

# Impacto da Geração e Armazenamento de Energia na Resiliência de Microrredes

**Tema:** Recursos Energéticos Distribuídos

**Autores:** Jéssica A. A. Silva

**Co-Autores:** Luiza H. S. Santos, Rodolfo Quadros, Marcos J. Rider

**Empresa:** Universidade Estadual de Campinas

---

## Resumo

A resiliência de microrredes é fundamental para garantir a continuidade do fornecimento de energia em cenários de contingência, especialmente em sistemas que integram fontes renováveis e armazenamento em baterias. Neste sentido, este trabalho avalia a resiliência de microrredes através de um algoritmo de controle para operação ilhada que prioriza o uso de fontes renováveis de energia. A microrrede CampusGRID foi utilizada como caso de estudo, a qual contém sistemas fotovoltaicos (FV), um sistema de armazenamento de energia (BESS, *Battery Energy Storage System*) e um gerador térmico como recursos energéticos distribuídos (REDs). O estudo realizado avalia seis cenários de operação ilhada, considerando diferentes estados de carga (SoC, *State of Charge*) do BESS, a disponibilidade da geração FV e do gerador térmico, além de contingências em horários estratégicos. Os resultados indicaram que a resiliência da microrrede é fortemente influenciada pela disponibilidade de REDs e pelo nível de carga inicial do BESS.

## 1. Introdução

A crescente integração de recursos energéticos distribuídos (REDs), como sistemas fotovoltaicos (FV) e baterias como armazenamento de energia (BESS, *Battery Energy Storage Systems*), tem transformado o conceito de redes elétricas, promovendo a transição de sistemas centralizados para estruturas mais flexíveis, como as microrredes. Microrredes são sistemas energéticos locais que combinam geração distribuída, armazenamento e carga, podendo operar conectadas à rede principal ou de forma isolada, garantindo maior autonomia e confiabilidade para a rede (Silva *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a resiliência das microrredes é um fator crítico para assegurar sua capacidade de lidar com contingências energéticas, como falhas na rede principal, variações na geração renovável ou picos de demanda. A resiliência pode ser definida como a habilidade de um sistema em manter sua funcionalidade e recuperar-se rapidamente após eventos disruptivos (Rahiminejad *et al.*, 2023). Em microrredes, isso depende fortemente do gerenciamento eficiente dos sistemas de geração e armazenamento, sendo o sistema de gerenciamento de energia (EMS, *Energy Management System*) um elemento essencial. O EMS coordena o uso dos recursos disponíveis, otimiza a operação e garante que decisões em tempo real mantenham a estabilidade do sistema, mesmo em situações adversas (Zia *et al.*, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos, embora representem uma fonte de energia limpa e abundante, são caracterizados por sua variabilidade, o que dificulta o gerenciamento de energia em microrredes (Hossain *et al.*, 2023). Por outro lado, sistemas de armazenamento de energia, como baterias, desempenham um papel essencial na mitigação dessa variabilidade. Além de permitir o armazenamento de excedentes de geração para suprir a demanda em momentos de baixa produção, eles também viabilizam técnicas como regulação de frequência, *peak shaving*, que reduz os picos de demanda (Wang *et al.*, 2023), e suavização de flutuações na geração de energia (Santos *et al.*, 2023). A interação entre esses elementos é determinante para a resiliência geral da microrrede.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de diferentes cenários de geração FV, estado de carga (SOC, *State of Charge*) inicial de um BESS, horários de ocorrência de contingências e o suporte fornecido por geradores térmicos, buscando identificar vulnerabilidades e propor estratégias para aumentar a resiliência do sistema. A contribuição deste estudo é fornecer insights sobre como otimizar a interação entre sistemas de geração e armazenamento para aumentar a resiliência de microrredes, além de servir como referência para aplicações práticas em projetos de microrredes no Brasil e no mundo.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1. Estratégia de operação

Para garantir que uma microrrede possa operar de forma isolada durante momentos de contingência na rede principal, foi adotado o “modo de contingência”, conforme a metodologia proposta em Santos *et al.* (2024). A Figura 1 apresenta a lógica detalhada dessa estratégia de despacho, evidenciando as etapas que garantem o funcionamento contínuo e eficiente da microrrede.

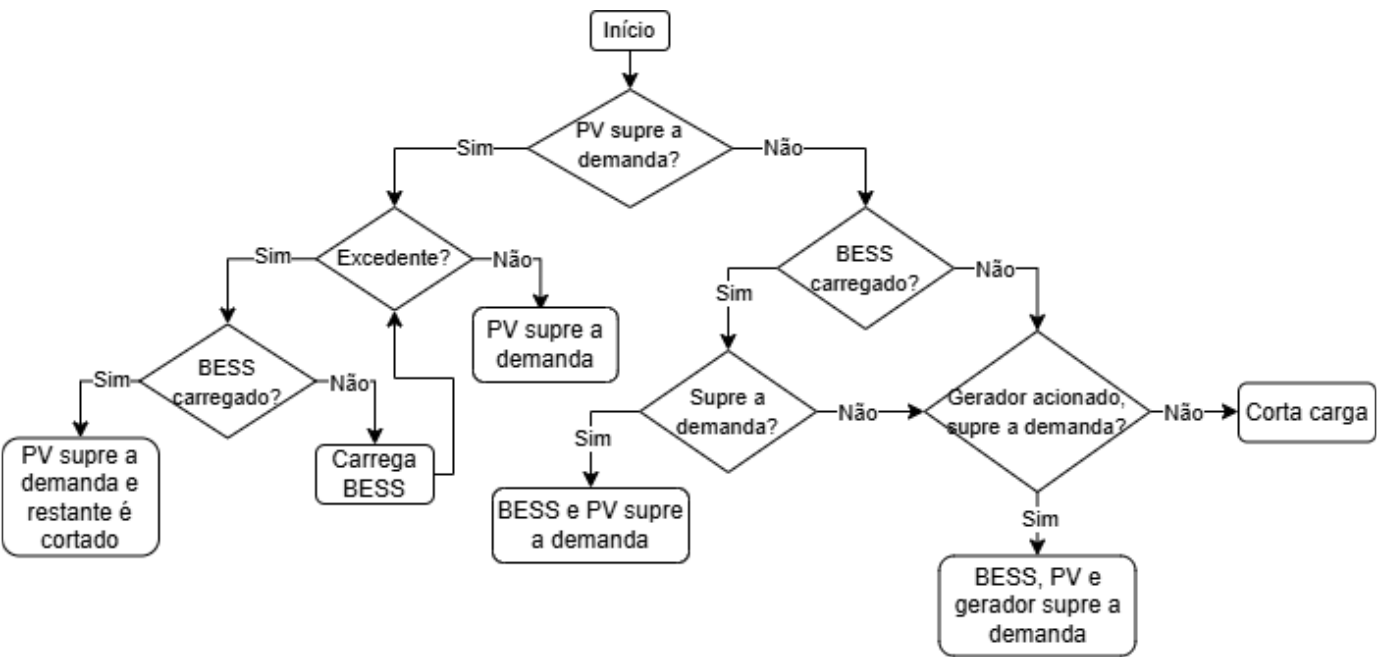


Figura 1 – Fluxograma de operação do modo de contingência para operação isolada.

A estratégia de despacho para o modo de contingência prioriza o uso da geração FV, seguido pelo BESS e, por fim, acionando o gerador térmico apenas quando estritamente necessário. Em situações extremas, pode ocorrer a desconexão do sistema FV para evitar excedentes e a aplicação de corte de carga, garantindo a manutenção da tensão, frequência e balanço de potência na microrrede.

Nota-se na Figura 1 que, o corte de geração FV é realizado em situações onde a capacidade de armazenamento do BESS atinge seu limite máximo, impossibilitando a absorção do excedente de energia gerada. Essa medida é necessária para evitar sobrecargas no sistema e manter os parâmetros operacionais dentro dos limites de segurança, como tensão e frequência. O acionamento do gerador térmico, por sua vez, ocorre apenas quando a geração FV não é suficiente para suprir a demanda e o BESS atinge o limite de 40% do SoC. Já o corte de carga é implementado quando os recursos disponíveis, incluindo o BESS e o gerador térmico, não conseguem atender à demanda total da microrrede. Nesse cenário, o EMS realiza o desligamento seletivo de cargas menos prioritárias, priorizando o fornecimento para as cargas críticas. Essas estratégias coordenadas permitem que a microrrede mantenha sua operação durante o modo de contingência, minimizando os impactos até que a operação normal seja restabelecida.

Após a resolução da contingência, a microrrede retorna à operação conectada à rede principal. Durante uma operação conectada à rede, a geração FV continua sendo priorizada. Nos casos de excedente de energia, o BESS pode ser carregado ou o excedente pode ser injetado na rede elétrica quando o BESS já estiver carregado, seguindo o sistema de compensação de energia. Por outro lado, o BESS é descarregado nos momentos de alta demanda, contribuindo para a redução de custos operacionais. Quando a geração FV e o BESS são insuficientes, a rede principal é utilizada para suprir a demanda.

A modelagem e simulação da rede de distribuição foram realizadas utilizando as bibliotecas *DSS-Python* (DSS-Python, 2023) e *OpenDSSDirect* (OpenDSSDirect, 2023), que fornecem acesso direto às funcionalidades do OpenDSS a partir de scripts Python (Python Software Foundation, 2023). Essas ferramentas facilitaram a integração com algoritmos de controle e otimização, permitindo análises mais detalhadas e automatizadas. A simulação foi integrada à estratégia de otimização desenvolvida em Python, possibilitando a avaliação do comportamento elétrico da microrrede em diferentes cenários de operação. As simulações consideraram um horizonte de 24 horas de operação, permitindo analisar os impactos de diferentes condições operativas e contingências sobre o desempenho da microrrede.

## **2.2. Resultados e Discussões**

### **2.2.1. Microrrede teste e casos de estudo**

Os casos de estudo deste trabalho baseiam-se na topologia e nos conceitos iniciais da microrrede CampusGrid, desenvolvida na Unicamp, Brasil (Campus Sustentável, 2023). Antes de sua implementação prática, tais estudos foram realizados com o objetivo de avaliar a resiliência da microrrede em cenários de contingência. Essas simulações analisam sua capacidade de suportar diferentes condições operacionais, como variações na geração FV, estado de carga das baterias e duração de interrupções, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias robustas de operação.

A microrrede CampusGrid abrange diversas áreas acadêmicas, esportivas e de serviços na Unicamp. Maiores informações podem ser encontradas em Silva et al. (2023) e Quadros (2023). As cargas da microrrede demandam uma faixa de potência que varia de 475 kW a 768 kW. A CampusGrid conta com um BESS de 810 kW e 810 kWh, além de sistemas de geração FV que totalizam uma capacidade instalada de 736 kWp, e um gerador térmico de 150 kW para backup, conforme pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 – Microrrede CampusGRID (Silva et. al., 2023).

Os casos de estudo analisados são divididos em seis cenários distintos, cada um considerando diferentes SoC para o BESS, e a disponibilidade ou não da geração FV e do gerador térmico. Além disso, são consideradas contingências às 11h e às 19h, com uma duração de três horas, conforme descrito abaixo:

- Caso I: SoC 100%, FV e GMG disponíveis, e ilhamento às 11h
- Caso II: SoC 100%, FV indisponível, GMG disponível e ilhamento às 19h
- Caso III: SoC 20%, FV e GMG disponíveis, e ilhamento às 11h
- Caso IV: SoC 20%, FV indisponível, GMG disponível e ilhamento às 19h
- Caso V: SoC 100%, FV e GMG indisponível, e ilhamento às 19h
- Caso VI: SoC 40%, FV e GMG indisponível, e ilhamento às 19h

## 2.2.2. Resultados

### 2.2.2.1. Caso I

O caso I considera uma curva de geração FV média, baseada em dados históricos locais, um SoC de 100% para o BESS, e ilhamento ocorrendo às 11h, com duração de 3h. Além disso o gerador térmico está disponível para uso, caso necessário. A Figura 3 apresenta respectivamente a energia do *BESS*, a potência

do gerador térmico, o percentual de corte de geração FV, o percentual de corte de carga e as tensões no ponto de acoplamento comum (PAC) da microrrede.

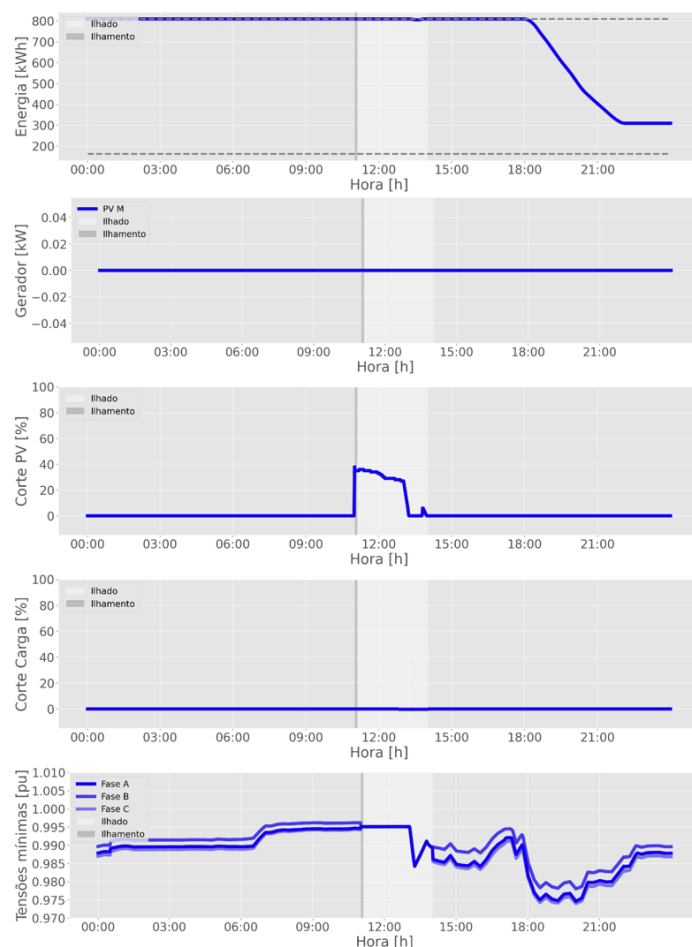


Figura 3 – Energia do BESS, potência do gerador térmico, corte de geração FV , corte de carga, e tensões no PAC: caso I e contingência às 11 horas.

Observa-se que, neste cenário, como o BESS está totalmente carregado, durante a contingência a demanda é suprida pela geração FV. O excedente, por não poder ser armazenado, resulta em cortes de geração FV para manter os parâmetros dentro dos limites operacionais, evitando sobrecarga ou instabilidade no sistema. Além disso, o gerador não foi acionado, e não houve cortes de carga, indicando que o sistema conseguiu operar de forma autossuficiente e equilibrada mesmo durante a contingência. O BESS descarrega no horário de pico, durante operação conectada à rede, contribuindo para reduzir a dependência da rede elétrica e otimizar o uso da energia armazenada.

#### 2.2.2.2. Caso II

No caso II, considera-se também um SoC de 100% para o BESS, geração FV indisponível, gerador térmico disponível e ilhamento ocorrendo às 19h, com duração de 3h. A Figura 4 apresenta respectivamente a energia do *BESS*, potência do gerador, o percentual de corte de carga e as tensões no PAC.

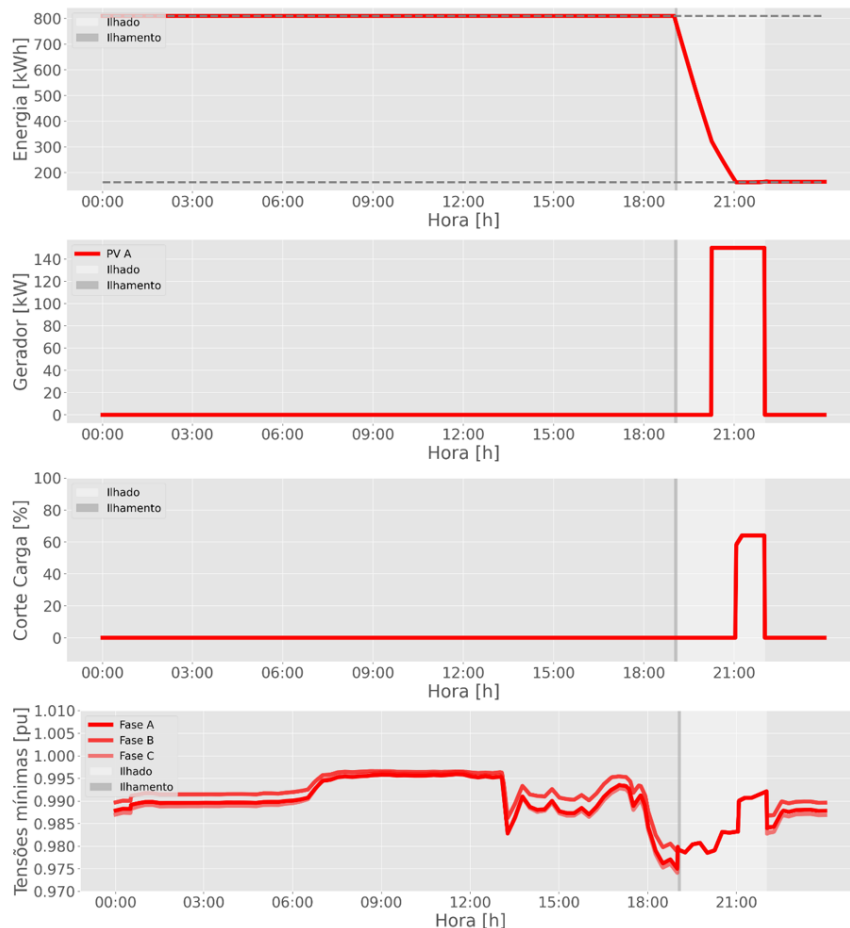


Figura 4 – Energia do BESS, potência do gerador, corte de carga e tensões no PAC: caso II e contingência às 19 horas.

Nota-se na Figura 4 que, no início da contingência, o BESS assume totalmente o suprimento da carga. Quando o SoC atinge 40%, o gerador é acionado para auxiliar no atendimento à demanda. Contudo, ao alcançar o SoC mínimo de 20%, torna-se necessário cortar aproximadamente 65% das cargas devido à limitação da capacidade do gerador. Observa-se, ainda, que durante a operação ilhada, os níveis de tensão apresentam uma melhora significativa, especialmente após o corte de carga, conforme comparado com a Figura 3. Essa melhora nos níveis de tensão ocorre devido à redução na demanda total, o que alivia o sistema e permite um funcionamento mais estável dentro dos limites operacionais.

### 2.2.2.3. Caso III

Considera-se um SoC de 20% para o BESS no caso III, um perfil de geração FV média, gerador térmico disponível e um ilhamento ocorrendo às 11h. A Figura 5 apresenta respectivamente a energia do *BESS*, potência do gerador, o percentual de corte de geração FV, o percentual de corte de carga e as tensões no e as tensões no PAC.



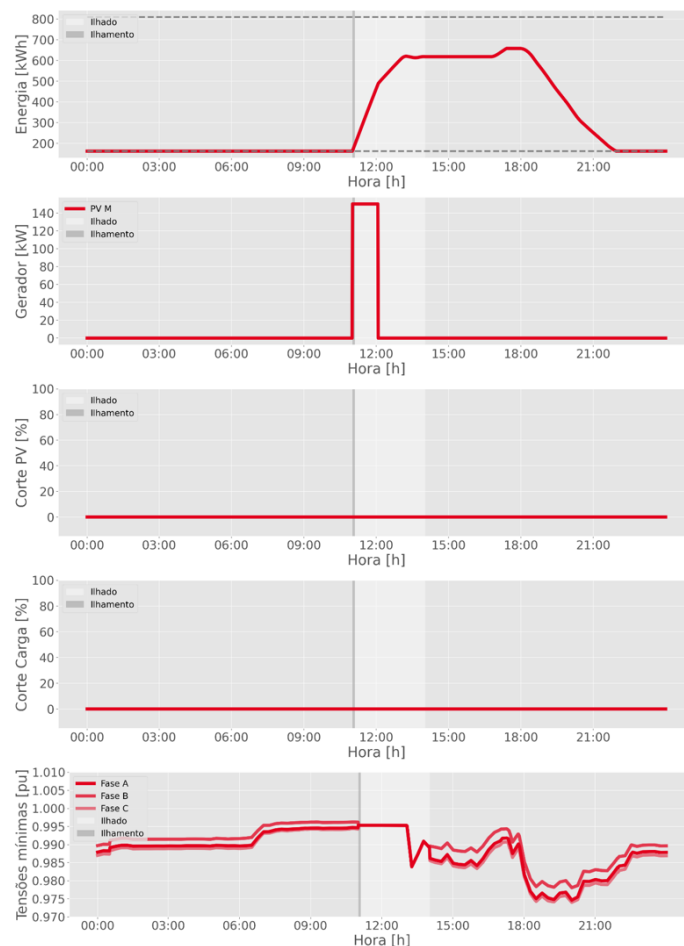


Figura 5 – Energia do BESS, potência do gerador, corte de geração FV, corte de carga e tensões no PAC: caso III e contingência às 11 horas.

Considerado um caso crítico, a ocorrência de uma contingência no momento em que o BESS está com apenas 20% de SoC gera preocupação. No presente caso, logo no início da contingência, é necessário acionar o gerador para suprir parte da demanda, mesmo com a presença de geração FV. O excedente de energia FV é utilizado para recarregar o BESS. Assim que o BESS atinge um SoC de 40%, o gerador é desligado, e a demanda passa a ser suprida exclusivamente pela geração FV. Nesse cenário, a geração FV desempenha um papel crucial ao assegurar o atendimento à carga durante a maior parte da contingência, mesmo sem que o BESS alcance sua capacidade máxima de armazenamento, evitando cortes de carga para a microrrede.

#### 2.2.2.4. Caso IV

O caso IV considera também um SoC de 20% e gerador térmico disponível, no entanto a geração FV está indisponível, e o ilhamento ocorre às 19h. A Figura 6 apresenta respectivamente a energia do BESS, a potência do gerador, o percentual de corte de carga e as tensões no PAC.



Figura 6 – Energia do BESS, potência no gerador, corte de carga e tensões no PAC: caso IV e contingência às 19 horas.

No cenário IV, conforme ilustrado na Figura 6, o BESS inicia a contingência em seu SoC mínimo (20%), o que resulta no acionamento imediato do gerador térmico. No entanto, como a capacidade de geração do gerador térmico não é suficiente para atender toda a demanda da microrrede, é necessário realizar o corte de aproximadamente 65% da carga para manter o equilíbrio de potência e preservar os parâmetros operativos de tensão e frequência. Durante a contingência, o BESS consegue recarregar parcialmente, contribuindo de forma limitada para o balanço de potência.

Este cenário é avaliado como mais crítico do que o caso III, uma vez que, além de o BESS estar em um estado de carga mínimo no momento do ilhamento, também não há suporte da geração FV, que estaria indisponível neste caso. A ausência da geração FV reduz significativamente a resiliência do sistema, aumentando a dependência do gerador térmico e tornando mais frequente a necessidade de cortes de carga para garantir a estabilidade da microrrede.

#### 2.2.2.5. Caso V

No caso V, considera-se que o BESS tenha um SoC de 100%, a geração FV e o gerador térmico estão indisponíveis, por questões de manutenção por exemplo, e ilhamento ocorrendo às 19h, com duração de três horas. A Figura 7 apresenta respectivamente a energia do BESS, a porcentagem de corte de carga e as tensões no PAC.





Figura 7 – Energia do BESS, corte de carga e tensões no PAC: caso V e contingência às 19 horas. No cenário V, o BESS inicia a contingência completamente carregado, o que lhe permite suprir integralmente a demanda da microrrede. No entanto, após aproximadamente duas horas e quarenta e cinco minutos, o SoC do BESS atinge o limite mínimo de operação de 20%, conforme estabelecido como critério de segurança. Nesse ponto, o sistema não consegue mais manter o balanço de potência, resultando no desligamento da microrrede para evitar danos ao sistema e perda de estabilidade. Esse cenário demonstra que, mesmo com o BESS em plena capacidade no momento do ilhamento, sua autonomia é limitada pelo nível de demanda das cargas conectadas e pela ausência de fontes de geração complementares, como FV ou geradores térmicos.

#### 2.2.2.6. Caso VI

O caso VI trata-se do caso mais crítico possível, em que o BESS se encontra no seu mínimo SoC no momento da contingência, e a geração FV e o gerador térmico estão indisponíveis. A Figura 8 apresenta respectivamente a energia do BESS, o percentual de corte de carga e as tensões no PAC.

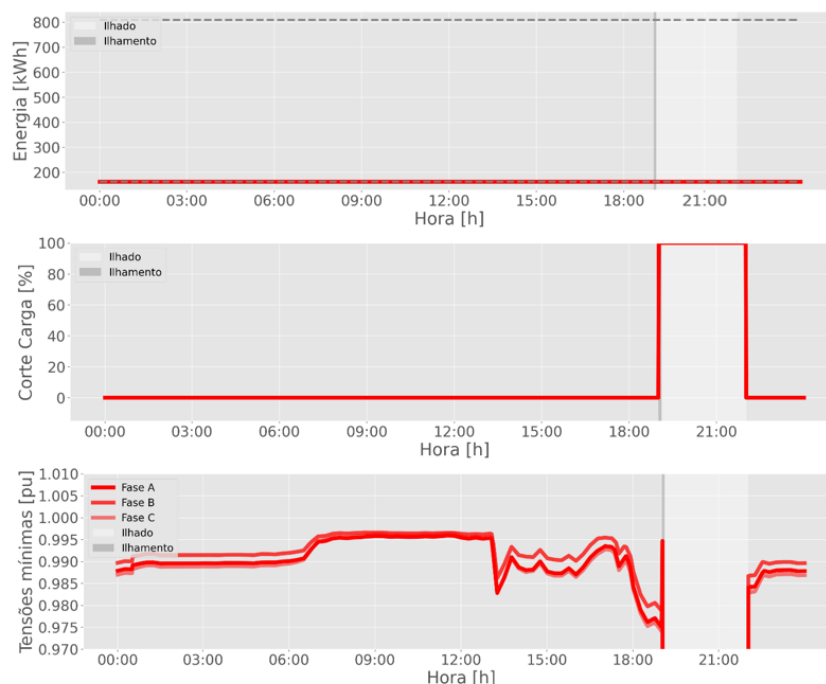


Figura 8 – Energia do BESS, corte de carga e tensões no PAC: caso VI e contingência às 19 horas. Neste cenário, conforme ilustrado na Figura 8, o BESS encontra-se em seu SoC mínimo de 20% no momento do início da contingência, o que impossibilita o armazenamento de suprir qualquer parcela da demanda. Essa condição crítica resulta no desligamento imediato da microrrede, já que não há capacidade suficiente para manter os parâmetros operacionais de tensão e frequência dentro dos limites aceitáveis. Após o retorno da rede principal, observa-se a restauração das tensões em toda a área da microrrede, normalizando a operação e reestabelecendo o fornecimento de energia para as cargas conectadas. Esse comportamento destaca a importância de estratégias preventivas que garantam níveis adequados de SoC no BESS antes de uma contingência, bem como a relevância de integrar fontes de geração complementar para melhorar a resiliência do sistema.

#### 2.2.2.7. Resumo dos resultados

Na Tabela 1, é apresentado um resumo dos resultados das operações ilhadas, considerando os seis cenários com diferentes condições de pré-operação de ilhamento. O fator determinante para o desligamento da microrrede foi a violação do SoC mínimo, estabelecido em 20%. Ficou evidente que, se no momento do ilhamento a única fonte disponível for o BESS e este estiver com um SoC próximo ao limite mínimo, a microrrede pode não atender às condições necessárias para a manutenção dos parâmetros de tensão e frequência, resultando no desligamento inevitável.

Por outro lado, nos cenários em que estão disponíveis os recursos de geração FV e o gerador térmico para auxiliar o BESS, a microrrede é capaz de superar as contingências e manter a operação durante o período de ilhamento. No entanto, para os casos em que a geração FV está indisponível, a necessidade de realizar cortes de carga dependerá do valor do SoC do BESS no momento do ilhamento. Esse procedimento visa garantir o balanço de potência e a manutenção dos parâmetros operativos, permitindo a superação das contingências.

Tabela 1 - Resumo dos casos de estudo

Caso	SoC BESS	FV	Gerador	Horário Contingência	Atendimento 100% da carga	Violação
I	100%	Disponível	Disponível	11h	Sim	-
II	100%	Indisponível	Disponível	19h	Não	-
III	20%	Disponível	Disponível	11h	Sim	-
IV	20%	Indisponível	Disponível	19h	Não	-
V	100%	Indisponível	Indisponível	19h	Não	SoC BESS
VI	40%	Indisponível	Indisponível	19h	Não	SoC BESS

### 3. Conclusão

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a resiliência de microrredes frente a diferentes cenários operacionais, com foco na capacidade de manter a estabilidade e o fornecimento de energia durante contingências. A análise considerou variáveis como o estado de carga (SoC, *State of Charge*) do sistema de armazenamento em bateria (BESS, *Battery Energy Storage System*), a disponibilidade da geração fotovoltaica (FV) e do gerador térmico, além de diferentes momentos de ilhamento.

No caso de estudo aplicado à microrrede CampusGRID, os resultados evidenciaram que a interação entre o BESS e a geração FV é determinante para a manutenção das condições operacionais durante contingências. Em cenários críticos, onde o SoC do BESS está próximo ao limite mínimo de 20% e a geração FV está indisponível, a microrrede enfrenta dificuldades significativas para manter níveis adequados de tensão e frequência, sendo necessário realizar cortes de carga. Por outro lado, quando a geração FV e o gerador térmico estão disponíveis, a microrrede apresenta maior resiliência, conseguindo superar as contingências e atender às cargas sem interrupções significativas.

Os resultados destacam a importância de estratégias integradas de gestão de recursos em microrredes, que combinem o uso eficiente do BESS e da geração renovável, minimizando a dependência de geradores térmicos. Este estudo reforça a necessidade de soluções robustas para o planejamento e a operação de microrredes, considerando não apenas a confiabilidade, mas também a sustentabilidade e a eficiência energética.

Como trabalhos futuros, recomenda-se explorar o uso de técnicas de controle em tempo real e análises de cenários com maior variabilidade na geração renovável e nos perfis de carga. Tais abordagens podem contribuir para aprimorar ainda mais a resiliência e a adaptabilidade de microrredes em operações ilhadas e conectadas à rede.

#### 3.1. Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Bolsas: 2023/13444-6 e 2022/03441-7; e projeto temático: 2021/11380-5). 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.

### 4. Referências bibliográficas

DSS-Python. *Python Bindings for the OpenDSS*. Disponível em: <https://github.com/dss-extensions/dss-python>. Acesso em: 10 jan. 2025.

HOSSAIN, Md Biplob et al. A compensation strategy for mitigating intermittencies within a PV powered microgrid using a hybrid multilevel energy storage system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 4, p. 5074-5086, 2023.

Microrredes. Campus Sustentável Unicamp, 2023. Disponível em: <https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/microrredes/>. Acesso em: 09/01/2025

OpenDSSDirect. *Python Interface for OpenDSS*. Disponível em: <https://github.com/dss-extensions/OpenDSSDirect.py>. Acesso em: 10 jan. 2025.

Python Software Foundation (2023). Welcome to Python. URL: <https://www.python.org/>.

QUADROS, R. *Contribuições ao Planejamento, Projeto e Implantação de Microrredes CA no Contexto Brasileiro: Caso CAMPUSGRID - UNICAMP*. Phd Thesis (PhD Thesis) — Universidade Estadual de Campinas., 2023.

RAHIMINEJAD, Abolfazl et al. Resilience enhancement of Islanded Microgrid by diversification, reconfiguration, and DER placement/sizing. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 147, p. 108817, 2023.

SANTOS, Luiza Higino S. et al. Joint Optimal Sizing and Operation of Unbalanced Three-Phase AC Microgrids Using HOMER Pro and Mixed-Integer Linear Programming. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 35, n. 2, p. 346-360, 2024.

SANTOS, Luiza HS et al. Power Smoothing in Condominium Microgrids ConGRID case study. In: **2023 15th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)**. IEEE, 2023. p. 1-5.

SILVA, Jéssica Alice A. et al. An optimal stochastic energy management system for resilient microgrids. - **Applied Energy**, v. 300, p. 117435, 2021.

SILVA, Jéssica Alice A. et al. Operação Ótima de uma Microrrede em um Campus Universitário. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI**. 2023.

ZIA, Muhammad Fahad; ELBOUCHIKHI, Elhoussin; BENBOUZID, Mohamed. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. **Applied Energy**, v. 222, p. 1033-1055, 2018.

WANG, Sem et al. Analysis of energy storage demand for peak shaving and frequency regulation of power systems with high penetration of renewable energy. **Energy**, v. 267, p. 126586, 2023.