



V Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica  
V EnICT  
ISSN: 2526-6772  
IFSP – Câmpus Araraquara  
22 e 23 de outubro de 2020



## ESQUEMA DE PROTEÇÃO DE MICRORREDES UTILIZANDO UM SISTEMA MULTIAGENTES

FERNANDO AUGUSTO DE SALUM E DIZIOLI<sup>1</sup>, PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA<sup>2</sup>, THIAGO SOUZA MENEZES<sup>2</sup>, DENIS VINICIUS COURY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica (Ênfase em Sistemas de Energia e Automação), Bolsista PIBIC, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), [fernando.dizioli@usp.br](mailto:fernando.dizioli@usp.br).

<sup>2</sup> Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, EESC/USP

**Área de conhecimento** (Tabela CNPq):  
Medição, Controle, Correção e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – 3.04.04.04-5

**RESUMO:** O apelo crescente por fontes renováveis de energia e recursos distribuídos em sistemas de distribuição traz a necessidade de modernização dos sistemas elétricos de potência. Nesse cenário, as microrredes surgem como uma solução que integra geradores distribuídos, dispositivos de armazenamento de energia e cargas. Apesar das vantagens desse novo modelo, ainda existem desafios para sua implementação, entre eles o de proteção. Em microrredes, as estratégias convencionais de detecção de faltas são pouco confiáveis, por conta de significativas mudanças na topologia da rede durante sua operação. Dessa forma, este trabalho propõe um esquema de proteção adaptativa para microrredes, utilizando um sistema multiagentes. Nesse esquema, os ângulos de fase das correntes da microrrede são analisados pelo sistema multiagentes, modelado em JADE, que é capaz de detectar o tipo e o local da falta, sinalizando a abertura dos disjuntores apropriados. Para testar a eficiência da estratégia, uma microrrede baseada no *benchmark* do CIGRÉ foi utilizada e simulada no PSCAD/EMTDC. Os resultados apontaram a proposta como promissora para a proteção de microrredes.

**PALAVRAS-CHAVE:** microrredes; proteção adaptativa; recursos distribuídos; sistema multiagentes.

## INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os sistemas de distribuição de energia possuem operação centralizada e são radiais, ou seja, apresentam um fluxo de potência unidirecional. Embora apresente muitas vantagens devido à sua simplicidade, como a facilidade de estimação dos parâmetros da rede, existem também uma série de problemas associados a essa topologia. Por exemplo, a centralização faz com que a distribuição seja altamente dependente do bom funcionamento do sistema de transmissão e dos grandes geradores, usualmente afastados dos grandes centros de consumo. Outra desvantagem decorre da característica radial da rede: a falta de energia em um ponto da rede faz com que o fornecimento seja interrompido para todos os consumidores deste ponto em diante.

As microrredes se apresentam nesse contexto como solução para os problemas citados. Elas são redes de distribuição com topologia malhada, radial ou mista, mas que agregam recursos distribuídos tais como geradores e armazenadores distribuídos (HATZIARGYRIOU et al., 2007). Uma das principais vantagens das microrredes está relacionada à sua capacidade de operar de forma desconectada da rede principal (ilhada). Dessa forma, em caso de distúrbios que gerem interrupções à montante da microrrede, esta pode alterar o seu modo de operação para o modo ilhado, permitindo que suas cargas continuem sendo alimentadas pelos recursos distribuídos presentes na mesma. Vale ainda ressaltar a característica malhada de partes da microrrede, que também contribui com a resiliência e confiabilidade do fornecimento, permitindo que regiões afetadas por faltas possam ter sua alimentação restaurada em pouco tempo (PALIZBAN et al., 2014).

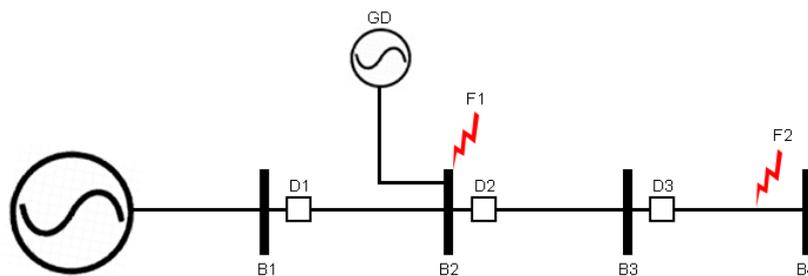
Dentre os desafios técnicos existentes na implementação das microrredes, aponta-se o desafio de sua proteção (BARRA et al., 2020). Isso se deve ao fato de que os métodos tradicionais de proteção de sistemas elétricos são baseados em parâmetros fixos, pressupondo topologias constantes durante a operação do sistema de distribuição, tornando-os pouco confiáveis para uma microrrede. Somando a isso, destaca-se que boa parte dos geradores distribuídos apresentam uma característica intermitente de geração, sendo conectados à rede por meio de inversores, que limitam sua corrente máxima de falta. Adicionalmente, a possível alternância entre os modos de operação conectado e ilhado gera significativas alterações na topologia, fluxos de potência, correntes e tensões da microrrede. Os pontos apresentados inviabilizam a utilização de filosofias de proteção que dependam de parâmetros fixos.

Com vistas a essas limitações, novas estratégias de proteção baseadas em algoritmos adaptativos têm sido desenvolvidas, como discutido em Barra et al. (2020). Dentre as ramificações das estratégias adaptativas, podem-se destacar como promissoras as que monitoram a rede utilizando sistemas multiagentes, um ramo da inteligência artificial distribuída. Nesse contexto, este artigo apresenta uma estratégia de proteção de microrredes utilizando um sistema multiagentes. Para tanto, o *software* PSCAD/EMTDC (*Power System Computer Aided Design*) é utilizado para a simulação da microrrede frente aos eventos de falta, enquanto que a plataforma JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*) é empregada para a modelagem do sistema multiagentes.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão do tema central do trabalho é preciso compreender dois conceitos principais: a proteção em microrredes e o conceito de sistemas multiagentes. Além disso, é necessário estudar como esses dois temas podem ser interligados.

A proteção de microrredes, como já citado, requer uma maior complexidade de estratégia devido à inserção de recursos distribuídos e variações na topologia durante sua operação (JIANG; HE; BO, 2010). Um exemplo disso é o chamado ponto cego da proteção (do inglês, *protection blinding*). Na Figura 1, um sistema com um gerador principal, um gerador distribuído (GD), quatro barras (B1 a B4) e três disjuntores (D1 a D3) é apresentado para ilustração. Quando a falta F1 ocorre na barra B2, uma parte da corrente de falta é suprida pelo GD, ou seja, a corrente de falta de B1 a B2 é menor, podendo não sensibilizar a proteção e, conseqüentemente, não abrir o disjuntor D1. Na ocorrência da falta F2, a corrente adicional fornecida pelo GD pode ser alta o suficiente para disparar a proteção e abrir o disjuntor D2 antes da atuação de D3, interrompendo o fornecimento de energia em uma área maior do que a necessária para remover a falta.

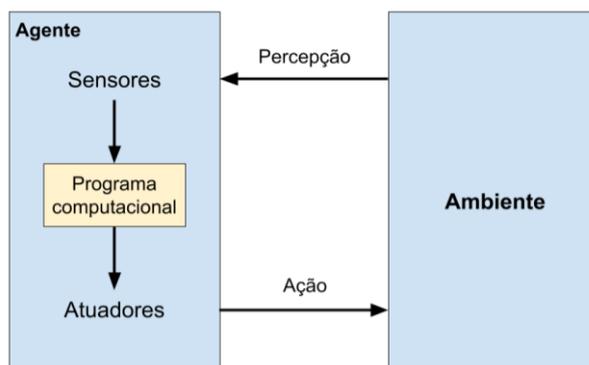


**FIGURA 1. Ponto cego da proteção.**  
Fonte: Elaborada pelo autor.

A compreensão de um sistema multiagente (SMA), por sua vez, necessita de uma definição do significado de agente inteligente. Um agente inteligente é um sistema computacional dotado de (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995):

- Autonomia, capacidade de agir por si só, sem ajuda externa;
- Habilidade social, capacidade de se comunicar com outros agentes, com uma linguagem própria;
- Reatividade, responde a estímulos e mudanças no ambiente em que está inserido;
- Proatividade, tomando decisões e agindo por conta própria para atingir um objetivo.

Destaca-se que os agentes podem ter um ou mais objetivos globais e particulares a serem concluídos. Por exemplo, o objetivo global de um SMA pode ser a reparação de uma falta na microrrede, e o objetivo de um dos agentes pode ser informar se a corrente medida em um determinado ponto está dentro dos valores normais de operação. Os agentes são capazes de perceber o ambiente por meio de sensores, e agir sobre este por meio de atuadores para cumprir seus objetivos, como representado na Figura 2.



**FIGURA 2. Agente Inteligente.**

**Fonte: Elaborada pelo autor.**

O SMA engloba o ambiente onde os agentes se inserem e a estratégia utilizada por eles para atingir os objetivos. Os agentes podem, por exemplo, optar por cooperar ou competir entre si, dependendo do que for mais vantajoso. Na literatura, existem diversas organizações de agentes, como a hierárquica, na qual os agentes que ocupam posição superior na hierarquia têm maior liberdade de decisão e imposição de comandos do que os agentes inferiores. Ressalta-se ainda que os agentes podem também ser divididos por função, onde cada grupo de agentes é responsável por executar uma tarefa ou um grupo de tarefas. No presente trabalho, os agentes foram divididos por função.

Em Habib et al. (2017), é apresentada uma estratégia de proteção e restauração de microrrede que se utiliza de um SMA. O sistema se baseia na detecção da variação do ângulo das correntes na rede, por meio de unidades de medição fasorial (do inglês, *Phasor Measurement Units* - PMUs). Os agentes se dividem em quatro funções:

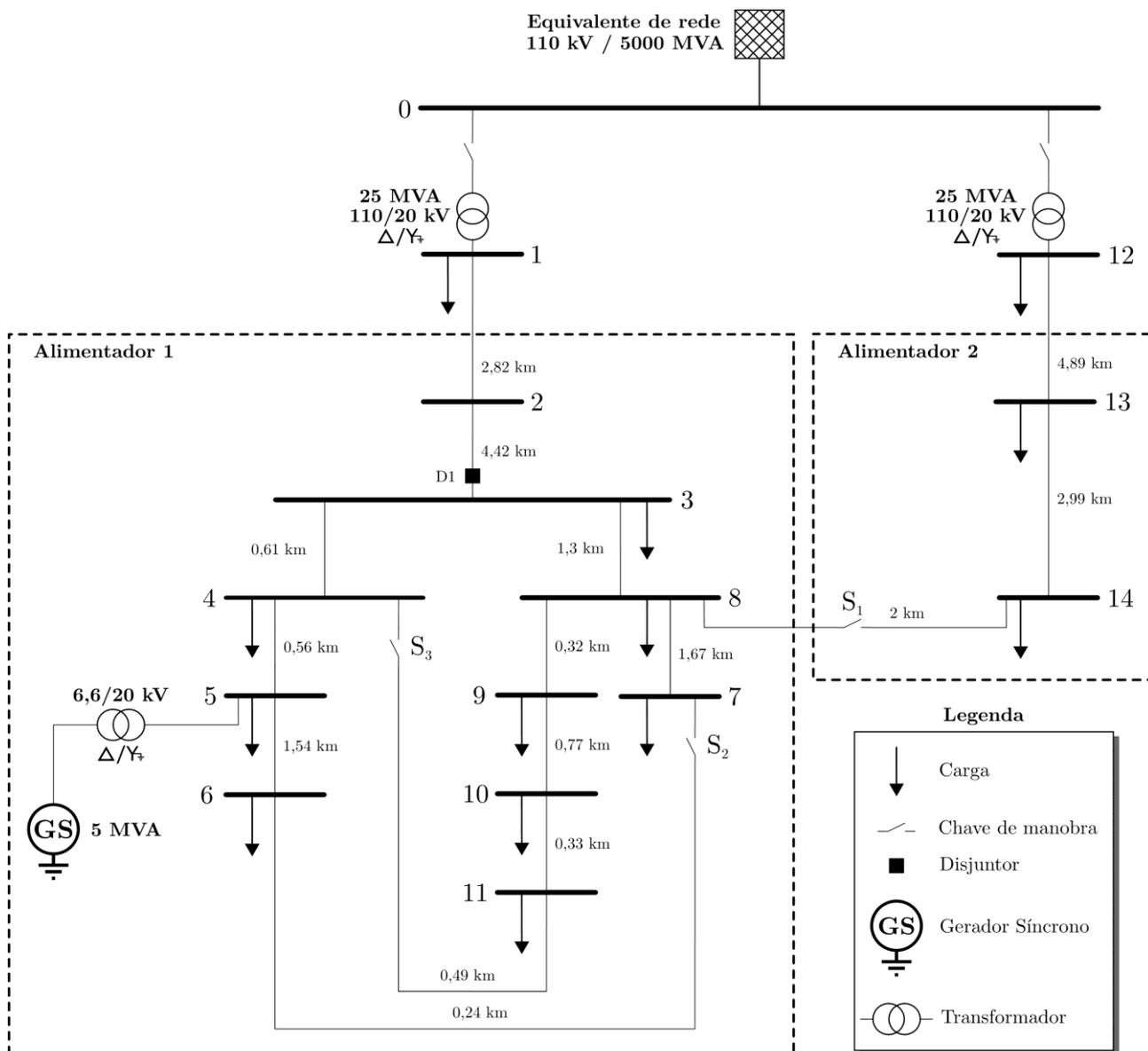
- Agente de carga: determina os parâmetros da carga para restauração de energia;
- Agente de seção: sinaliza a abertura dos disjuntores pertinentes quando detecta variação significativa no ângulo de corrente;
- Agente restaurador: comunica-se com agentes de seção e restauradores para restaurar a energia na linha, quando possível;
- Agente de gerador: informa aos agentes restauradores a capacidade do gerador distribuído correspondente, para verificar a viabilidade da restauração da energia.

Assim, PMUs nas extremidades da linha detectam continuamente o ângulo das correntes. Assim que a diferença de ângulo entre as extremidades da linha for maior que um valor de limiar pré-determinado, o agente de seção sinaliza a abertura dos disjuntores, e o agente restaurador confronta as informações dos agentes de carga e gerador para garantir a viabilidade da restauração de energia.

## **METODOLOGIA**

Para a implementação do SMA foi utilizada a plataforma JADE. Além de ser usualmente utilizado para desenvolvimento de SMAs, a JADE trabalha utiliza a *Agent Communication Language* (ACL), linguagem padrão recomendada pela *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA). A JADE organiza os agentes criados dentro de ambientes virtuais chamados *containers*. Ela possui uma interface gráfica que permite criar, destruir e monitorar mensagens trocadas entre agentes, o que também pode ser feito por linhas de código.

A microrrede utilizada para implementar o SMA é baseada em um sistema de teste do CIGRÉ para médias tensões (STRUNTZ *et al.*, 2014). O sistema é constituído por 14 barras divididas em dois ramos conectados ao alimentador principal, um composto por onze barras e o outro por três. Existem três chaves (S1, S2 e S3) utilizadas para fechar malhas no circuito. O modo ilhado se dá pela abertura do disjuntor D1, como ilustrado na Figura 2. O sistema conta ainda com um gerador síncrono (GS) conectado na barra 5, cuja potência é 5 MVA. A carga total do sistema apresentado é de 24,16 MW e 6,07 MVar.



**FIGURA 3. Microrrede utilizada.**  
**Fonte: Elaborada pelo autor.**

A rede foi modelada no programa PSCAD/EMTDC. Medidores situados em cada uma das barras, cujos valores medidos de correntes foram tratados por uma transformada de Fourier para fornecer os ângulos, fizeram o papel dos PMUs. Para cada um dos cenários analisados, a simulação teve a duração de 1 segundo, com incidência de falta aos 0,5 segundos de simulação. O passo de integração considerado foi de 65,104  $\mu$ s. Para posterior análise do sistema multiagentes na plataforma JADE, para cada cenário simulado no *software* PSCAD/EMTDC foi gerado um arquivo de saída contendo estampas de tempo e as informações

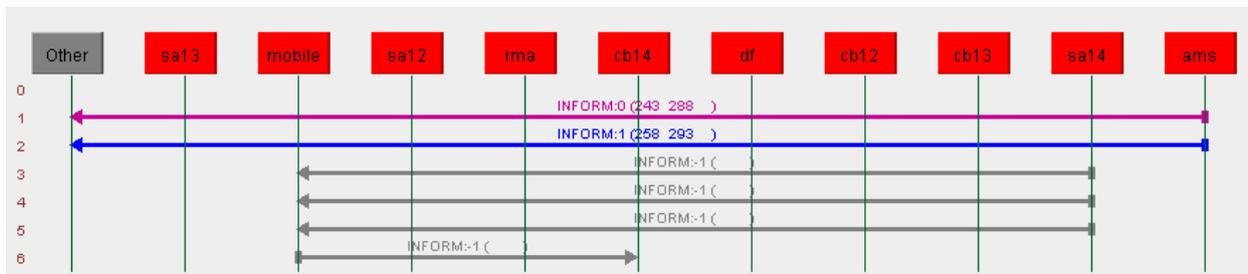
de ângulo, necessárias para o funcionamento do esquema de proteção proposto. Por fim, esses arquivos de saída servem como entrada para o SMA modelado, que conta com três tipos de agentes:

- Agente de seção: detecta alteração no ângulo de corrente e sinaliza a abertura dos disjuntores;
- Agente móvel: encaminha o comando de abertura de disjuntor para o agente de disjuntor correspondente;
- Agente de disjuntor: efetua a abertura do disjuntor quando solicitado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

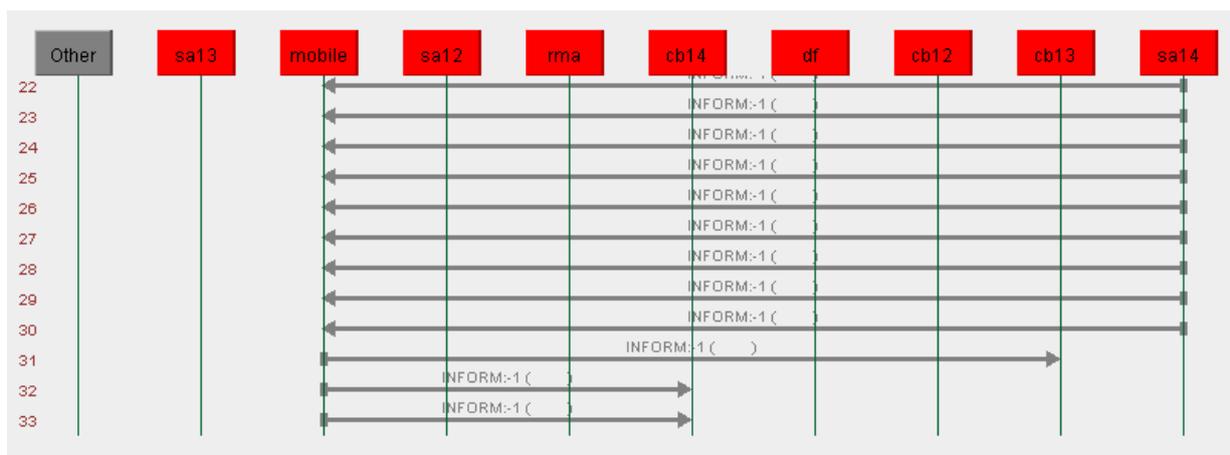
Foram simulados três tipos de falta sólida (sem impedância de falta), todas na barra 13 do sistema: falta monofásica, falta bifásica envolvendo o terra e falta trifásica. Como há uma falta na barra 13 da microrrede, o ângulo da corrente que incide na barra 14 irá se alterar. Portanto, o SMA deve detectar uma alteração de ângulo na barra 14. Em todos os casos, a falta foi detectada em até 15 ms após sua ocorrência.

Para o primeiro caso (falta monofásica), as mensagens trocadas entre os agentes estão representadas na Figura 4. Como esperado, o agente de seção relacionado à barra 14 (sa14) detectou a inversão do ângulo de corrente na barra e informou o agente móvel (mobile). Este, por sua vez enviou o sinal de abertura para o agente de disjuntor correspondente (cb14).



**FIGURA 4. Comunicação entre agentes para falta monofásica na barra 13.**  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as faltas do tipo bifásica envolvendo o terra e trifásica, o mesmo comportamento foi observado, ilustrado nas Figuras 5 e 6. O comportamento do sistema multiagentes frente às faltas analisadas mostra que este foi capaz de identificar de forma rápida e coordenada o local das faltas no sistema. Verifica-se ainda que a troca de mensagens entre os agentes é eficaz e permite a isolamento das faltas com seletividade.



**FIGURA 5. Comunicação entre agentes para falta bifásica aterrada na barra 13.**  
Fonte: Elaborada pelo autor.

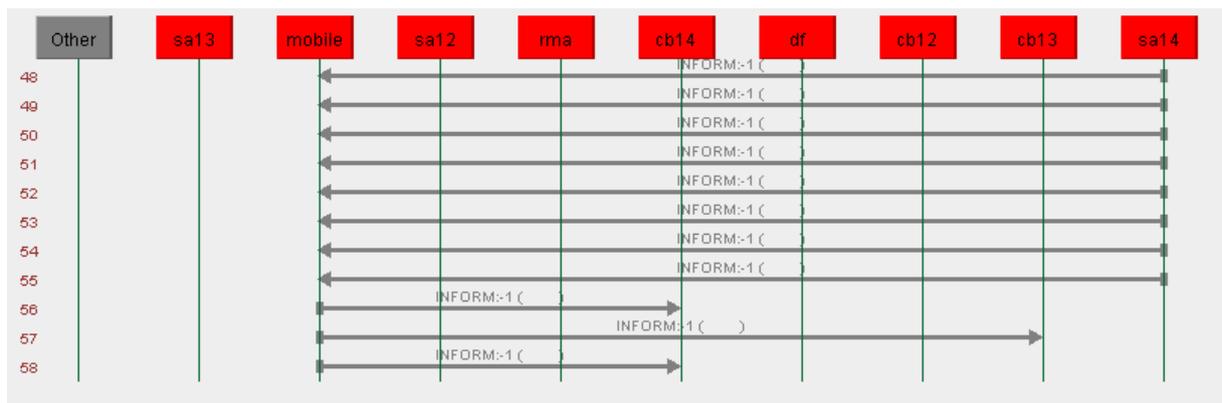


FIGURA 6. Comunicação entre agentes para falta trifásica na barra 13.

Fonte: Elaborada pelo autor.

## CONCLUSÕES

A utilização de SMAs como ferramenta para esquemas de proteção adaptativa para microrredes se mostra uma abordagem promissora. A habilidade social e a proatividade dos agentes são ferramentas poderosas para lidar com as constantes variações de parâmetros e topologia da microrrede. O SMA construído mostrou respostas com alta precisão e velocidade, identificando corretamente o local, momento e fases envolvidas nas faltas. Ainda há, porém, muito espaço para melhorias. O sistema ainda precisa ser testado em outros contextos, por exemplo, com a rede malhada pelo fechamento das chaves, e com a microrrede desconectada do sistema, em modo ilhado. O fato de o SMA não depender de valores pré-estabelecidos da rede, mas apenas da diferença entre os ângulos de corrente, é um bom indicador de que a proteção se manterá confiável e eficiente mesmo em outros modos de operação, necessitando apenas de pequenas reestruturações.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)* – Brasil – Código de Financiamento 001 e também com apoio do *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)*.

## REFERÊNCIAS

- BARRA, P. H. A. et al. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 118, 2020.
- HABIB, H. F. et al. Multi-agent-based technique for fault location, isolation, and service restoration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 53, n. 3, p. 1841–1851, 2017.
- HATZIARGYRIOU, N. et al. Microgrids. **IEEE Power and Energy Magazine**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 78-47, 2007.
- JIANG, W. et al. The overview of research on microgrid protection development. In: IEEE. **2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application**. [S.l.], 2010. v. 2, p. 692–697.
- PALIZBAN, O. et al. Microgrids in active network management – part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 428-439, 2014.
- STRUNZ, K. et al. Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources. **Cigre Task Force C**, v. 6, n. 04-02, p. 78, 2014.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent agents: Theory and practice. **The knowledge engineering review**, Cambridge University Press, v. 10, n. 2, p. 115–152, 1995.