

# MICRORREDES NÃO ISOLADAS PARA MELHORIA DE INDICADORES DE CONTINUIDADE E REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS: EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM ESCALA LABORATORIAL

**Pedro F. Torres** – pftorres@usp.br

**Teddy A. F. Melendez** – tmelendez@iee.usp.br

**Givaldo Reis** – greis@iee.usp.br

**Kauê Novaes** - kauenovaes@gmail.com

**André Mocelin** – mocelin@iee.usp.br

**Roberto Zilles** – zilles@usp.br

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo

**João T. Pinho** – jtpinho@ufpa.br

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo e Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, Universidade Federal do Pará

Subárea: 6.7. Caracterização, análise, equipamentos e sistemas de microrredes.

**Resumo.** *Microrredes não isoladas são aquelas com possibilidade de conectar-se a um sistema interligado de distribuição de maior porte, sendo capazes de operar em modo ilhado, melhorando a confiabilidade do serviço, e também em modo conectado, otimizando a operação dos recursos energéticos a partir do seu controle coordenado voltado à prestação de serviços, elétricos e energéticos, para o sistema de distribuição. Este trabalho ilustra a aplicação de microrredes não isoladas com elevada penetração de recursos energéticos distribuídos a partir de dois tipos de ensaios operacionais em escala laboratorial, de modo a exemplificar o potencial de implementação de microrredes como alternativa no planejamento de melhorias e expansão das redes de distribuição, em zonas urbanas ou rurais. Os sistemas ensaiados são formados por equipamentos comercialmente disponíveis, utilizando tecnologias maduras de controle, geração, armazenamento e conversão de potência, de modo que, do ponto de vista tecnológico, as estratégias exemplificadas são passíveis de implementação em larga escala no curto prazo. Os resultados dos ensaios indicam o potencial de adoção de microrredes para melhoria da confiabilidade do serviço e redução de custos operacionais, mediante a existência de um mecanismo de gerenciamento dos recursos energéticos locais.*

**Palavras-chave:** *Microrredes, Recursos Energéticos Distribuídos, Resposta da Demanda*

## 1. INTRODUÇÃO

Microrredes de distribuição de energia elétrica já são tradicionalmente utilizadas em configuração isolada, ou seja, sem conexão a um sistema elétrico de potência de maior escala. Este tipo de configuração é utilizado em projetos de eletrificação de zonas rurais com baixa densidade demográfica e em regiões geograficamente isoladas. Recentemente, tem-se observado um crescimento no interesse pela aplicação de microrredes em configuração não isolada, isto é, que podem operar no modo conectado a uma rede de distribuição mais ampla e no modo desconectado, operando de maneira ilhada. Microrredes operando em configuração não isolada, usualmente chamadas de microrredes urbanas, vêm sendo consideradas como potenciais habilitadoras do processo de modernização das redes de distribuição, em face da crescente inserção de recursos energéticos distribuídos (RED), e da tendência de operação cada vez mais ativa de agentes conectados na distribuição.

Resumidamente, podem-se classificar os benefícios da aplicação de microrredes não isoladas em duas categorias: (1) aumento de confiabilidade e (2) otimização da gestão eletroenergética dos RED locais (IEC, 2017). O aumento de confiabilidade associado à aplicação de microrredes está vinculado à capacidade de operação ilhada, mediante a disponibilidade de RED despacháveis, incluindo sistemas de armazenamento de energia. Neste sentido, a capacidade de operação autônoma da microrrede durante interrupções no sistema de distribuição pode contribuir para a melhoria dos indicadores de continuidade do serviço dos consumidores atendidos pela microrrede. A respeito da otimização da gestão eletroenergética dos RED conectados à microrrede, dadas as dimensões reduzidas e as fronteiras elétricas claramente definidas, tem-se uma maior capacidade de controle dos ativos de geração, armazenamento e cargas da microrrede por parte de um controlador local, gerenciando estes recursos de maneira coordenada, com vistas à redução dos custos operacionais ao fornecer para a rede de distribuição serviços auxiliares, por exemplo de arbitragem e de resposta da demanda.

Neste sentido, entender a formação de microrredes não isoladas como alternativa no planejamento da expansão da distribuição pode promover a redução de custos de investimento para as distribuidoras e melhorar a qualidade do serviço e do produto aos consumidores e prossumidores. No Brasil, este tipo de alternativa de investimento da distribuidora,

conhecida como *non-wire alternatives* (NWA) (ANEEL, 2021), ainda é pouco adotado. Destaca-se a iniciativa proposta pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) de contratação de geração distribuída com vistas à formação de microrredes (COPEL, 2020), por meio de chamada pública autorizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em caráter experimental de *sandbox* regulatório (ANEEL, 2020). Nessa chamada, buscou-se a contratação de geradores despacháveis com potência instalada de 1 MW a 30 MW, capazes de garantir o suprimento por no mínimo 5 horas ininterruptas, como alternativa na expansão da distribuição visando à melhoria de indicadores de continuidade em regiões prioritárias da área de concessão da distribuidora.

É importante destacar que, do ponto de vista técnico, ainda existem diversos desafios associados à implantação de microrredes não isoladas, principalmente no que diz respeito aos transitórios durante as etapas de ilhamento e reconexão ao sistema de distribuição. Além disso, dadas a grande diversidade de possibilidades de operação e gerenciamento dos RED em microrredes e a dependência que uma estratégia otimizada de gerenciamento tem em relação ao modelo regulatório ao qual a microrrede está submetido, verifica-se a importância de estudos associados à operação prática de microrredes em diferentes contextos e cenários operacionais.

Neste trabalho, apresentam-se dois exemplos de aplicação de uma microrrede não isolada em escala laboratorial, a partir da avaliação experimental de uma microrrede com elevada penetração de RED em diferentes cenários operacionais. Assim, objetiva-se exemplificar o potencial de adoção de microrredes como alternativa no planejamento de sistemas de distribuição, considerando a utilização de equipamentos comercialmente disponíveis e de estratégias simples de gerenciamento centralizadas. Na Seção 2 faz-se uma breve caracterização das aplicações de microrredes não isoladas no contexto brasileiro, seguida da apresentação dos resultados dos testes de operação da microrrede na Seção 3. Por fim, as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros sobre o tema são apresentadas na Seção 4.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS APLICAÇÕES DE MICRORREDES NÃO ISOLADAS NO CONTEXTO BRASILEIRO

De maneira geral, microrredes não isoladas têm sua aplicação voltada à melhoria da confiabilidade e à redução de custos operacionais. No contexto nacional ainda são pouco exploradas as aplicações de microrredes voltadas a estes serviços. Entretanto, nos últimos anos percebe-se um crescimento no interesse por parte do órgão regulador e das distribuidoras, principalmente associado ao crescimento significativo da geração distribuída e à perspectiva de integração de RED, como: sistemas de armazenamento atrás do medidor, veículos elétricos, entre outras tecnologias. Como exemplos deste interesse crescente verifica-se a implementação de projetos-piloto por parte das distribuidoras, como ENEL-SP (ENEL, 2020), CPFL (CPFL, 2020) e COPEL (COPEL, 2021), bem como ações recentes da ANEEL (ANEEL, 2020; ANEEL, 2021a). Na academia destacam-se, dentre outras, a tese de Bellido (2018), que apresentou uma proposta de implementação de microrredes no Brasil, e a dissertação de Cipolla (2021), que desenvolveu um índice de viabilidade de microrrede com base em critérios técnicos, econômicos e sociais.

### 2.1 Melhoria dos indicadores de continuidade do serviço

Os principais indicadores de continuidade do serviço utilizados para qualificar o desempenho das distribuidoras no Brasil são o DEC (indicador de duração equivalente de interrupções) e o FEC (indicador de frequência equivalente de interrupções). Na prática, estes indicadores são utilizados para calcular a componente de qualidade (Q) do Fator X a cada ciclo de revisão tarifária periódica das concessionárias de distribuição. Desse modo, os indicadores coletivos de qualidade do serviço são utilizados para incentivar melhorias nas redes de distribuição, uma vez que concessionárias que extrapolem os limites de DEC e FEC em suas áreas de concessão são penalizadas financeiramente.

Além dos indicadores coletivos, a ANEEL também utiliza os indicadores individuais DIC (duração individual de interrupção) e FIC (frequência individual de interrupção) como forma de incentivar a qualidade do serviço por parte das distribuidoras. Consumidores com DIC e FIC superiores aos limites estabelecidos pela agência reguladora devem ser ressarcidos pela distribuidora. Lamin e Lemos (2019) consideram que os ressarcimentos pagos pelas distribuidoras são expressivos, sendo que no período entre 2010 e 2018 um montante de 4,1 bilhões de reais foi repassado aos consumidores expostos a níveis ruins de qualidade.

Neste sentido, as distribuidoras investem parte de sua base remuneratória em ativos associados à melhoria das redes de distribuição, visando, dentre outros fins, à redução da frequência e da duração de interrupções no fornecimento. Considerando os investimentos planejados no horizonte 2021 – 2025 no Plano de Desenvolvimento da Distribuição (ANEEL, 2021b), cerca de 26,7 bilhões de reais serão destinados pelas distribuidoras às obras de melhorias na rede, o que equivale a cerca de 25 % do CAPEX previsto no período. O histórico de evolução dos indicadores de DEC e FEC médios das distribuidoras brasileiras apresenta uma tendência recente de melhoria no nível de continuidade do serviço, o que é um indicativo dos efeitos positivos associados aos investimentos tradicionais em melhorias de rede e em gestão.

A esse respeito, entende-se que a formação de microrredes não isoladas pode ser uma alternativa no planejamento e operação das redes de distribuição, tendo em vista os seguintes aspectos:

- Os montantes expressivos relacionados a penalidades por violação de DIC e FIC e a investimentos em melhorias de rede;
- De acordo com a teoria da Fronteira de Possibilidades de Produção (FPP), no extremo, ou seja, para elevados níveis de confiabilidade no serviço de distribuição, os esforços de captura de incentivos (incentivos regulatórios

vinculados ao Fator X e ao montante de ressarcimentos por violação de DIC e FIC) tendem a progredir de “melhorias de gestão” para “melhorias tecnológicas” (Lamin e Hugo, 2019).

Para que microrredes possam contribuir para a melhoria da continuidade do serviço, deve-se garantir o atendimento às cargas internas da microrrede desde o momento da interrupção do serviço na rede de distribuição até o seu restabelecimento. Nesse sentido, a microrrede deve dispor de capacidade de suprimento tanto em termos de potência quanto em termos de energia, devendo-se levar em consideração as capacidades de armazenamento, geração, e deferimento de cargas não críticas. A transição de modo de operação conectado para modo ilhado pode ocorrer de duas formas: sem interrupção no atendimento às cargas ou com interrupção. A transição sem interrupção ocorre quando o equipamento formador da microrrede opera em modo UPS (*Uninterruptible Power Supply*) e está geralmente associado a um sistema de armazenamento de energia com baterias. Na transição com interrupção, o equipamento formador da microrrede deve ter capacidade de autorrestabelecimento (*black start*) de modo que a microrrede fica desenergizada até a entrada em serviço da fonte local. Neste sentido, a transição com interrupção deve ocorrer em um intervalo máximo de 3 minutos para que a interrupção não seja contabilizada para indicadores de continuidade.

Outro fator que deve ser levado em consideração ao se planejar a implementação de microrrede para aumento da confiabilidade corresponde ao nível de abrangência da microrrede em um contexto de distribuição, podendo-se classificar em microrrede de subestação primária, de alimentador primário, de alimentador secundário ou de consumidor, dependendo do alcance e do ponto de conexão do recurso formador da microrrede (RFM). Os diferentes níveis são ilustrados na Fig. 1. O RFM corresponde ao ativo de geração e/ou armazenamento que opera como fonte de tensão formadora da microrrede quando em operação ilhada. Contudo, é importante destacar que o RFM não é necessariamente o único recurso de geração ou armazenamento a operar na microrrede.

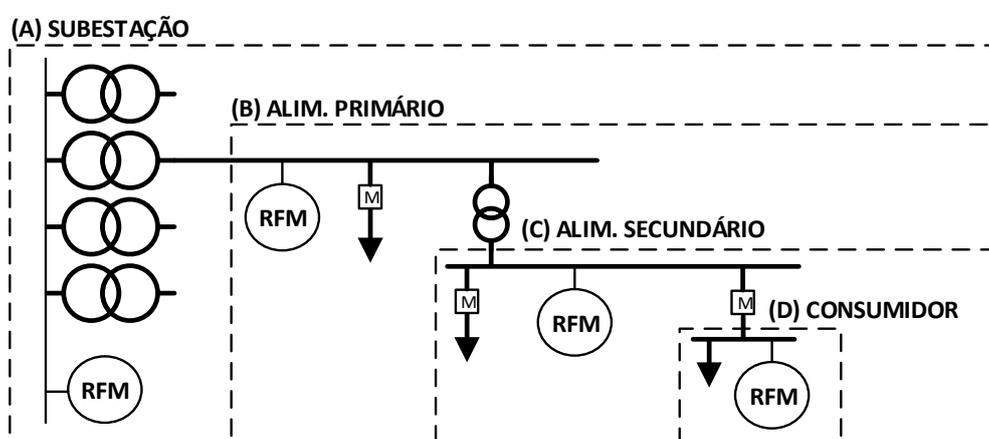


Figura 1 – Níveis da microrrede (a) subestação, (b) alimentador primário, (c) alimentador secundário e (d) consumidor.

É evidente que microrredes de maior nível hierárquico (*e.g.* de subestação ou de alimentador primário) têm maior potencial de melhoria de indicadores de continuidade, uma vez que podem atender um maior número de consumidores. Por outro lado, essas microrredes também estão mais sujeitas a faltas internas, além de necessitarem de RED de maior porte e maior infraestrutura de gerenciamento e controle. Neste sentido, a decisão da distribuidora acerca da implementação da microrrede e de seu nível deve ser subsidiada por estudo de viabilidade, comparando as diversas alternativas entre estratégias tradicionais de melhorias de rede e/ou implementação de microrredes e considerando a disponibilidade ou o potencial de utilização de RED.

## 2.2 Redução de custos operacionais

A possibilidade de agregação de RED e de cargas, quando operadas dentro de uma microrrede, pode permitir um ganho de flexibilidade operacional que vem sendo cada vez mais valorizado pelas distribuidoras e até mesmo pelo operador nacional do sistema elétrico. O potencial ganho de flexibilidade na operação em microrrede está associado à capacidade de controle coordenado dos RED e cargas, respondendo a sinais de preço ou a incentivos econômicos e situações de contingência. Dentre as possibilidades de flexibilização na operação dos RED, destaca-se o potencial de participação em programas de resposta da demanda. Este tipo de programa permite a redução de custos de geração, ao promover a redução da demanda de ponta do sistema, e também pode ser adotado como forma de deferir investimentos em aumento da capacidade de ativos nas redes de distribuição.

No Brasil, a estrutura de tarifa branca é o programa de resposta da demanda aplicável para consumidores do grupo B. Esta estrutura tarifária divide as 24 horas do dia em três postos tarifários: ponta, intermediário e fora da ponta, conforme indicado na Tab. 1, considerando os horários e valores praticados pela ENEL-SP, em 2021. Para consumidores do grupo A, a estrutura de tarifação horo-sazonal já vem sendo aplicada com sucesso e é considerada responsável por deslocar a ponta de carregamento do SIN para o meio da tarde em alguns meses do ano (EPE, 2019). Além disso, o recente programa de redução voluntária da demanda (RVD) aplicável a consumidores do grupo A visa reduzir ainda mais o custo

operacional da geração. Neste sentido, microrredes a nível de subestação e de alimentador primário poderiam ser utilizadas como forma de agregar RED e cargas do grupo B para participar de programas de resposta da demanda análogos aos aplicáveis aos consumidores do grupo A. Adicionalmente, microrredes a nível de alimentador secundário e de consumidor podem ser utilizadas em um contexto tarifário análogo ao existente de tarifa branca.

Tabela 1 – Estrutura de tarifa branca para a ENEL-SP em 2021.

TARIFAS PARA O SUBGRUPO B1 DA ENEL-SP (2021)		
Tipo de Tarifa	Horário	Valor (R\$/kWh)
Convencional	-	0,594
Branca - Fora da Ponta	00h00 - 16h29 / 21h30 - 23h59	0,499
Branca - Intermediária	16h30 - 17h29 / 20h30 - 21h29	0,724
Branca - Ponta	17h30 - 20h29	1,115

### 3. TESTES DE APLICAÇÃO EM ESCALA LABORATORIAL

Para demonstrar o potencial de implementação de microrredes considerando as duas classes de aplicações analisadas neste trabalho, foram realizados ensaios utilizando a estrutura laboratorial de microrredes do LSF-IEE-USP, descrita a seguir. Os exemplos de aplicação têm como base os potenciais usos de microrredes não isoladas no contexto nacional, considerando cenários operacionais em uma microrrede a nível de alimentador secundário.

#### 3.1 A infraestrutura laboratorial de microrredes do LSF-IEE-USP

O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (LSF-IEE-USP) tem uma infraestrutura para realização de ensaios operacionais de sistemas híbridos de geração e microrredes. Esta estrutura dispõe de sistemas de geração fotovoltaica, com capacidade instalada de 12,5 kWp, em diferentes configurações com acoplamento c.c. e c.a. Além disso, é possível integrar um grupo gerador a diesel (GGD) de 40 kVA e emular a operação de um aerogerador de 5 kW. A capacidade total de armazenamento eletroquímico em baterias de chumbo-ácido é de 68 kWh. O sistema é responsável por atender as cargas internas do laboratório (iluminação, condicionamento de ar, computadores, etc.), além de cargas acionáveis remotamente por meio de relés (cargas resistivas, lâmpadas e ventilador). A descrição detalhada da estrutura laboratorial de microrrede do LSF-IEE-USP é apresentada na dissertação de Souza (2018), e os trabalhos de Manito (2017a), Manito (2017b), Souza (2018) e Torres (2021) demonstram sua aplicação em diferentes contextos operacionais.

A Fig. 2 ilustra a configuração utilizada da microrrede do LSF nos ensaios propostos neste trabalho. O conversor bidirecional de três portas (duas portas CA, e uma porta CC) opera como RFM, de modo que, em operação conectada, as portas CA-in e CA-out estão interconectadas e a chave de transferência está na posição REDE. Em operação ilhada, o RFM pode operar de duas formas: mantendo as portas CA-in e CA-out interconectadas e utilizando o GGD como fonte (chave de transferência na posição GGD), ou desconectando a porta CA-in e formando a microrrede a partir do banco de baterias (BB). Destaca-se que nesta configuração o RFM opera como UPS, uma vez que em evento de interrupção na rede de distribuição, o RFM transfere automaticamente sua operação para o modo microrrede via banco de baterias. As orientações das setas junto aos medidores ilustrados na Fig. 2 indicam o sentido positivo das medições apresentadas neste trabalho. Por exemplo, valores negativos de potência observados nos pontos de conexão dos prossumidores, indicam sentido prossumidor → microrrede, já valores positivos observados nos pontos de conexão de fontes de geração distribuída indicam sentido fonte → microrrede.

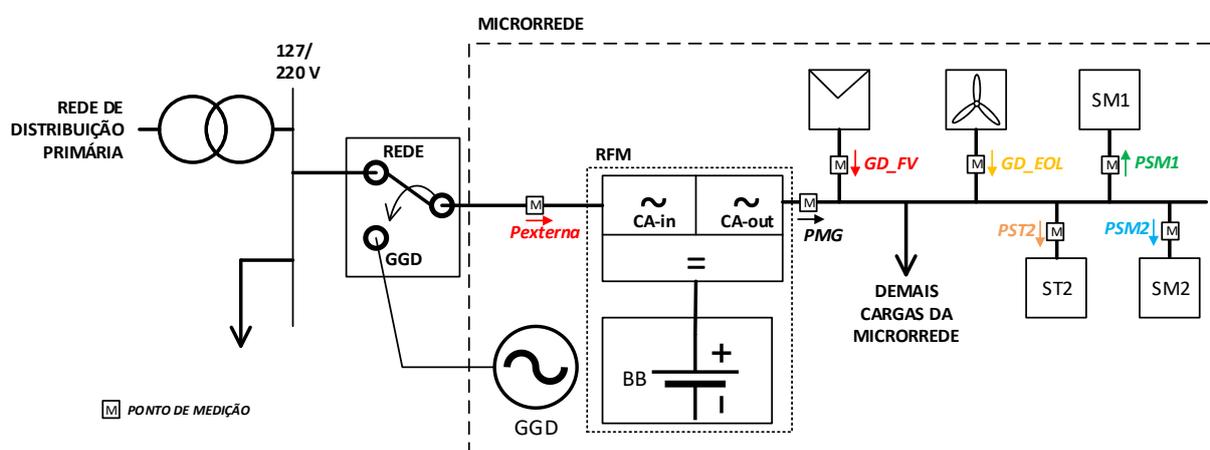


Figura 2 – Configuração da microrrede do LSF-IEE-USP utilizada nos ensaios deste trabalho.

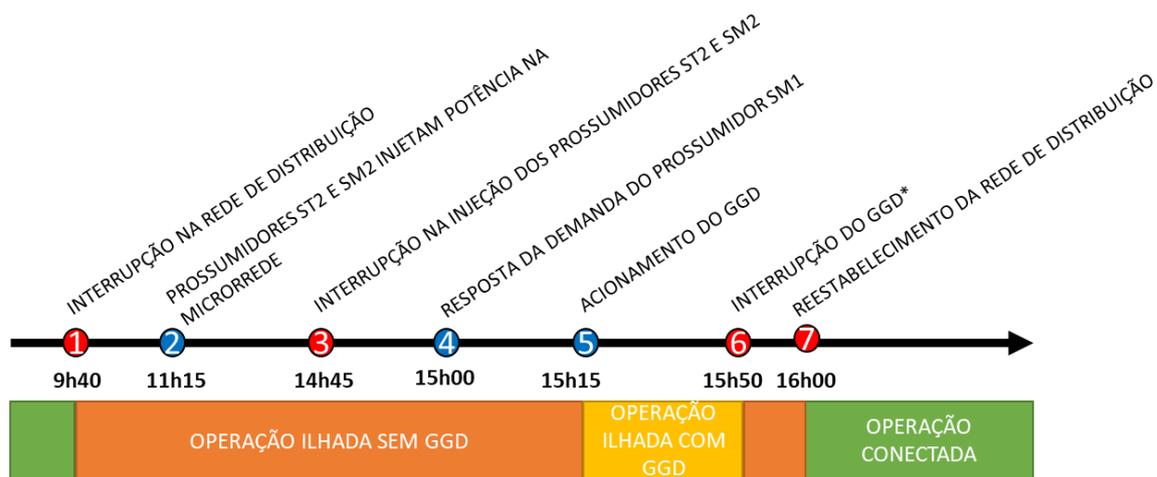
A microrrede formada na configuração indicada na Fig. 2 é de nível alimentador secundário, operando em baixa tensão (127/220 V). Nota-se que a microrrede não abrange todas as cargas do alimentador, limitada a atuar no ramal que atende os prossumidores ST2, SM1 e SM2 (prossumidores trifásico e monofásicos, respectivamente, todos com cargas, geração fotovoltaica e armazenamento próprios) e as demais cargas da microrrede. Além disso, dois sistemas de geração distribuída estão conectados neste ramal: um gerador fotovoltaico (GD-FV) de 3 kWp e um gerador eólico (GD-EOL) de 1,5 kW emulado a partir de uma fonte c.c. programável associada a um inversor de conexão à rede. A Tab. 2 resume as principais características dos prossumidores que operam na microrrede.

Tabela 2 – Principais características dos prossumidores da microrrede.

Prossumidor	Geração	Armazenamento	Carga
ST2	2,8 kWp	48 V/ 220 Ah	Carga resistiva (até 10 kW) e Lâmpadas c.a. (600 W) – com acionamento remoto por meio de relés
SM1	1,28 kWp	48 V/ 220 Ah	Carga c.c. eletrônica ajustável de até 3 kW
SM2	0,4 kWp	48 V/ 220 Ah	Carga Resistiva c.c. (500 W) e Lâmpadas e Ventilador c.a. (200 W) - com acionamento remoto por meio de relés

### 3.2 Ensaio em operação ilhada: melhoria dos indicadores de continuidade do serviço

Este ensaio foi realizado para demonstrar como o controle coordenado dos RED em uma microrrede pode melhorar o grau de confiabilidade do sistema, especificamente contribuindo para o aumento do tempo de autonomia da microrrede em operação ilhada. Neste sentido, emulou-se uma interrupção de longa duração no ramal da rede de distribuição ao qual a microrrede está conectada, e adotou-se uma simples estratégia de gerenciamento dos RED com base em comandos do RFM aos prossumidores e ao GGD. A sequência dos eventos emulados neste ensaio está ilustrada na Fig. 3.



\*a interrupção do GGD ocorreu por falta de combustível

Figura 3 – Sequência de eventos do ensaio de operação ilhada.

Os eventos indicados com um círculo vermelho são independentes da ação do controlador da microrrede; por outro lado, os eventos indicados com um círculo azul foram gerados a partir de comandos do controlador, com base no estado de carga do sistema de armazenamento do RFM ( $SOC_{RFM}$ ), considerando a seguinte lógica:

- Caso  $SOC_{RFM} < 85\%$ , solicitar a injeção de potência (*grid-feeding*) de prossumidores para reduzir o carregamento da microrrede;
- Caso  $SOC_{RFM} < 75\%$ , solicitar a redução de demanda de prossumidores para reduzir o carregamento da microrrede;
- Caso  $SOC_{RFM} < 65\%$ , acionar o GGD até o restabelecimento da rede de distribuição.

O resultado deste ensaio é apresentado na Fig. 4, que indica as potências demandadas ou injetadas por cada prossumidor ( $P_{ST2}$ ,  $P_{SM1}$ ,  $P_{SM2}$ ), o  $SOC_{RFM}$ , a potência demandada da fonte externa ( $P_{externa}$ , que pode ser da rede de distribuição ou do GGD), e a potência total da microrrede ( $P_{MG}$ ), que abrange as contribuições dos prossumidores, das fontes distribuídas e das demais cargas da microrrede.

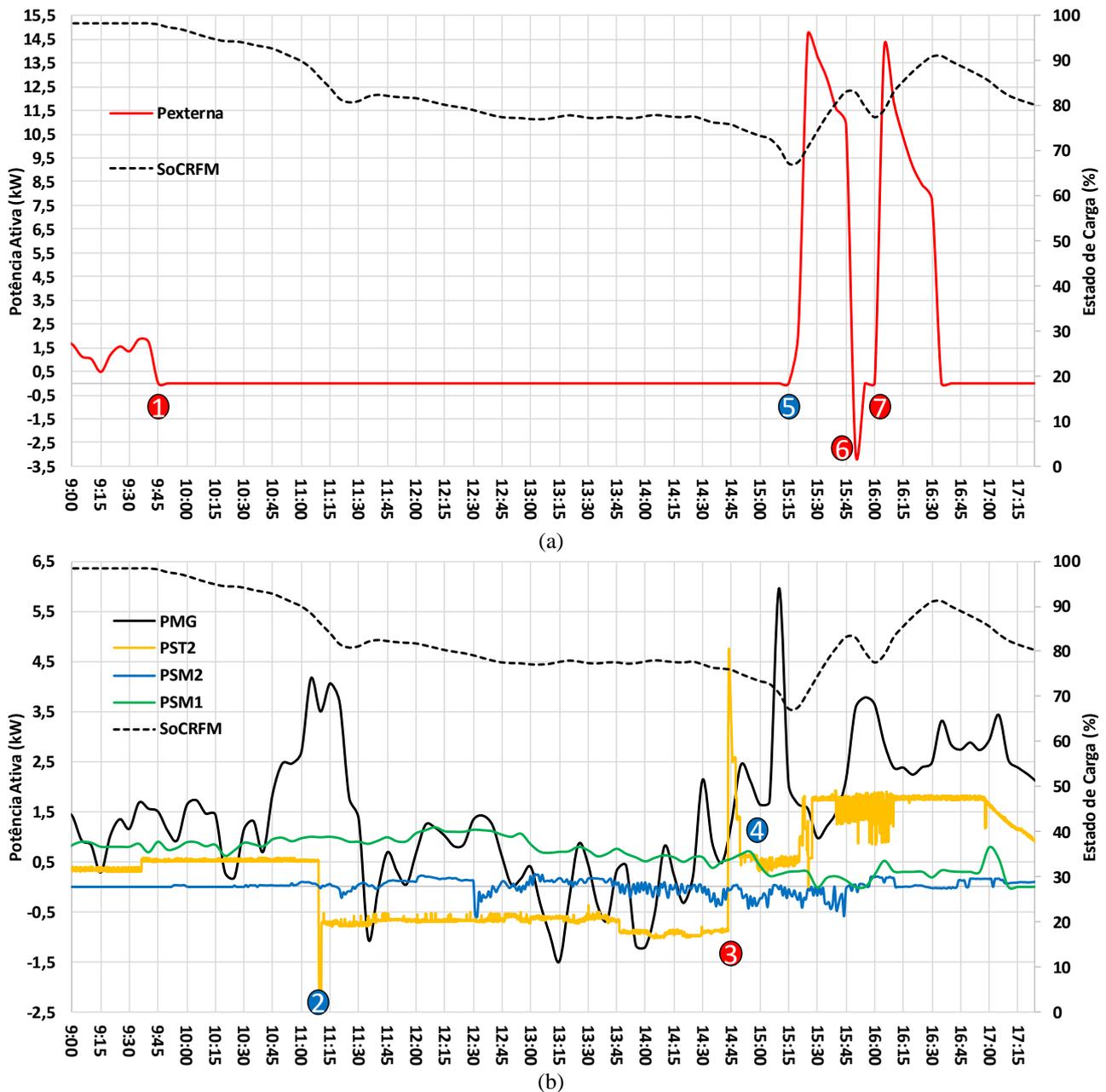


Figura 4 – Resultado do ensaio de operação ilhada: (a) potência ativa da fonte externa (rede ou GGD) e estado de carga do RFM e (b) potência ativa da microrrede e dos prossumidores.

A partir da análise da Fig. 4, pode-se perceber a importância dos comandos do RFM (eventos 2, 4 e 5) para garantir a autonomia da microrrede durante a operação ilhada. Destaca-se o evento 2, em que o prossumidor ST2, que estava demandando cerca de 500 W da microrrede, passou a injetar cerca de 600 W, contribuindo para a redução da taxa de descarga do banco de baterias do RFM. Contudo, dada a limitação do armazenamento do prossumidor ST2 e considerando a sua demanda interna, a injeção de potência só foi possível até as 14h45 (evento 3), momento em que este prossumidor voltou a demandar potência da microrrede e acelerar a taxa de descarga do banco de baterias do RFM. Também é importante notar que o prossumidor SM2 não conseguiu responder adequadamente à solicitação de injeção de potência, conforme indicado em detalhe na Fig. 5(a). Isto ocorreu devido à demanda interna deste prossumidor durante a solicitação de injeção na rede, que limitou a sua capacidade de atuação, principalmente entre 11h30 e 12h30 e entre 13h00 e 13h45.

Com o aumento da taxa de descarga do banco de baterias, fez-se necessário solicitar a redução de demanda dos prossumidores (evento 4). Neste caso, observou-se a resposta do prossumidor SM1, apresentada em detalhes na Fig. 5(a), reduzindo sua demanda ( $DEM_{SM1}$ ) de cerca de 750 W para próximo de 300 W. Apesar disso, esta resposta não foi suficiente, dado o elevado carregamento das demais cargas da microrrede (equipamentos de condicionamento de ar, iluminação, computadores, etc). Assim, fez-se necessário acionar o GGD (evento 5), que operou por cerca de 35 minutos. O evento 6 correspondeu à perda de geração do GGD, devido à falta de combustível. Este foi um evento crítico do ponto de vista da estabilidade da microrrede, que passou a injetar potência e motorizar o GGD ( $P_{externa}$  negativa indicada na Fig. 4). Após a atuação da proteção e a desconexão do GGD, a microrrede operou por alguns minutos de maneira ilhada

até o reestabelecimento da rede de distribuição (evento 7). Ressalta-se que nenhum dos eventos incorreu em interrupção no fornecimento às cargas internas da microrrede.

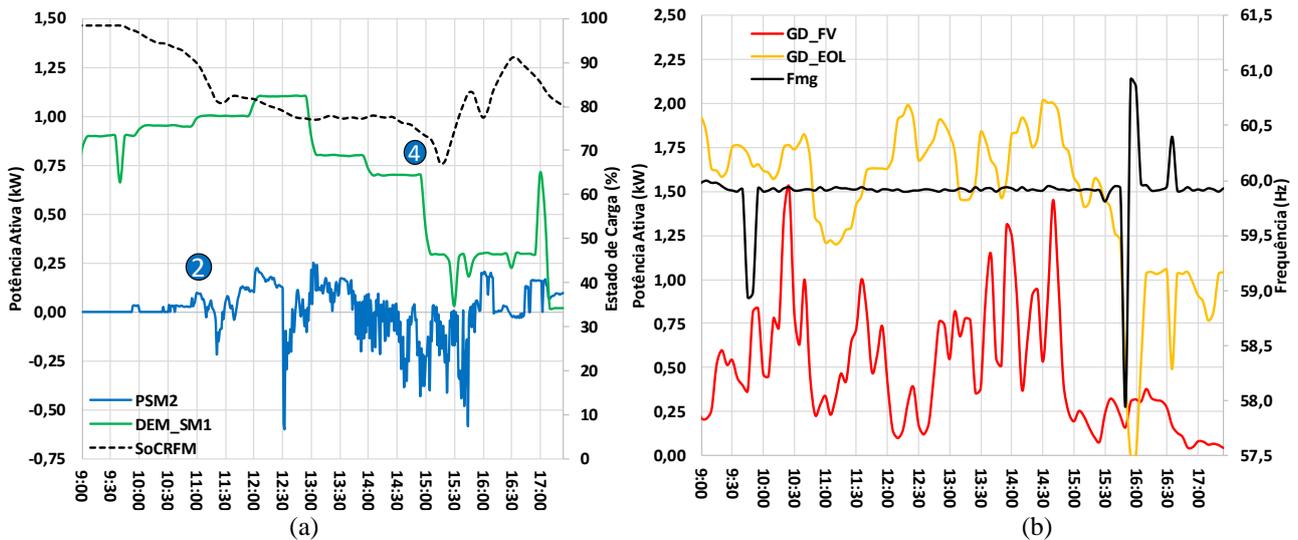
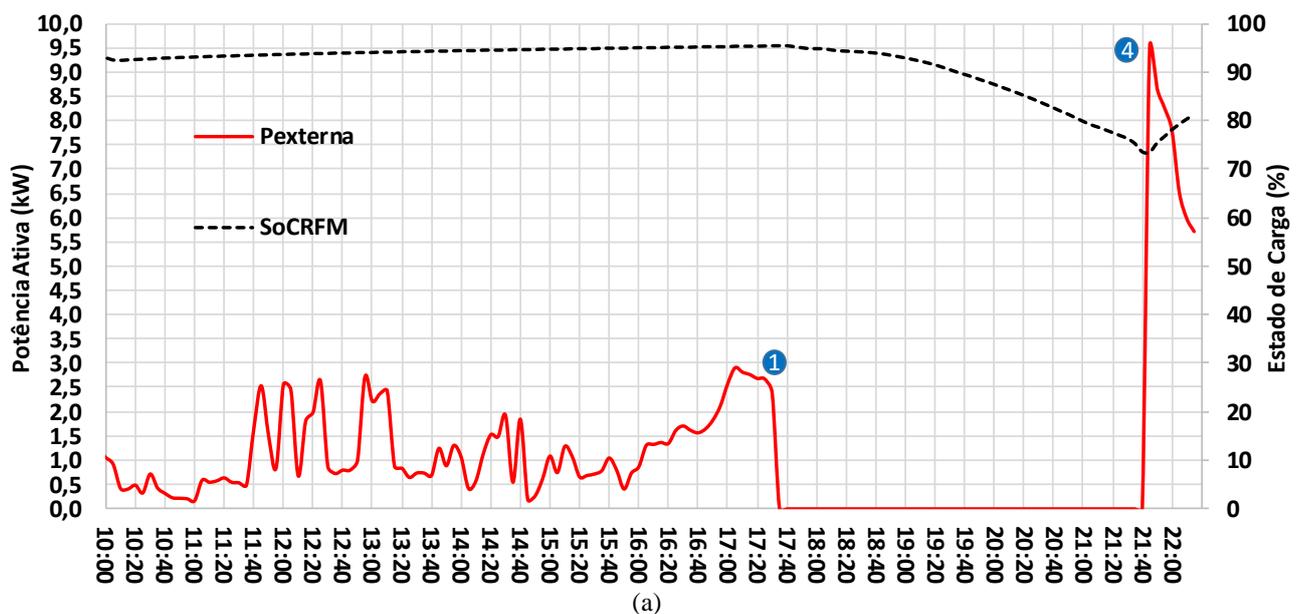


Figura 5 – (a) Detalhe da operação dos prossumidores SM1 e SM2 e (b) Potência ativa das fontes de geração distribuída.

Também é importante destacar a contribuição da geração distribuída durante a operação ilhada, conforme ilustrado na Fig. 5(b), para as fontes eólica (emulada por meio de fonte c.c.) e fotovoltaica. O ensaio foi realizado em um dia bastante nublado (com irradiação global no plano inclinado de 15° N de 2,9 kWh/m<sup>2</sup>), o que explica o perfil de geração fotovoltaica observado na Fig. 5(b). Por outro lado, emulou-se um dia com perfil de geração eólica com elevado fator de capacidade, com injeção de potência bastante consistente ao longo do ensaio. Por volta das 15h50, nota-se a desconexão da geração eólica devido ao problema de instabilidade (elevada variação de frequência de 58 Hz a 61 Hz) durante o evento de motorização do GGD indicado anteriormente.

### 3.3 Ensaio em operação conectada: redução de custos operacionais

Para demonstrar o potencial de utilização de microrredes na otimização da operação conectada, realizou-se ensaio considerando a operação da microrrede laboratorial submetida à estrutura de tarifação do tipo tarifa branca. Neste caso, adotaram-se os postos horários de tarifa intermediária e de ponta correspondentes aos valores em vigência na ENEL-SP, indicados na Tab. 1. A Fig. 6 apresenta as potências ativa em pontos de interesse da microrrede e o estado de carga do RFM ao longo do teste.



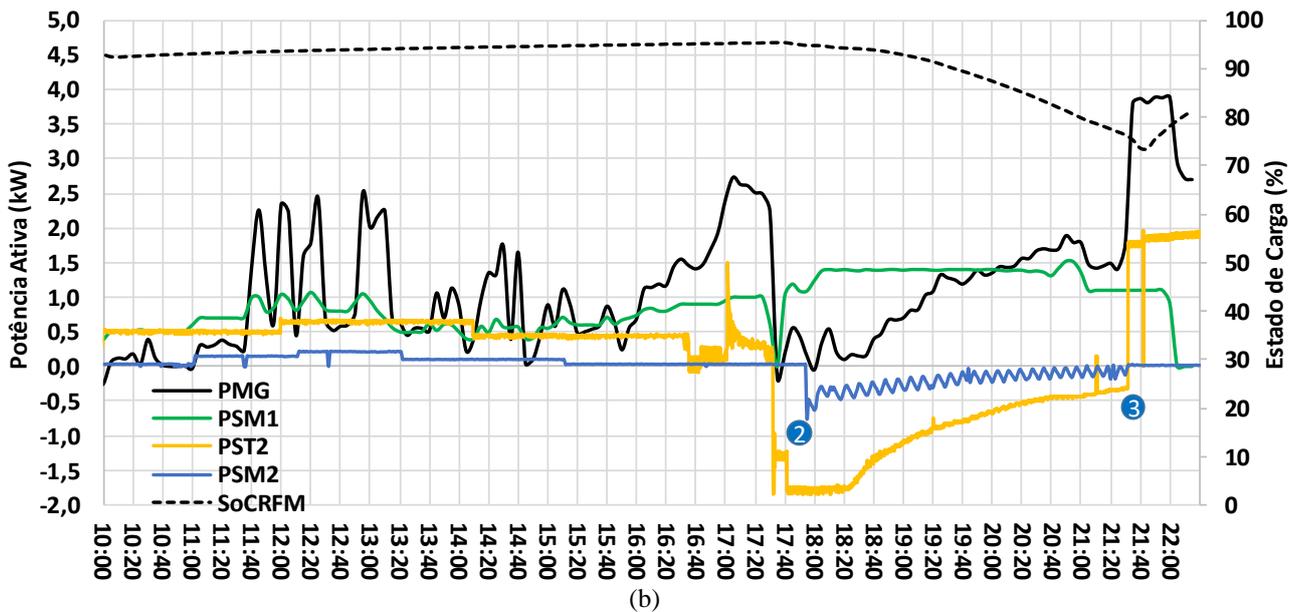


Figura 6 – Resultado do ensaio de operação conectada: (a) potência ativa da fonte externa (rede) e estado de carga do RFM e (b) potência ativa da microrrede e dos prossumidores.

Os pontos indicados por círculos azuis correspondem aos seguintes eventos: (1) início do posto horário intermediário (17h30), o RFM limita a demanda de potência externa e passa a operar com recursos locais, *i.e.*, o banco de baterias do RFM e a injeção de potência dos prossumidores; (2) O RFM solicita a injeção de potência dos prossumidores ST2 e SM2 para reduzir a taxa de descarga do seu banco de baterias, o prossumidor SM1 está com elevado carregamento interno e não é solicitado; (3) retorno ao posto horário fora de ponta (21h30), os prossumidores que estavam injetando na microrrede passam a operar com carga, de modo a recarregar seus bancos de baterias e (4) o RFM interrompe a limitação da demanda de potência externa.

Nota-se que, durante o período de operação com limitação de demanda da fonte externa, boa parte da energia consumida internamente na microrrede foi atendida pelos próprios prossumidores: de aproximadamente 8,77 kWh consumidos no período de 17h30 a 21h30, 4,55 kWh foram supridos pelos prossumidores. Por exemplo, a demanda do prossumidor SM1, de aproximadamente 1,5 kW, inicialmente estava sendo atendida pela injeção dos prossumidores ST2 e SM2. Conforme os bancos de baterias destes prossumidores foram descarregando, percebe-se a redução da potência injetada na microrrede, de modo a manter um nível mínimo de tensão do banco de baterias predeterminado para cada prossumidor. Este comportamento dos prossumidores ST2 e SM2 é indicado em detalhe na Fig. 7. Para o prossumidor ST2, este nível mínimo de tensão foi ajustado em 48,7 V, enquanto para o prossumidor SM2 adotou-se um valor de 50 V. Percebe-se que a tensão mínima mais restritiva adotada pelo SM2 limitou a contribuição deste prossumidor, quando comparada com a injeção de potência do ST2.

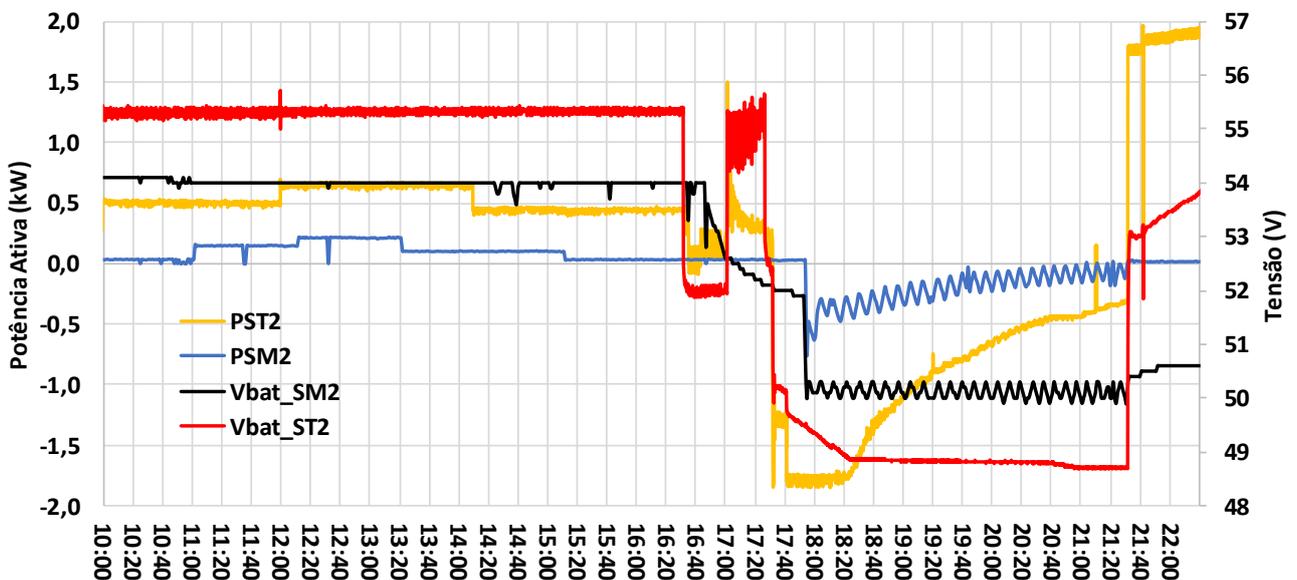


Figura 7 – Detalhe da operação dos prossumidores ST2 e SM2.

Considerando o valor da tarifa aplicada aos postos intermediário e de ponta, a operação em microrrede, eliminando o consumo durante estes postos tarifários, representou uma economia de R\$ 8,10 na operação da microrrede laboratorial, no período do ensaio. A participação dos prossumidores foi fundamental para garantir o atendimento às cargas sem redução significativa do estado de carga do RFM (ao final do período, o banco de baterias do RFM estava com estado de carga de 75 %), o que é importante para garantir a prontidão da microrrede em caso de interrupção no fornecimento da rede de distribuição, conforme observado no ensaio anterior. Ressalta-se que a estratégia de despacho dos prossumidores realizada neste ensaio serve apenas para ilustrar o potencial de aplicação do controle coordenado de RED quando operando em microrrede, não sendo necessariamente a estratégia de menor custo para os prossumidores e para a operação da microrrede como um todo.

Do ponto de vista da qualidade de energia, o controle coordenado dos RED em conjunto com o RFM durante o ensaio de aplicação para redução de custos operacionais conseguiu garantir o suprimento às cargas sem interrupções, observando-se variações de tensão e frequência características do controle *droop* implementado pelo RFM, mas sem comprometer o atendimento às cargas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios apresentados neste artigo demonstram a capacidade de adoção de estratégias de controle coordenado de RED na operação de microrredes não isoladas, considerando aplicações para aumento da confiabilidade em condição de ilhamento, e para redução de custos operacionais, ao prover serviço de resposta da demanda para a rede de distribuição em condição de operação conectada. Os ensaios foram realizados utilizando equipamentos comercialmente disponíveis e estratégias de gerenciamento simples dos RED, com base em critérios predeterminados. Dessa forma, mostra-se que as tecnologias de geração, armazenamento, conversão de potência, comunicação e controle já atingiram estágio de maturidade adequado para a implementação de microrredes, especialmente no que diz respeito a sistemas de pequeno porte, como é o caso da microrrede de alimentador secundário ensaiada em ambiente laboratorial.

No ensaio em operação ilhada, a interrupção de longa duração no sistema de distribuição, com duração superior a 6 h, não afetou a operação das cargas internas da microrrede. Para isso, foi fundamental o gerenciamento energético dos RED por parte do RFM e a capacidade de resposta dos prossumidores, seja em termos de injeção de potência, seja de resposta da demanda. No ensaio de operação conectada, a capacidade do RFM de limitar a potência demandada da rede de distribuição nos postos horários intermediário e de ponta mostrou-se satisfatória ao reduzir os custos energéticos da microrrede. Destaca-se que esta redução de custos foi obtida sem comprometer a confiabilidade da operação, ao manter o estado de carga do RFM suficientemente elevado para atender a microrrede em eventuais interrupções na rede de distribuição.

Os resultados apresentados neste trabalho têm caráter demonstrativo, como prova de conceito das tecnologias e das estratégias para formação e operação de microrredes não isoladas e com RED. Na prática, a tomada de decisão para formação de microrredes como alternativa na distribuição deve ser realizada considerando fatores como o perfil de carga, a disponibilidade de RED, a possibilidade de enquadramento em estrutura tarifária adequada, e a necessidade de aumento de confiabilidade do serviço. Tal avaliação de tomada de decisão no planejamento da expansão e de melhorias das redes de distribuição é bastante complexa, e, por se tratar de um conceito relativamente recente e ainda sem amparo regulatório, a incorporação de microrredes não isoladas no planejamento das distribuidoras brasileiras ainda é inexistente (excetuando-se as iniciativas em projetos-piloto e de pesquisa).

Dessa forma, pretende-se dar continuidade ao trabalho apresentado neste artigo com o objetivo de avaliar o potencial de implementação de microrredes não isoladas no contexto nacional, considerando as diversas realidades das redes de distribuição brasileiras e a possibilidade de adoção de microrredes voltadas às aplicações discutidas nas seções anteriores e demonstradas nos ensaios laboratoriais.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro concedido através do processo 88887.609816/2021-00.

#### REFERÊNCIAS

- ANEEL. Tomada de Subsídio nº11/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, julho de 2021.
- ANEEL. Resolução Autorizativa COPEL, 2020.
- Bellido, M. M. H. Microrredes Elétricas: Uma proposta de implementação no Brasil. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), 2018.
- Cipolla, P. L. M. Avaliação Técnica, Econômica, e Social para a Implantação de Microrredes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Sorocaba: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 2021.

- CPFL. <https://www.cpf.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Paginas/pb026-estudos-dos-impactos-da-insercao-de-microrredes-e-microgeracao-em-sistemas-de-distribuicao.aspx>
- COPEL. Chamada Pública Copel DIS GD001/2020 – Compra de Energia Elétrica de Geração Distribuída. Companhia Paranaense de Energia. Novembro de 2020.
- COPEL. <https://www.copel.com/hpcweb/copel-e-itaipu-colocam-microrrede-em-operacao-no-oeste-do-pr/>
- ENEL. <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Sustentabilidade/iniciativas/archive/projeto-microrredes-inteligentes-traz-inovao-para-o-mercado-de-energia-brasileiro.html>
- EPE. Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético. Nota Técnica EPE-DEE-NT-022/2019-r0, 2019.
- IEC. Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. Technical Specification IEC TS 62898-1. Ed. 1.0, maio de 2017.
- Manito, A., Souza, K., Mocelin, A., Melendez, T., Zilles, R., Pinho, J. Integration of autonomous renewable energy generation systems with different topologies in a smart grid cluster to enhance performance in usual operational situations. Solar World Congress, Abu Dhabi, 30 out. 2017a.
- Manito, A., Souza, K., Mocelin, A., Melendez, T., Zilles, R., Pinho, J. Laboratory Infrastructure for Research and Capacity Building on Isolated and Grid-Connected Smart Micro-Grids. European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Amsterdam, 26 set. 2017b.
- Souza, K. Implementação de Infraestrutura Laboratorial para Análise Operacional e Capacitação em Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade. São Paulo: Universidade de São Paulo, v. Dissertação (Mestrado em Energia), 2018.
- Souza, K., Manito, A., Melendez, T., Mocelin, A., Zilles, R., Pinho, J. Geração Distribuída com Armazenamento Conectada à Rede Elétrica. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, abril de 2018.
- Torres, P., Souza, K., Manito, A., Zilles, R., Pinho, J. Practical Insights for Microgrid Operation with Energy Management Capable Prosumers. Solar World Congress, *Online*, 25-29 out. 2021.

#### **NON-ISOLATED MICROGRIDS TO ENHANCE CONTINUITY INDICATORS AND REDUCE OPERATIONAL COSTS: EXAMPLES OF LABORATORY-SCALE APPLICATION**

**Abstract.** *Non-isolated microgrids are those with the possibility of connecting to a larger interconnected distribution system, being able to operate in islanded mode, thus improving service reliability, and also in grid-connected mode, optimizing the operation of its energetic resources through coordinated control to provide electrical and energy services to the distribution system. Two types of laboratory scale operational tests are presented in this work to illustrate the application of non-isolated microgrids with high penetration of distributed energy resources, in order to exemplify the potential for implementing microgrids as an alternative in the network distribution planning, in both urban and rural areas. The tested systems are formed by commercially available equipment, using mature technologies of control, generation, storage and power conversion, so that, from a technological point of view, the strategies exemplified in this work are capable of large-scale implementation in the short term. The test results indicate the potential for adopting microgrids to improve service reliability and reduce operating costs, given the existence of a mechanism for managing local energy resources.*

**Key words:** *Microgrids, Distributed Energy Resources, Demand Response*