

# Desenvolvimento de hardware para balanceamento de fases em microrredes isoladas<sup>\*</sup>

Gabriel de Sousa<sup>\*</sup> Shigeaki Leite de Lima<sup>\*\*</sup>  
Osvaldo Saavedra<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,  
MA, (e-mail: gabrisousa27@gmail.com).

<sup>\*\*</sup> Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,  
MA (e-mail: shigeaki.lima@ufma.br)

<sup>\*\*\*</sup> Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,  
MA (e-mail: o.saavedra3@ieee.org.br)

---

**Abstract:** The increase of Distributed Generation (DG) in the National Interconnected System, associated with smart grid concept, increasingly present, the smart microgrids, (i.e., blocks that integrate a smartgrid), have been incorporated in several countries as in Brazil. There are advances on Solar DG for residential use, where the power generation is injected directly into the distribution network, from which the phases current balance control is directly associated with the connected phase on the consumer unit, controlled by the distribution company. However, there are particular cases, the isolated microgrids those that are not connected to the distribution network, having their own generation, through solar or wind generation or hybrid systems, with bank of batteries and converters for the network formation. In these cases, the phases current balance control becomes important, once the converters are set as a form of protection, not allowing overloads above 25 % per phase. This paper presents the hardware development for automatic phase balancing, in order to preserve the (life) of the converters, besides reducing the number of disconnections due to overload, and decrease (the losses) at the connection point with the microgrid.

**Resumo:** Com o aumento na Geração Distribuída (GD) no Sistema Interligado Nacional (SIN) associado ao conceito das Redes Elétricas Inteligentes (REI) que se tornam cada vez mais presente, as microrredes inteligentes, ou seja, blocos que compõe uma REI, têm surgido em várias países e com alguma penetração no Brasil. Há um avanço da GD Solar para uso residencial, no qual a geração de energia é injetada diretamente na rede de distribuição, sendo que o controle do balanceamento de corrente nas fases está diretamente associado a fase que a unidade consumidora está conectada, havendo um controle por parte da empresa de distribuição. Todavia, há casos particulares que são as microrredes isoladas, ou seja, aquelas que não estão conectadas a rede de distribuição, possuindo geração própria, por meio de geração solar ou eólica ou sistemas híbridos, e com banco de baterias e conversores para à formação da rede. Nesses casos o controle do balanceamento de corrente nas fases se torna importante, uma vez que os conversores são setados, como forma de proteção, a não permitir sobrecargas acima de 25 % por fase. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento do hardware para o balanceamento automático de fases, de forma a preservar a vida útil dos conversores, reduzir o número de desligamentos por sobrecarga, além de reduzir as perdas no ponto de conexão da microrrede.

*Keywords:* phase balancing; isolated microgrids; Distributed Generation; hardware;

*Palavras-chaves:* balanceamento de fases; microrredes isoladas; geração distribuída; hardware.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As redes elétricas inteligentes (REI) têm saído do campo conceitual e passado para aplicações reais nos sistemas elétricos. As REI's ou em inglês (SMARTGRIDS) estão na vanguarda dos sistemas elétricos modernos, o qual implica em modernização das redes elétricas, associando a geração distribuída (GD), o armazenamento (bancos

de baterias) e gestão de todos esses elementos dentro de um mesmo sistema. Um destaque das redes inteligentes são as camadas que estão associadas a rede, desde as estruturas físicas, a automação dos processos e a camada de inteligência para tomada de decisão.

Todavia, as redes elétricas inteligentes são formadas por um conjunto de sistemas físicos que permitem a integração entre diversos agentes, sendo sub divididas em sistemas menores, denominados de microrredes, embora esse con-

---

<sup>\*</sup> Agradecemos ao CNPQ, pelo aporte financeiro.

ceito pode ser expandido até as nanorredes. As microrredes, podem de forma análoga, serem representadas por um conjunto de cargas (bairro residencial, uma pequena empresa, etc.) que podem possuir geração e armazenamento próprio, capacidade de ilhamento e reconexão a rede principal, intercâmbio de energia, entre outras ações.

Com o aumento da geração distribuída fotovoltaica para uso urbano, os consumidores residenciais, em grande maioria, foram transformados em “prosumidores” (Rathnayaka et al., 2011), ou seja, agentes capazes de gerar e consumir a própria energia elétrica e desta forma, permitem um aumento das microrredes dentro do centros urbanos. Não obstante esse conceito das microrredes têm alcançado o seguimento rural com a implantação de microrredes isoladas, ou seja, aquelas que estão fora do alcance da rede elétrica convencional, tendo como formador de rede, uma fonte ou outra fonte de energia (solar, eólica, híbridos), grupo geradores ou sistemas de armazenamento.

No estado do Maranhão existem dois sistemas que se enquadram na categoria de microrredes isoladas, o primeiro localizada na Ilha do Lençóis, município de Cururupu/MA, atendendo 100 unidades consumidoras (UC) a 10 anos e composta por um sistema de geração híbrido (solar, eólica e diesel) (de Souza Ribeiro et al., 2011). A segunda denominada Ilha Grande, município de Umberto de Campos/MA, atendendo 50 UCs a 5 anos e composta por um sistema de geração híbrido (solar e diesel).

Ambos sistemas devido o formador de rede ser composto por banco de baterias e conversores CC/CA, com uma rede em baixa tensão (380 Vca/60 Hz) e trecho de cabeamento máximo de 500 metros, apresentam algumas peculiaridades inerentes a este tipo de sistema. Uma das peculiaridades são os conversores CC/CA terem as proteções de sobrecarga por fase setados em 25 %. Esta é uma medida padrão utilizado também em grupo geradores, a diferença principal é que os grupo geradores pela natureza eletromecânica conseguem trabalhar mesmo com esses desequilíbrios, já os conversores com desbalanceamento maiores que o valor de referência (25 %) são desligados de forma a proteger o equipamento, o que causa descontinuidade no fornecimento do serviço elétrico.

Com o objetivo de permitir uma melhor readequação das UCs, de forma a garantir um melhor equilíbrio entre as fases, evitando assim as sobrecargas, neste artigo é apresentada a etapa de hardware que foi desenvolvido para ser aplicado nas microrredes isoladas. Essa etapa de hardware permite um balanceamento de cargas automático e inteligente, uma vez que seleciona as melhores UCs a serem mudadas de fase, contribuindo para a qualidade do fornecimento da energia e melhores DEC e FEC para o gestor do sistema

## 2. MICRORREDES ISOLADAS

As microrredes de forma geral, são blocos que compõem uma rede elétrica inteligente, sendo as microrredes isoladas uma particularidade, uma vez que estão desconectadas da rede principal e possuem a própria barra de referência formada por bancos de baterias e conversores CC/CA (Zhu et al., 2019) (Henao-Muñoz et al., 2017).

Existem algumas topologias para microrredes isoladas que utilizam apenas conversores CC e bancos de baterias, ou conversores CC/CA e banco de baterias, ou conversores bidirecionais e bancos de baterias, cada modelo aplicado as especificidades da rede (radial ou em anel), dos consumidores (cargas atendidas), dois ativos envolvidos, entre outros, de forma que permita segurança do sistema, a flexibilidade de operação, a simplicidade dos dispositivos de proteção, a facilidade de manutenção, a segurança e modularidade que facilite a expansão.

Neste artigo é usado como referência os dados da microrrede isolada da Ilha Lençóis/MA, Fig. 1 que utiliza uma topologia com conversores formadores de rede CC/CA (2 de 30 kVA, 240 Vcc/380 Va - 60 Hz), bancos de baterias (240 Vcc, 2 strings com 120 baterias de 1 elemento, 1200 Ah), painéis fotovoltaicos (53 kWp) e turbinas eólicas (3 turbinas de 10 kW), ambas fontes com conversores CC/CC e seguidores de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) (Cosme et al., 2019).

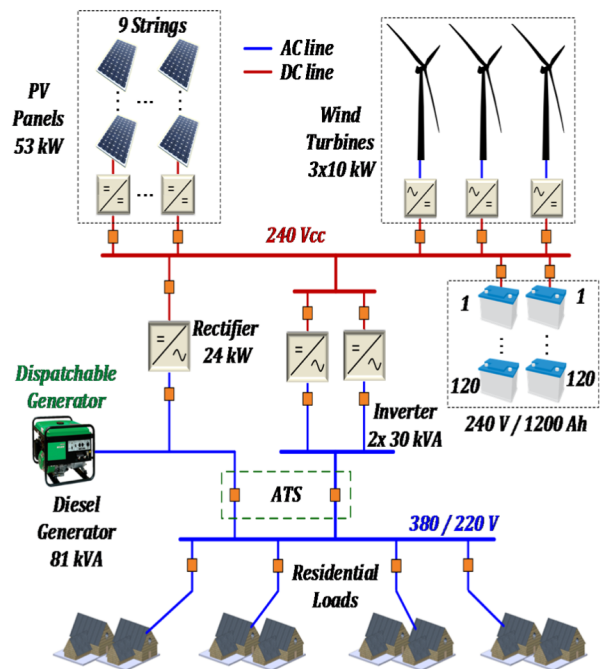


Fig. 1. Microrrede isolada da Ilha de Lençóis/MA.

Como fonte de *backup* há um grupo gerador diesel de 81 kVA associado a conversores CA/CC (2 de 24 kVA) utilizados para recarregar o banco de baterias e suprir a rede em períodos de sazonalidade que envolvem baixa radiação solar, manutenção da planta, etc. Todavia, pelo registro de horas de uso do grupo gerador, ao longo de 10 anos de operação a participação foi em média 10 %.

Conforme informado na introdução, essa microrrede atende 100 UCs, com consumo médio mensal de 70 kWh, e que em determinados horários do dia apresentam desequilíbrio de corrente entre fases. Isto ocorre em função das características estocásticas da carga, pois como é uma ilha de pescadores, a carga principal é a refrigeração e o bombeamento de água.

Desta forma, o desenvolvimento do sistema de balanceamento de cargas, o qual é dividido em software (Menezes

et al., 2016) e hardware, poderá permitir um controle do fluxo de potência injetado em cada fase e portanto, evitando sobrecargas nos conversores.

### 3. HARDWARE PARA BALANCEAMENTO DE FASES

O método para o balanceamento de fases foi inicialmente proposto em Menezes et al. (2016) visando o lado da tomada de decisão. Logo foi proposto uma formulação baseada em algoritmos inteligentes que permitisse otimizar o número de chaveamento entre fases ao mesmo tempo, manter uma taxa de desequilíbrio menor que 15%. O melhor resultado obtido foi de 3 chaveamentos entre 100 UCs para manter o sistema balanceado Fig. 2.

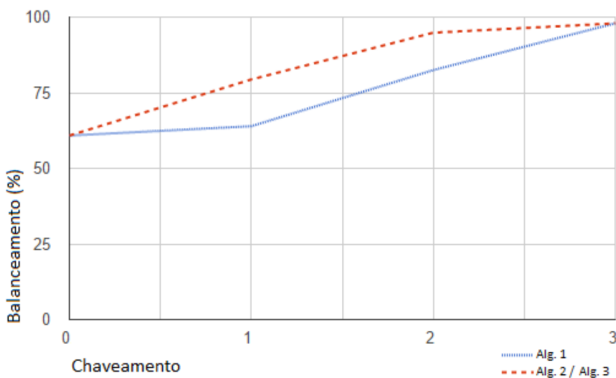


Fig. 2. Gráfico de balanceamento x chaveamentos.

A etapa atual do projeto é a elaboração e validação do *hardware* para embarcar o algoritmo inteligente que permitirá a tomada de decisão no balanceamento de fases. Como se trata de um projeto para aplicação em área remota, no qual o acesso para a substituição é superior a 24 horas, a proposta de *hardware* é de atender os critérios de robustez, baixo custo, facilidade de integração e confiabilidade.

O primeiro passo no desenvolvimento do sistema foi entender a dinâmica de operação da microrrede e projetar um *hardware* que atenda as peculiaridades existentes, um deles a distância pois a informação relacionada a fase e corrente da fase em cada UC deve ser transmitida para que o algoritmo de balanceamento possa ser executado.

Desta forma o *hardware* foi projetado para realizar uma medição de corrente (sensor de efeito hall com fundo de escala de 20 A, instalado na placa de medição e controle) e enviar essa informação com a fase no qual a UC está conectada. Da mesma forma poder receber o sinal de mudança de fase e a nova fase, como ilustrado na Fig. 3.

Essas informações das  $n$  UCs são processadas na central de operação pelo algoritmo inteligente e depois é enviado a solução ótima de balanceamento.

Para realizar essas funções foi implementado o uso de um microcontrolador com módulo wifi, sensores de corrente e relés de estado sólido de forma a permitir uma transferência suave, com detecção de passagem por zero de tensão e corrente, e as proteções adequadas, uma vez que há cargas indutivas no sistema. Na Fig. 4 é ilustrado o *layout* da placa de circuito impresso (PCI) para medição e controle.

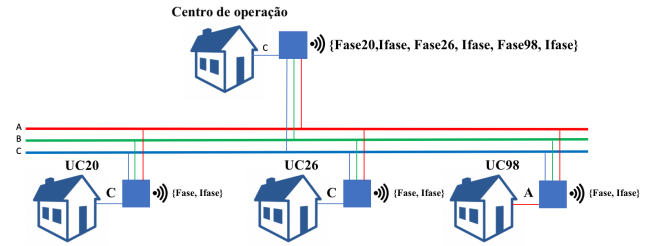


Fig. 3. Transmissão de dados para o balanceamento.

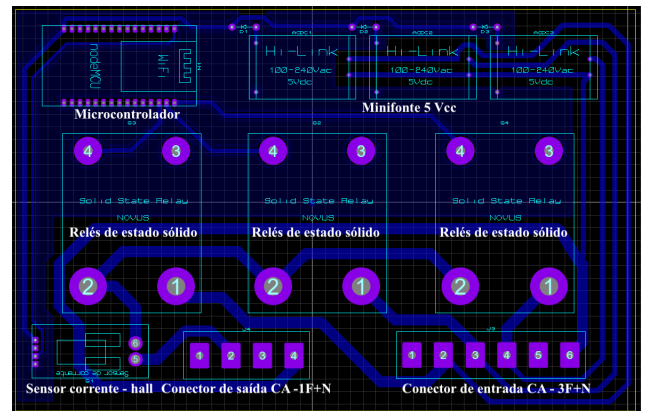


Fig. 4. Layout da placa de circuito impresso.

Esse sistema foi proposto de forma que cada unidade de balanceamento (UB) seja instalada em um UC nas três fases, sendo que apenas uma das fases é selecionada e conectada ao medidor de energia para a tarifação.

Cada UB tem autonomia no que se refere a medição e capacidade de mudança de fase, todavia o comando para mudança de fase vem da central de operação. Foi estudado a possibilidade de existir uma IB mestre e as outras escravas e que caso a IB mestre fosse desconectada, uma das outras 99 assumiriam a função de mestre e executaria os procedimentos de balanceamento.

Contudo, como os períodos no qual ocorrem o desbalanceamento de forma prejudicial ao sistema, são em média três vezes ao dia e da mesma forma o chaveamento entre fases ocorre em períodos específicos da manhã, tarde e noite, permitindo que o sistema não seja plenamente estressado, não se optou pelo uso da topologia UB mestres e escravos e apenas uma central de operação.

### 4. RESULTADOS

Após a montagem da PCI foram realizados os testes e validação do projeto, com o objetivo de verificar as funcionalidades do sistema, como a medição de corrente, a mudança de fases em carga e a transmissão de dados via *wifi* entre as UBs.

Na Fig. 5 é ilustrado o circuito final da PCI (circuito real frente e verso) e os detalhes da montagem. As numerações de um a seis representam os dispositivos que foram utilizados no projeto, sendo definidas como:

- (1) Terminal de entrada no qual são conectadas as três fases e o neutro da instalação (rede trifásica);
- (2) Terminal de saída monofásico (fase e neutro), que é conectado ao medidor de energia da UC;
- (3) Sensor de corrente (com fundo de escala de 20 A), considerando a máxima potência medida na UC;
- (4) Microcontrolador com módulo *wifi* incorporado, no qual está embarcada a rotina de balanceamento de carga;
- (5) Fontes de alimentação do circuito eletrônico em CC, uma vez que na mudança de fase o circuito deve sempre estar alimentado por uma das fases;
- (6) Relés de estado sólido (três no total), cada qual ligado a uma das fases e a saída em comum com o terminal dois.

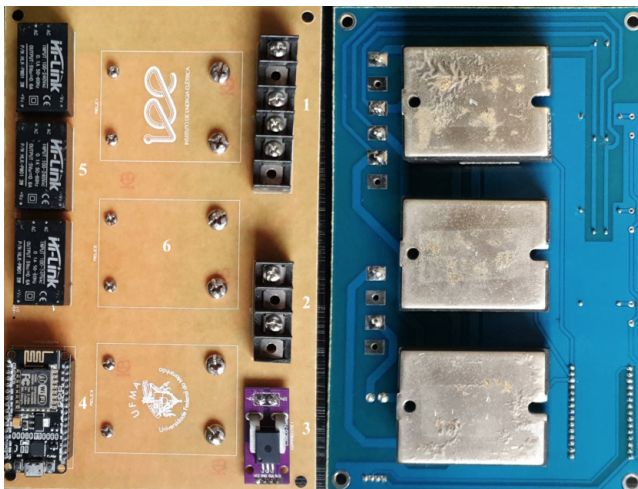


Fig. 5. Layout da placa de circuito impresso.

Há dois pontos que merecem uma explicação adicional, as fontes trifásicas e os relés de estado sólido. O uso de três fontes monofásicas com a saída (5 Vcc) em paralelo com a alimentação dos circuitos de medição, processamento e atuação com um diodo em cada uma das saídas, foi idealizado pelo baixo custo, por serem fontes de baixa potência, saída regulada e encapsuladas, o qual permite uma proteção adicional contra a salinidade do local.

A configuração com as saídas em paralelo permitem que na mudança de fase, a fonte com maior tensão na saída (menor queda de tensão no diodo), permaneça alimentando os circuitos independentemente das demais, sem que o transitório do chaveamento cause perturbação na alimentação.

Já os relés de estado sólido, foram utilizados devido as proteções incorporadas (snubber, permite um caminho para as correntes indutivas), além de que a mudança de fase somente ocorra quando a corrente da carga passar por zero (corrente na fase = 0).

Também pode ser observado na Fig. 5(verso) que os relés não possuem dissipadores de calor. Isto foi resolvido utilizando relés com capacidades de corrente superiores (duas vezes) as correntes usualmente existentes nas UCs existentes na microrrede isolada.

Desta forma, foi possível compactar a UB em um circuito de aproximadamente 15 x 22 cm, condicionado em caixa plástica padrão (IP 63).

Com o circuito finalizado foram realizados os testes de chaveamento com cargas reais, simulando uma UC (geladeira, micro-ondas, iluminação led e fluorescente, cafeteira elétrica, entre outras). O resultado da simulação é ilustrado na Fig. 6.

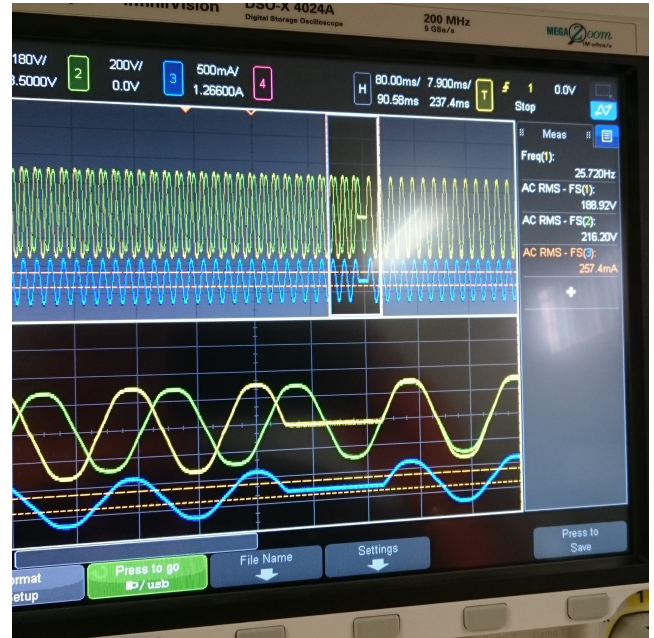


Fig. 6. Gráficos gerados em osciloscópio.

No gráfico gerado pelo osciloscópio é possível observar em verde e amarelo duas das fase de um circuito trifásico, defasadas 120 graus. Na sequência, no gráfico em azul, a forma de onda senoidal referente a fase conectada a carga. É possível observar em um primeiro momento que antecede a mudança de fase (forma de onda azul a esquerda), a forma de onda amarela está em fase com a forma de onda azul, ou seja, a fase em amarelo é que está alimentando a carga.

Em um segundo momento (após a mudança de fase), a forma de onda verde esta em fase com a amarela, dessa forma houve a mudança de uma fase para a outra no momento em que a forma de onda passou por zero de corrente, mostrando a confiabilidade do sistema durante o chaveamento.

Não obstante, para que o sistema opere de forma adequada, há necessidade que haja uma área de cobertura da rede wifi que alcance as UCs, e isto está sendo projetado para uma segunda etapa, bem como o uso de outras tecnologias com Radio Frequência (RF) com alcance de 1 km.

Porém considerando os teste em laboratório realizados com rede wifi, a resposta para transmissão da informação é realizada em microssegundos (em um sistema real, com boa recepção de wifi, uns 2 segundos para completar todo ciclo de balanceamento). Caso haja o risco de perda do sinal wifi, não ocorre o chaveamento entre fases e consequentemente o balanceamento, mas não gera transitórios ou desligamento acidentais das UCs.



## 5. CONCLUSÃO

A ideia inicial do projeto é oriunda de uma necessidade real apresentada na microrrede isolada da ilha de Lençóis/MA, que durante alguns horários durante o dia, apresentava desbalanceamento de corrente entre as fases. Esse desbalanceamento gera alarmes de proteção nos conversores quando há um ultrapassagem de 25 %.

A primeira alternativa foi realizar o balanceamento das fases as cegas, tentando deslocar de uma fase para outra, aquelas cargas consideradas maiores, o que a princípio funcionou pelos primeiros meses, mas com o aumento da carga (demanda reprimida), se tornou impossível realizar fisicamente essa mudança de fase todos os dias, ou semanas, ou quando houvesse os alarmes.

A solução desenvolvida foi um sistema de balanceamento de fases que permitisse de forma autônoma, manter o sistema dentro de uma taxa de balanceamento aceitável, ou seja, maior que 75 %.

Os testes foram realizados em laboratório (não havendo a instalação em campo devido a logística e ainda está em fases de testes), contudo, tem sido obtido bons resultados com cargas reais, que emularem uma UC real, sem danos a essas cargas.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos é possível concluir que o sistema tem aderência ao objeto a ser aplicado e permite vislumbrar outros desdobramentos, como em redes elétrica urbanas, as quais embora bem dimensionada, a cada período a empresa de energia verifica se há sobrecarga no transformador e realiza a mudança de algumas UC de fase.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela ajuda no desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS

- Cosme, D.L.S., Saavedra, O.R., de Souza Ribeiro, L.A., de Matos, J.G., Oliveira, H.A., de Lima, S.L., and de Paula Assunção Pinheiro, L. (2019). Performance analysis and impact of the improvements added in ten-years of operation of microgrid of lençóis island. In *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, 2458–2463. doi:10.1109/IECON.2019.8927041.
- de Souza Ribeiro, L.A., Saavedra, O.R., de Lima, S.L., and de Matos, J. (2011). Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of lençóis island. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(1), 1–11. doi:10.1109/TSTE.2010.2073723.
- Henao-Muñoz, A.C., Saavedra-Montes, A.J., and Ramos-Paja, C.A. (2017). Energy management system for an isolated microgrid with photovoltaic generation. In *2017 14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 1–4. doi:10.1109/SMACD.2017.7981571.
- Menezes, R., Lima, S., and Saavedra, O. (2016). Proposta de algoritmo inteligente para o balanceamento de fases em microrredes isoladas. In *CBA2016 - XXI Congresso Brasileiro de Automática*, 4070–4073.
- Rathnayaka, A.J.D., Potdar, V.M., Hussain, O., and Dillon, T. (2011). Identifying prosumer's energy sharing behaviours for forming optimal prosumer-communities. In *2011 International Conference on Cloud and Service Computing*, 199–206. doi:10.1109/CSC.2011.6138520.
- Zhu, J., Zheng, Y., Wang, Y., and Yuan, Y. (2019). Isolated microgrid capacity configuration considering economic risk of customer interruption. In *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 4070–4073. doi:10.1109/ISGT-Asia.2019.8881780.