de armazenamento de energia, um sistema fotovoltaico e uma carga. Dados de operação da microrrede são armazenados em um Data Logger, a cada minuto e amostrados na interface de usuário do EMS baseado em IoT. Os resultados indicaram a eficácia da integração do EMS baseado em IoT com a microrrede LabREI através de sua operação, controle e monitoramento. Além disso, os resultados indicam que a otimização do despacho do sistema de armazenamento de energia contribuiu para a redução de custos e maximização da utilização de fontes de energia renovável locais.

Palavras-chave: Microrredes, Sistema de gerenciamento de energia, Recursos energéticos distribuídos

1. INTRODUÇÃO

A transição global em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis está impulsionando a crescente integração de recursos energéticos distribuídos (RED), como geração fotovoltaica (FV), eólica, sistemas de armazenamento de energia (BESS, *Battery Energy Storage System*) e cargas controláveis ou não controláveis. Além disso, o desenvolvimento de microrredes surge como uma solução promissora para a gestão eficiente da energia em escala local nas redes elétricas, introduzindo assim um novo conjunto de desafios para a gestão eficaz de energia (Uddin *et al.*, 2023).

Um aspecto crítico reside em garantir a operação confiável e eficiente das microrredes, que são sistemas de energia capazes de operar tanto em modo conectado à rede quanto em modo ilhado. Essas microrredes têm o potencial de aprimorar a resiliência da rede e facilitar a integração de REDs (Uzair *et al.*, 2023). No entanto, a natureza intermitente e a necessidade de adaptação em tempo real apresentam um problema de otimização complexo. Consequentemente, a gestão desses sistemas complexos apresenta desafios significativos, exigindo a sincronização precisa de diversos REDs.

A literatura existente tem abordado esta problemática sob diferentes perspectivas, destacando métodos de controle, algoritmos de otimização e estratégias de alocação de recursos em sistemas de gerenciamento de energia (EMS, *Energy Management System*) (Zia *et al.*, 2018; Çimen *et al.*, 2022; Mansouri *et al.*, 2022; Nikkhah *et al.*, 2022). Contudo, é crucial ressaltar que muitas dessas abordagens falham em oferecer uma solução abrangente para o gerenciamento de energia em tempo real de microrredes, muitas vezes subestimando a complexidade inerente ao problema. Nesse contexto, há a necessidade de desenvolver métodos e ferramentas que integrem de maneira abrangente os elementos essenciais para operar microrredes de forma eficiente e confiável.

Este trabalho foca em um estudo de caso conduzido na microrrede LabREI, localizada no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da UNICAMP. Esta microrrede de referência abrange uma diversidade de fontes de energia e cargas controláveis. O sistema em questão representa um valioso caso de estudo para pesquisas em gerenciamento de energia em tempo real, oferecendo um ambiente controlado para avaliar e validar estratégias avançadas de controle. Ao explorar as capacidades e limitações do LabREI, nossa intenção é não apenas preencher as lacunas na literatura, mas também contribuir de maneira tangível para o avanço na gestão de microrredes em tempo real.

As principais contribuições deste artigo incluem a apresentação de uma metodologia para o gerenciamento em tempo real da microrrede LabREI, através do desenvolvimento de um módulo para integração da ferramenta de gerenciamento de energia baseada em IoT (*Internet of Things*) com a microrrede, assim como também, análises em tempo real de sua eficácia em condições diversas. Além disso, fornecemos uma análise dos resultados obtidos através da interface de usuário

do EMS baseado em IoT. Por fim, a organização do artigo está estruturada da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o sistema de gerenciamento de energia com os equipamentos da microrrede LabREI, a Seção III, os resultados do teste; e finalmente, a Seção IV conclui o artigo com as conclusões e perspectivas futuras.

2. GERENCIAMENTO DE ENERGIA

2.1 EMS baseado em IoT

O EMS desempenha um papel fundamental na supervisão, controle e otimização das operações de microrredes. Além disso, tem o objetivo de otimizar o desempenho dos REDs dentro da microrrede. Para alcançar esse objetivo, são empregados critérios como a minimização de custos, o aumento da confiabilidade da rede, a redução de perdas, a diminuição das emissões e a maximização do aproveitamento de fontes de geração renovável, entre outros objetivos (Watari *et al.*, 2021).

Assim, o EMS baseado em IoT aqui utilizado, tem como objetivo principal o monitoramento e gerenciamento de microrredes, oferecendo algumas funcionalidades. Essas funcionalidades incluem a definição do despacho econômico da operação da microrrede para o dia seguinte, o monitoramento, gerenciamento contínuo e visualização em tempo real da operação da microrrede por meio de uma interface gráfica de usuário, além da visualização dos despachos definidos pelo otimizador de despacho econômico (ODE) e a capacidade de inserção/configuração de preços horários de energia proveniente da rede principal, custos da geração térmica e custos associados ao corte de carga (Silva *et al.*, 2023).

2.1.1 Otimizador de despacho econômico

O principal objetivo do módulo ODE é definir o despacho ótimo para o dia seguinte dos REDs disponíveis na microrrede, ou seja, definir os despachos de carga e descarga do BESS, redução da geração FV e/ou corte de carga, despacho do grupo gerador (*genset*), bem como a troca ótima de energia com a rede principal. O módulo ODE é composto por um modelo de programação linear inteira mista (PLIM), conforme apresentado em (Silva *et al.*, 2021), e pode ser formulado conforme o modelo matemático genérico apresentado abaixo:

$$\min\{\text{Custos Operacionais} + \text{Custo de Corte de Carga}\}$$

Sujeito a:

- Fluxo de potência ótimo trifásico desbalanceado
- Operação do *genset*
- Operação do BESS
- Restrições de segurança (operação ilhada)

O modelo PLIM foi implementado na linguagem de programação matemática PuLP (*PuLP Internal Documentation, 2009*) de Python e resolvido através do solucionador de código aberto CBC (*COIN-OR: Computational Infrastructure for Operations Research, 2016*).

2.1.2 Interface web

Por meio da interface web, é possível visualizar dados de operação da microrrede em tempo real, configurar preços de compra de energia e visualizar os despachos definidos pelo ODE. As Fig. 1, 2 e 3 exibem as abas da interface gráfica de usuário (GUI, *Graphical User Interface*) desenvolvida. No cabeçalho da interface tem um botão “*User Manual*” que permite ao usuário baixar o documento com orientações para instalação e utilização do EMS; na barra lateral, o usuário pode selecionar um dos três ambientes: Dashboard, Energy Prices e Day-ahead Dispatch.

No Dashboard (Fig. 1) é possível visualizar gráficos com a operação da microrrede em tempo real, estado de carga do BESS, a potência ativa do sistema de geração FV e um gráfico de pizza que exhibe as fontes de energia utilizadas na microrrede para suprir a demanda. Por fim, o consumo total diário de energia, custo de operação e geração são exibidos na parte inferior da página.

Na aba Energy Prices (Fig. 2), o usuário pode configurar os preços horários de energia da rede principal, os custos relacionados à operação do *genset* e os custos associados ao corte de carga, que serão utilizados pelo módulo ODE. Por fim, a aba Day-ahead Dispatch (Fig. 3) apresenta o despacho do BESS, o corte de carga, o corte/desconexão da geração FV e o despacho do *genset*, definidos pelo ODE.



Figura 1 – GUI do EMS baseado em IoT: aba dashboard.



Figura 2 – GUI do EMS baseado em IoT: aba energy prices.

2.2 Microrrede LabREI

A microrrede LabREI está situada na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP. Essa microrrede é equipada com fontes e cargas programáveis, que simulam condições reais, e permite também a conexão de fontes e cargas reais por meio de cabos, replicando as dimensões reais de redes de distribuição em baixa tensão (*Home - Campus Sustentável*, 2023). A Fig. 4 apresenta a estrutura física da microrrede LabREI, composta por trechos de cabos interconectados a partir do painel (3). Fontes e cargas têm a flexibilidade de serem conectadas a qualquer um dos 13 barramentos disponíveis (Ota e Pomilio, 2021). Desta forma, através do LabREI é possível conduzir testes experimentais que complementam os estudos teóricos e computacionais previamente abordados em Silva *et al.*, 2021 e Silva *et al.*, 2023.

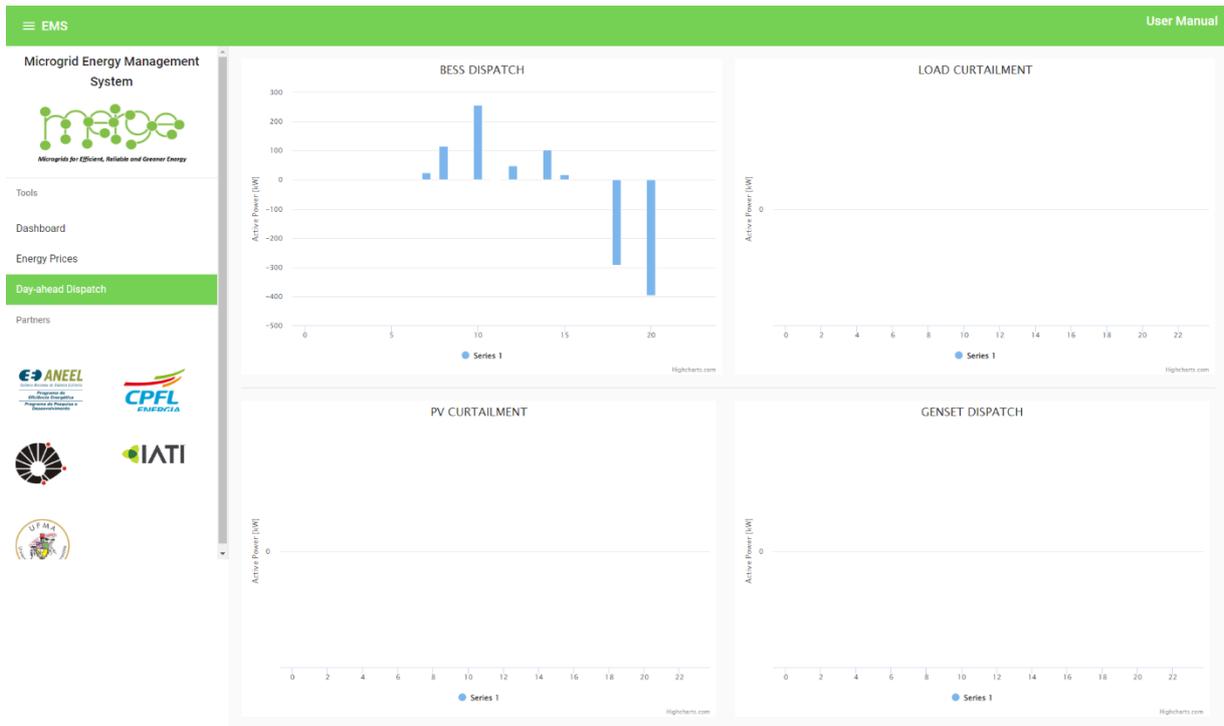


Figura 3 – Gui do EMS baseado em IoT: aba day-ahead dispatch.



Figura 4 - Microrrede LabREI e equipamentos. Legenda: 1) Painel de controle; 2) Eletrocalha para cabos elétricos; 3) Painéis com barramentos; 4) Banco de cargas RLC; 5) Conversor bidirecional NHR-9410; 6) Rack com fontes CC e cargas CA programável NHR-9430 (Ota e Pomilio, 2021).

2.3 Processo de Integração EMS e microrrede LabREI

Para a condução dos testes de operação em microrredes gerenciadas pelo EMS baseado em IoT, é essencial que cada RED forneça dados de sua operação. Nesse contexto, dadas as atuais etapas de implantação da microrrede LabREI, estão disponíveis um formador de rede NHR-9410 e duas cargas programáveis NHR-9430 (aqui chamadas de NHR-9430-I e

NHR-9430-II). Esses componentes têm a capacidade de receber e transmitir dados de operação por meio do protocolo de comunicação TCP/IP.

No módulo de otimização (ODE) do EMS, as cargas e as gerações FVs são modeladas como injeções de potência ativa e reativa constantes. Com base nessa premissa, a carga NHR-9430-I é utilizada para simular um BESS de 12 kWh/3,5 kW, o qual se conecta ao nó 12. Além disso, a carga NHR-9430-II simula tanto uma carga de 3,5 kW, quanto um sistema de geração FV de 5 kW, ambos conectados ao nó 13, como ilustrado na Fig. 5.

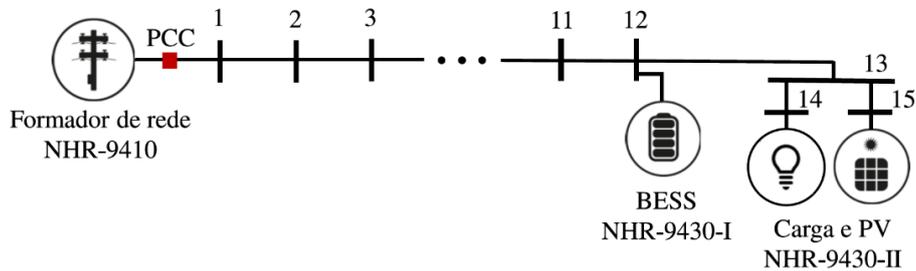


Figura 5 – Topologia da microrrede LabREI.

Os perfis previstos de geração FV e de demanda, visualizados na Fig. 6, são incorporados em arquivos de dados JSON. Esses arquivos, conhecidos por serem leves e de fácil leitura, são utilizados para configurar a carga NHR-9430-II. Por outro lado, os dados de despacho do BESS são coletados no EMS baseado em IoT, por meio de solicitações HTTP realizadas a cada 24 horas. Esses dados são, então, empregados para configurar a NHR-9430-I.

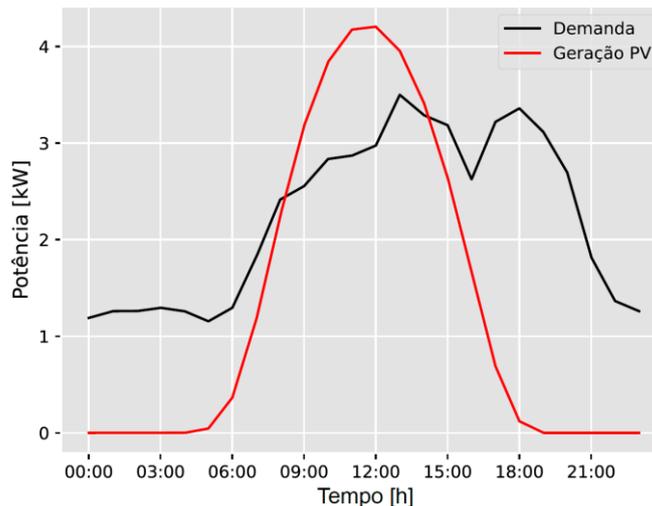


Figura 6 – Perfis previstos de geração FV e de demanda para a operação da microrrede.

A Fig. 7 exibe o processo de integração da microrrede LabREI com o EMS, através do módulo LabREI-API. Conforme apresenta a Fig. 7, os componentes físicos da microrrede, se comunicam com o módulo LabREI-API via comunicação TCP/IP, e este módulo se comunica com o EMS baseado em IoT via internet. O componente LabREI-API é composto por três elementos principais: Microgrid Config, Data Logger e uma API.

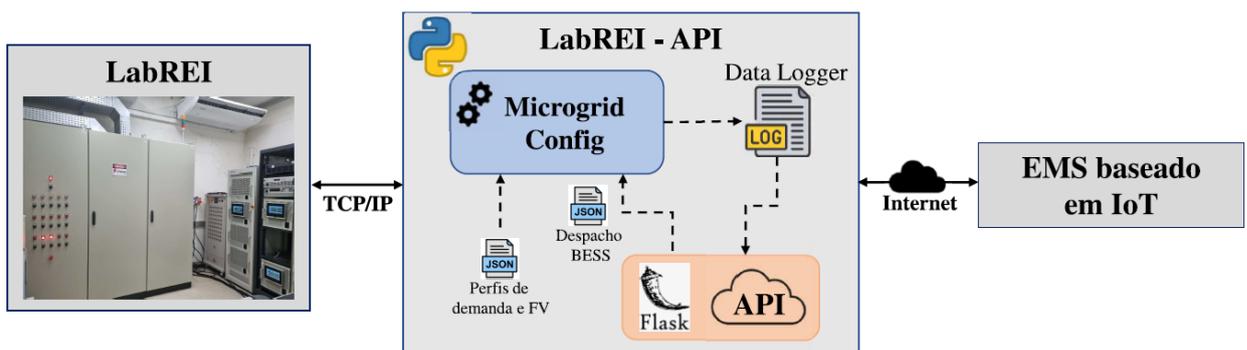


Figura 7 – Processo de integração LabREI-EMS.

O módulo Microgrid Config é responsável por iniciar e controlar a operação da microrrede. Além disso, ele define e modifica o estado de operação do BESS com base no despacho determinado pelo ODE, ao mesmo tempo em que coleta medições em tempo real da operação da microrrede. A aquisição de dados é automatizada a cada minuto e armazenada no Data Logger. Para integrar a operação do componente Microgrid Config com o EMS baseado em IoT, uma API foi implementada utilizando Flask (Flask, 2022). Essa API disponibiliza o último registro armazenado no Data Logger por meio de um link acessível na Internet.

O fluxograma apresentado na Fig. 8 detalha o processo de configuração e operacionalização da microrrede no componente Microgrid Config. Inicialmente, é estabelecida uma conexão por meio de Sockets com os dispositivos NHR-9410 (formador de rede), NHR-9430-I (BESS) e NHR-9430-II (carga e geração FV), e a comunicação é realizada através do protocolo TCP/IP. Em seguida, são configurados parâmetros de inicialização e supervisionado o processo operacional da microrrede. Além disso, ele define e modifica o estado de operação do BESS conforme o despacho determinado pelo EMS, enquanto também coleta medições em tempo real da operação. No caso de ocorrer algum problema de comunicação com os dispositivos NHRs, é realizado um teste de conexão do Wi-Fi e a tentativa de reconexão é repetida até que a comunicação seja restabelecida.

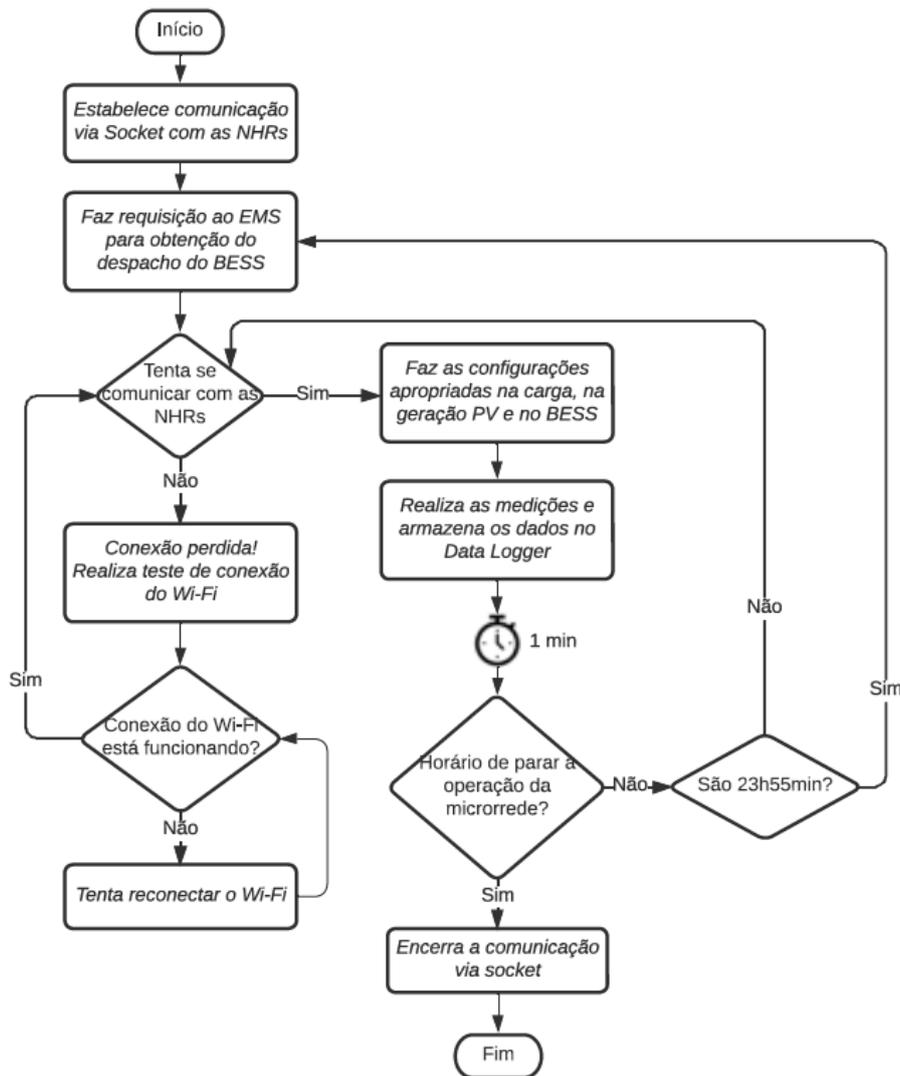


Figura 8 – Fluxograma do módulo Microgrid Config.

3. RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho do EMS baseado em IoT em uma microrrede mais próxima da realidade, foi conduzido um teste com a duração de 24 horas de operação na microrrede LabREI. O teste teve início às 13 horas do dia 20 de agosto e encerrou-se às 12 horas do dia 21 de agosto de 2023. Os estudos conduzidos na microrrede LabREI abrangem exclusivamente a operação conectada à rede.

O despacho ótimo do BESS é determinado pelo ODE, levando em consideração as características específicas da microrrede LabREI e os parâmetros iniciais. Para definição do despacho no dia 20 de agosto, foi considerado um estado inicial de carga (SoC, *State of Charge*) no BESS de 75%. Os custos de energia (consulte a Fig. 9) foram estabelecidos conforme a tarifa branca da CPFL Paulista, onde para os horários de ponta (18:00 às 20:59) são de \$0.257; para os horários intermediários (16:00 às 17:59, 21:00 às 21:59) são de \$0.169, e para as horas fora de ponta (22:00 às 15:59) são de \$0.117 (ANEEL, 2023; CPFL, 2023), considerando uma taxa de câmbio de R\$4,91 (*Câmbio e Capitais Internacionais*, 2023). Tais custos são utilizados como parâmetros iniciais no ODE para definição do despacho econômico para uma operação do dia seguinte.

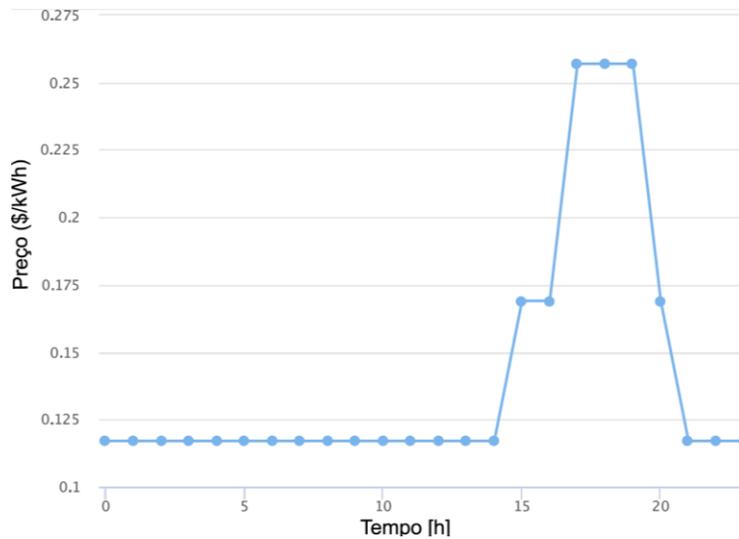
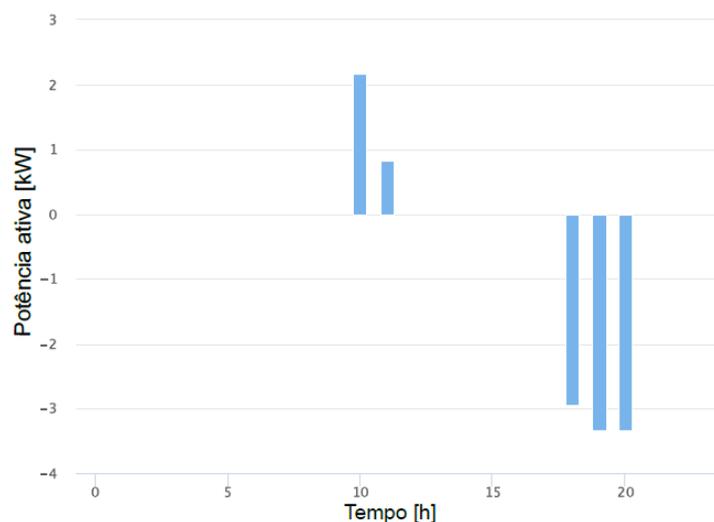
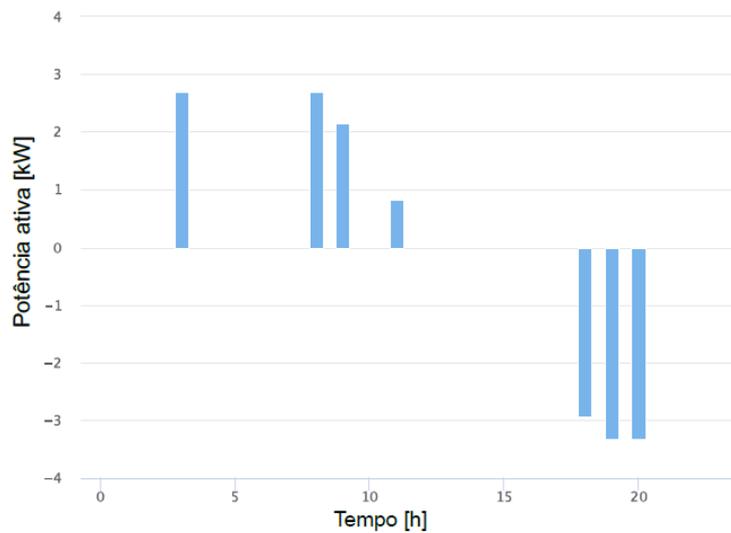


Figura 9 – Custos horários de energia (\$/kWh) (ANEEL, 2023).

Desta forma, o despacho ótimo estabelecido para a operação do BESS é apresentado na Fig. 10. Uma vez que o teste teve início às 13 horas, o BESS deveria já estar completamente carregado, conforme ilustrado na Fig. 10a, pois seu carregamento deveria ocorrer às 10 e 11 horas. E o descarregamento durante o horário de pico. Por outro lado, no dia 21 de agosto, o carregamento ocorre em quatro momentos do dia, e o descarregamento durante o horário de pico.



(a) Dia 20/08/2023



(b) Dia 21/08/2023

Figura 10 – Despacho definido pelo ODE para operação do BESS.

A operação ótima da microrrede LabREI está apresentada na Fig. 11 (ou seja, imagens capturadas da interface web) utilizando um horizonte de operação de 24 horas. Note que os dispositivos NHR-9430-I (BESS) e NHR-9430-II (carga e geração FV) seguem o planejamento definido pelo EMS baseado em IoT, assim como o perfil de geração FV estabelecido. Além disso, o dispositivo NHR-9410 (formador de rede) desempenha a função de balancear a potência entre a geração e as demandas.

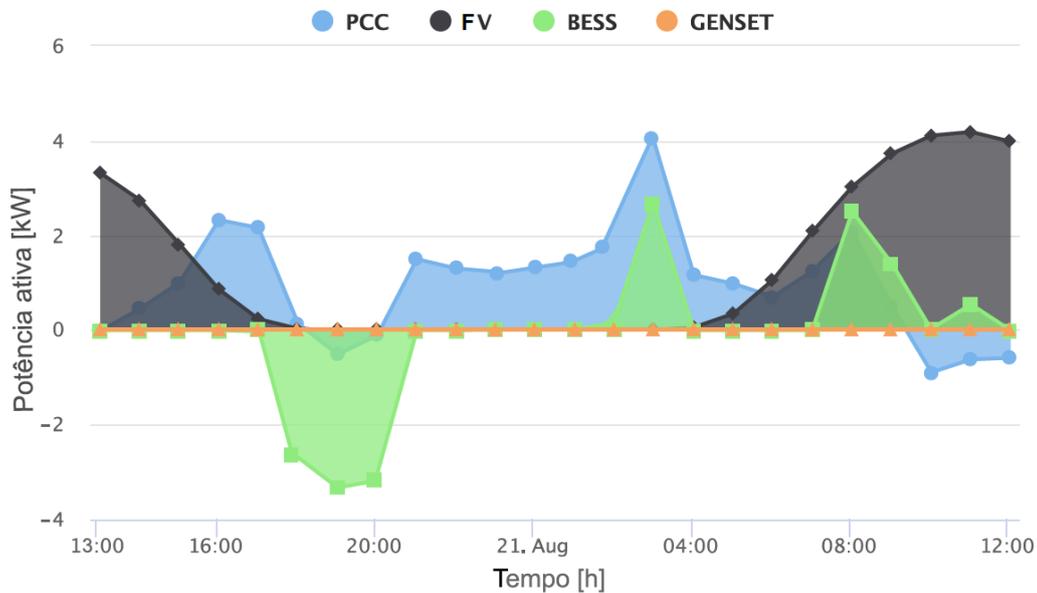


Figura 11 – Operação da microrrede LabREI.

Como demonstrado na Fig. 11, inicialmente, a geração FV (curva em cinza) e a rede, representada pelo Ponto de Conexão Comum (PCC) (curva em azul), atendiam à demanda. Durante o horário de ponta, o BESS (curva em verde) é descarregado para auxiliar na redução dos custos de aquisição de energia. Durante a madrugada, a rede supre a demanda e também ocorre a recarga do BESS. À medida que a geração de energia solar aumenta ao longo do dia 21, o BESS passa a ser recarregado, atingindo sua capacidade máxima às 12 horas, e o excedente de geração fotovoltaica é injetado na rede (indicado por valores negativos do PCC).

Por fim, o estado de carga do BESS pode ser observado na Fig. 12. É perceptível que o BESS inicialmente estava totalmente carregado (12 kWh), atingindo seu mínimo às 20:59h (2,4 kWh), e, subsequentemente, retornou à sua carga máxima no dia seguinte, às 12 horas.

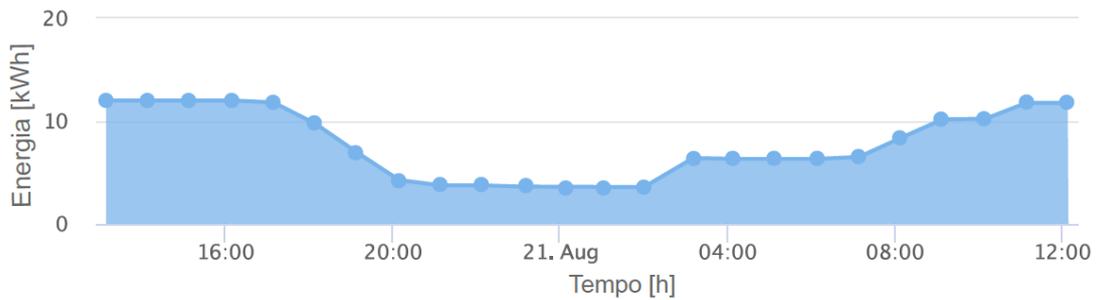


Figura 12 – Energia no BESS ao longo da operação da microrrede LabREI.

CONCLUSÕES

Em resumo, este artigo proporcionou uma visão abrangente do estudo de caso conduzido utilizando a ferramenta de gerenciamento de energia para o controle e monitoramento de uma microrrede real denominada LabREI, localizada no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da UNICAMP. Os resultados obtidos neste estudo destacam a importância crítica das soluções de gerenciamento de energia na otimização do desempenho e na garantia da confiabilidade das microrredes em um contexto real.

Através da análise detalhada dos dados coletados e das ações de controle implementadas, pudemos observar a eficácia do sistema de gerenciamento de energia (EMS, Energy Management System) baseado em IoT na maximização da eficiência energética e minimização dos custos de operação da microrrede. Além disso, a capacidade de monitoramento contínuo demonstrou ser um recurso valioso na identificação precoce de problemas, o que possibilita uma resposta proativa a eventos imprevistos.

Os resultados do teste de 24 horas na microrrede LabREI, utilizando o EMS baseado em IoT, indicam que o despacho otimizado do BESS contribuiu para a eficiência energética. O EMS coordenou o BESS, geração PV e demanda, reduzindo custos ao descarregar o BESS em horários de pico. O dispositivo NHR-9410 manteve o equilíbrio de potência. O BESS foi gerenciado efetivamente, recarregando e descarregando conforme necessário. Esses resultados sugerem que o EMS baseado em IoT tem potencial para otimizar microrredes.

Embora os resultados sejam promissores, existem oportunidades de aprimoramento. Pesquisas futuras podem se concentrar na criação de um módulo para tratar de problemas associados à estabilidade do sistema frente a eventos imprevistos. Em última análise, este artigo contribuiu para o conhecimento em microrredes, fornecendo evidências concretas dos benefícios alcançados através da implementação de soluções de gerenciamento de energia avançadas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Bolsas: 2019/17306-1; e projeto temático 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. Apoiado também pelas seguintes Agências Brasileiras de Fomento à Pesquisa: FAPESP, CAPES, CNPq, INEP, FINEP, etc. Os autores foram apoiados pelo processo nº 2021/11380-5, Centro Paulista de Estudos da Transição Energética (CPTen), FAPESP.

REFERÊNCIAS

- ANEEL | Portal Reports Abertos. (2023). Retrieved October 30, 2023, from <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>
- Câmbio e Capitais internacionais. (2023). Retrieved October 30, 2023, from <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/cambioecapitais>
- Çimen, H., Bazmohammadi, N., Lashab, A., Terriche, Y., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2022). An online energy management system for AC/DC residential microgrids supported by non-intrusive load monitoring. *Applied Energy*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118136>
- COIN-OR: Computational Infrastructure for Operations Research – Open-source Software for the Operations Research Community. (n.d.). Retrieved October 30, 2023, from <https://www.coin-or.org/>
- FAQ Tarifa Branca | CPFL. (n.d.). Retrieved October 30, 2023, from <https://www.cpfl.com.br/faq-tarifa-branca>
- Home - Campus Sustentável. (n.d.). Retrieved October 30, 2023, from <https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/>

- Inácio Yutaka Ota, J., & Antenor Pomilio, J. (2021, February 28). *LabREI: Ambiente Experimental para Pesquisas Interdisciplinares e Formação de Recursos Humanos em Redes Inteligentes de Energia Elétrica*. <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2384>
- Mansouri, S. A., Ahmarinejad, A., Nematbakhsh, E., Javadi, M. S., Esmaeel Nezhad, A., & Catalão, J. P. S. (2022). A sustainable framework for multi-microgrids energy management in automated distribution network by considering smart homes and high penetration of renewable energy resources. *Energy*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123228>
- Nikkhah, S., Sarantakos, I., Zografou-Barredo, N. M., Rabiee, A., Allahham, A., & Giaouris, D. (2022). A Joint Risk- and Security-Constrained Control Framework for Real-Time Energy Scheduling of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(5), 3354–3368. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3171816>
- PuLP Internal Documentation — PuLP 2.7.0 documentation*. (n.d.). Retrieved October 30, 2023, from <https://coin-or.github.io/pulp/technical/index.html>
- Silva, J. A. A., López, J. C., Arias, N. B., Rider, M. J., & da Silva, L. C. P. (2021). An optimal stochastic energy management system for resilient microgrids. *Applied Energy*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117435>
- Silva, J. A. A., López, J. C., Guzman, C. P., Arias, N. B., Rider, M. J., & da Silva, L. C. P. (2023). An IoT-based energy management system for AC microgrids with grid and security constraints. *Applied Energy*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120904>
- Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsayah, S., Zhu, J., & Guerrero, J. M. (2023). Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- Uzair, M., Li, L., Eskandari, M., Hossain, J., & Zhu, J. G. (2023). Challenges, advances and future trends in AC microgrid protection: With a focus on intelligent learning methods. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 178). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113228>
- Watari, D., Taniguchi, I., Goverde, H., Manganiello, P., Shirazi, E., Catthoor, F., & Onoye, T. (2021). Multi-time scale energy management framework for smart PV systems mixing fast and slow dynamics. *Applied Energy*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116671>
- Welcome to Flask — Flask Documentation (2.1.x)*. (n.d.). Retrieved October 30, 2023, from <https://flask.palletsprojects.com/en/2.1.x/>
- Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. In *Applied Energy* (Vol. 222, pp. 1033–1055). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>

LabREI Microgrid Real-Time Energy Management

Abstract. The article presents a case study conducted in a real microgrid called LabREI at the Laboratory of Smart Grids at UNICAMP. It used an IoT-based Energy Management System (EMS) for the control and monitoring of its operation. A module was developed for the integration and communication of the distributed energy resources (DERs) within the microgrid with the EMS. The optimal dispatch for the next day's operation in the microgrid is determined by the optimization module within the EMS, with the goal of minimizing operation costs and maximizing the use of photovoltaic solar generation. The microgrid consists of a three-phase network with thirteen buses and components simulating a network controller, an energy storage system, a photovoltaic system, and a load. Operation data of the microgrid is stored in a Data Logger, sampled every minute, and presented on the IoT-based EMS user interface. The results indicated the effectiveness of integrating the IoT-based EMS with the LabREI microgrid in terms of its operation, control, and monitoring. Furthermore, the results suggest that the optimized dispatch of the energy storage system contributed to cost reduction and maximized the utilization of local renewable energy sources.

Keywords: Microgrids, Energy management systems, distributed energy sources