

# Revisão regulatória e bibliográfica da Operação Ilhada de Microrredes no Sistema Elétrico de Potência

Elton Rodrigo dos Santos  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
elton.santos@certaja.com.br

Gustavo Marchesan  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
gutomarchesan@gmail.com

**Resumo** — Com o surgimento do conceito das Redes Elétricas Inteligentes (REI) cada vez mais presentes nos Sistema Elétrico de Potência (SEP) a operação ilhada das unidades geradoras, através da arquitetura de microrredes conectadas ao sistema de distribuição, surgem como uma alternativa a ser explorado em casos de falha do suprimento principal da distribuidora local. Desta forma será apresentado o estado da arte referentes a este cenário de modo obter as possibilidades a serem implementadas no desenvolvimento de soluções e planejamento do sistema de distribuição.

**Palavras-chaves** — Operação ilhada, Microrredes, Geração Distribuída, Redes Elétricas de Inteligentes

## I. INTRODUÇÃO

A inserção cada vez mais massiva de fontes renováveis, seja ela geração centralizada ou distribuída, está mudando a forma de produzir, distribuir e de certa forma consumir energia elétrica. Em um cenário em que a qualidade da prestação dos serviços das distribuidoras e a qualidade do produto energia estão tão em voga, a utilização destes recursos de geração pode ser explorada para suprir possível falhas no suprimento da fonte principal da rede de distribuição. Para isso se faz necessário aplicação da topologia de microrredes conectadas ao sistema de distribuição, onde através de redes elétricas inteligentes. As fontes de geração distribuída passam a atender totalmente ou parcialmente as cargas do sistema de distribuição de forma ilhada dos demais segmentos não pertencentes a esta microrrede

Este artigo, busca fazer uma revisão da bibliografia e regulatória, referente aos estudos desenvolvidos ou aplicados em sistemas de distribuição sobre o assunto.

## II. AVALIAÇÃO REGULATÓRIA

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia

Elétrica - ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST é composto por um conjunto onze módulos, as quais nesta pesquisa abordado os que mais se relacionam com o assunto abordado no trabalho. Além disso, algumas normas internacionais pertinentes ao tema serão mencionadas.

### A. Modulo 1 do Procedimentos de Distribuição

Nesta seção do PRODIST é dada uma introdução geral sobre os procedimentos da distribuição, definindo os objetivos, a aplicabilidade e a composição dos módulos. Também é apresentado um glossário com os termos técnicos utilizados nos PRODIST, a qual destacamos os principais, que são objetos deste trabalho de pesquisa.

Em [1] tem-se definido como Ilhamento, a operação em que a central geradora supre uma porção eletricamente isolada do sistema de distribuição, ou seja, uma operação ilhada. Para tal operação se faz o uso de Microrredes [1], de modo que uma área da rede de distribuição de energia elétrica pode operar isoladamente do sistema de distribuição, sendo a carga atendida diretamente por uma ou mais unidades de geração distribuída.

### B. Modulo 3 do Procedimentos de Distribuição

Em [2] é estabelecido as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso ao sistema de distribuição da distribuidora. Nesta seção é definido, por exemplo, que a decisão referente a operação ilhada em redes de distribuição é exclusiva da distribuidora, onde as centrais geradoras devem cumprir com uma série de requisitos técnicos. Destes requisitos, destaca-se que para centrais geradoras com potências instalada inferiores a 300 kW e que operam ilhadas, devem possuir sistemas de controle de tensão e frequência.

Para aquelas que têm potência instalada superior a 300 kW, deve ser feito uma avaliação técnica prévia da possibilidade de operação ilhada sem que haja danos elétricos envolvendo as unidades consumidoras atendíveis pela central e as demais atendidas pela distribuidora. Do mesmo modo é definido que para potência instalada superior a 300 kW, deve

ser feito uma avaliação da qualidade de energia elétrica entregue associada à microrrede, atendendo os requisitos conforme PRODIST Modulo 8. Também é exigido que existam normas de segurança com instruções claras e específicas para a operação ilhada do sistema.

### C. Modulo 4 do Procedimentos de Distribuição

No modulo 4 são definidos os acordos operacionais de forma a estabelecer os procedimentos de operação do sistema de distribuição entre os agentes envolvidos.

Com relação a operação ilhada, temos que [3] em situações que esta condição é permitida pela distribuidora local, tais condições devem constar no acordo operativo firmado entre a central geradora e a distribuidora.

Também é estabelecido que a central geradora ainda deve contar com um controle de frequência da parcela eletricamente isolada. Este controle deve ser por meio de um controle automático de geração ou tecnologia que seja capaz de desempenhar a mesma função, além de fornecer todas as informações necessárias à distribuidora para a elaboração de estudos de regime permanente e dinâmico. Busca-se desta forma garantir o desempenho adequado do sistema, de modo a não afetar as demais unidades consumidoras ligadas à rede da distribuidora.

### D. Modulo 8 do Procedimentos de Distribuição

Em sua seção oito o PRODIST estabelece os procedimentos pertinentes à qualidade da energia elétrica (QEE), tanto no que se diz respeito à qualidade do produto quanto ao que diz respeito à qualidade do serviço prestado no tratamento das reclamações dos usuários do sistema.

Na condição de operação ilhada, todos os critérios de qualidade dispostos neste módulo devem ser observados e atendidos pelo operador da microrrede, pois segundo consta [4] a abrangência também se aplica aos atendimentos realizados por Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) e Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI).

No que diz respeito à qualidade do produto, o presente modo estabelece o tratamento dos fenômenos relacionados em regime permanente ou transitório.

- a) Permanente: (i) tensão em regime permanente, (ii) fator de potência, (iii) harmônicos, (iv) desequilíbrio de tensão, (v) flutuação de tensão (vi) variação de frequência;
- b) Transitório: (i) Variação de tensão de curta duração – VTCD

Lembrando que em situações normais de operação, ou seja, fornecimento convencional pela rede de distribuição tendo como fonte principal a distribuidora, todos os critérios devem ser atendidos pela detentora da concessão ou permissão do serviço de distribuição de energia elétrica.

### E. Resolução Normativa 1059/2023

Esta resolução normativa [5] aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Anteriormente este assunto era regulamentado pela Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 e agora por meio da publicação da REN 1059/2023, esse assunto passa a integrar a REN 1000/2021. Com relação ao sistema de compensação de energia elétrica, destaca-se alguns pontos principais serão abordados nos tópicos a seguir.

#### A. Das definições

Segundo consta na resolução fica definido que:

- a) Microgeração distribuída: Central geradora com potência instalada menor ou igual a 75 kW;
- b) Minigeração distribuída: Central geradora com potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW, para as centrais geradoras de fontes despacháveis ou 3MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis;

Ambas conectadas a rede de por meio de unidades consumidoras.

#### B. Acesso aos sistemas de distribuição

A potência instalada da microgeração e da minigeração distribuída fica limitada à potência disponibilizada para a referida unidade consumidora.

Fica estabelecido que as distribuidoras devem adequar seus sistemas técnicos e comerciais, e elaborar normas para tratar o acesso das unidades geradoras.

Os custos de eventuais melhorias ou reforços dos sistemas de distribuição devem seguir como segue:

- a) Microgeração: Devem ser arcados integralmente pela distribuidora, não devendo fazer parte da participação financeira do consumidor;
- b) Minigeração: Deve fazer parte da participação financeira do consumidor.

#### C. Das responsabilidades do consumidor

No caso de dano ao sistema elétrico de distribuição devidamente comprovada, ocasionado por microgeração ou minigeração distribuída, assim como no caso de o consumidor gerar energia elétrica na sua unidade consumidora sem observar as normas e padrões da distribuidora local, fica a unidade consumidoras passíveis de penalização conforme previsto na Resolução Normativa nº 1000/2021 [6].

### F. Norma IEEE 1547-2003

A norma IEEE 1547-2003, intitulada "Padrão IEEE para Interconexão de Recursos Distribuídos com Sistemas de Energia Elétrica," é uma norma técnica desenvolvida pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, na sigla em inglês). O IEEE é uma organização profissional internacional dedicada ao avanço da tecnologia relacionada à eletrônica, engenharia elétrica e áreas afins.

Essa norma foi concebida com o objetivo de estabelecer um conjunto uniforme de diretrizes para a interconexão de recursos distribuídos com sistemas de energia elétrica. Ela fornece requisitos abrangentes relacionados ao desempenho, operação, testes, considerações de segurança e manutenção da interconexão.

É importante ressaltar que os requisitos contidos nela são considerados universalmente necessários para a interconexão de recursos distribuídos, englobando uma variedade de tecnologias, tais como máquinas síncronas, máquinas de indução e inversores/conversores de potência. A norma IEEE 1547-2003 desempenha um papel crucial no setor de energia elétrica, sendo utilizada por profissionais, reguladores e empresas do setor para garantir a compatibilidade e a segurança das instalações de geração distribuída conectadas à rede elétrica.

### G. Norma alemã BDEW

A norma alemã BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) regula a conexão de clientes de geração distribuída conectados em média tensão. O BDEW é uma associação alemã da indústria de energia e água, e desempenha um papel importante na criação de padrões e regulamentações para o setor de energia na Alemanha.

Essa norma estabelece diretrizes e requisitos técnicos para a conexão de sistemas de geração distribuída, como instalações de energia solar, eólica, biomassa, entre outras, à rede elétrica de média tensão.

### H. Norma IEC 61850

A norma IEC 61850 é uma norma internacional desenvolvida pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, na sigla em inglês). A IEC é uma organização internacional que estabelece padrões técnicos na área de eletricidade e eletrônica. A norma IEC 61850 foi desenvolvida sob a égide da IEC e faz parte de uma série de normas que definem padrões para sistemas de automação e controle em subestações elétricas.

Além disso, a norma IEC 61850 também aborda a integração de geração distribuída, que é uma parte cada vez mais importante das redes elétricas modernas. Ela define como os sistemas de automação e controle em subestações podem ser adaptados para incorporar geração distribuída de maneira eficaz, garantindo que esses recursos de energia sejam integrados à rede de forma segura e eficiente.

## III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado o estado da arte sobre a operação ilhada de microrredes.

### A. Aumento da resiliência da rede de distribuição usando estratégias ilhamento orientado

Em [7], é estabelecida uma estratégia de ilhamento ciber-física orientada, que consiste na combinação de software com as partes mecânicas ou eletrônicas, com o objetivo de aumentar a resiliência do sistema de distribuição em situações de ilhamento não planejado. Nesse trabalho a transição de ilhamento foi implementada utilizando dispositivos de coordenação ciber-físicos com base em dados de medição obtidos.

Nesta operação ilhada, um método de compartilhamento de energia baseado em mestre-escravo, foi proposto para mitigar os problemas. O método foi implementado em uma rede de distribuição na China, e os resultados demonstraram a eficácia e viabilidade da estratégia proposta. Pode-se observar com base nos resultados obtidos no trabalho, que a região ilhada na estratégia proposta é mais flexível, em relação a operação em ilha de uma microrrede pré-definida. Além disso, o ponto de reconexão é mais flexível na estratégia proposta.

No entanto, o desempenho do controle de frequência na estratégia proposta não pode ser garantido quando as GD estão dispersas, ou há uma alta penetração de GD intermitentes na área ilhada. A microrrede é principalmente aplicada a uma pequena região com geradores e cargas concentradas, enquanto o método de ilhamento proposto é projetado para redes de distribuição comuns. A estratégia proposta é uma medida de emergência, que pode aumentar a resiliência da rede de distribuição, mitigando a interrupção em uma situação de ilhamento em áreas não planejadas.

### B. Perspectiva de alto impacto de penetração de fontes renováveis em redes de BT.

Em [8] é apresentado o conceito de funcionamento de grupos de cargas, de geração, definidas como microrredes, que são normalmente conectadas ao sistema de distribuição ou operando de forma isolada, também denominada como operação ilhada. Esse novo paradigma está alterando o cenário tradicional da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, gerando um fluxo bidirecional, devido a integração dos recursos de energia renovável ao sistema. As microrredes, podem ser colocadas próximos as cargas, de modo a se ter uma melhora na confiabilidade e também reduzir as perdas no sistema. Entretanto o crescimento em números absolutos desses sistemas, na distribuição, aumentará cada vez mais a complexidade operacional de análise e projeções do sistema elétrico de potência.

### C. Sistema de Automação para Ilhamento Intencional de Redes de Distribuição com Geração Distribuída.

O trabalho desenvolvido em [9] traz uma proposta de sistema para ilhamento intencional automático de uma microrrede alimentada por GD, com geração baseada em máquina síncrona. Neste trabalho o autor propõe uma

reconfiguração da rede de forma automática, com o intuito de manter o fornecimento e energia para os consumidores alimentados pela parte íntegra da rede de distribuição. No desenvolvimento do trabalho foi utilizada uma rede real, onde já é praticado o ilhamento, porém na forma manual e com base nos estudos elaborados, conclui-se a viabilidade do sistema de automação proposto no projeto.

#### *D. Melhoria da confiabilidade em redes ativas com ilhamento*

Esta pesquisa [10] tem como objetivo a proposição de um algoritmo para definição da melhor alocação de equipamentos seccionadores automáticos, com o intuito de ilhar a rede automaticamente.

Os autores abordam a concepção de redes de distribuição ativas e expressam a importância do ilhamento intencional, de modo a garantir a melhoria da qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica, em virtude do aumento da penetração das GD no sistema de distribuição. Neste trabalho os autores deixam claro a necessidade de estudos de planejamento, de modo a analisar as configurações das ilhas propostas, visando a manutenção dos níveis de tensão e frequência em um patamar adequados. Além disso, destacam o estudo de estabilidade da ilha, com base nos geradores e cargas e o estudo de curto-circuito, que são fatores determinantes para se garantir a qualidade do fornecimento e para possibilitar os ajustes corretos dos equipamentos de proteção.

#### *E. Operações de ilhamento intencional de sistemas de geração distribuída com um algoritmo de rejeição de carga*

Em [11] é proposta uma estratégia de gerenciamento de rede, tanto com a geração distribuída conectada à rede, quanto ela operando de forma ílhada, por meio do controle do inversor associado à GD. A configuração do sistema quando a GD opera em paralelo com a rede da distribuidora, fica no modo de controle de corrente, provendo a energia necessária para a carga. Em caso de falha no fornecimento pela distribuidora e o ilhamento for estabelecido, o modo de operação é alterado para o controle de tensão. Deste modo, com base na medição de tensão no ponto de conexão e a priorização de cargas, caso necessário, é realizado um corte de cargas do sistema, de modo a manter a estabilidade da tensão em níveis adequados.

#### *F. Operação ílhada de Pequenas centrais hidrelétricas no Canadá*

Neste [12] é compartilhado as experiências da empresa BC Hydro, uma representante do setor elétrico Canadense, a respeito das estratégias de ilhamento estabelecidas. Uma delas diz respeito a uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de 6MW, conectada a um alimentador de 25kV, onde foram realizados vários testes com conexão e desconexão de cargas, com o objetivo de garantir o suprimento e a qualidade da energia no instante e durante o ilhamento. Em 2008, o ilhamento foi estabelecido por um período de aproximadamente seis horas, garantindo o fornecimento de

energia para aproximadamente mil unidades consumidores. Este fato trouxe aumento da satisfação dos clientes, onde também pode se observar uma melhoria nos indicadores de continuidade, quando comparados com o ano anterior.

#### *G. Exploração de ilhamento de geradoras distribuídas (vantagens e desvantagens).*

Já neste trabalho [13] é tratado os pontos de vista das distribuidoras e dos consumidores no que se refere as vantagens e desvantagens da operação ílhada. Os autores do trabalho concluem que o ilhamento é vantajoso para o consumidor. Para as distribuidoras, eles classificam como tecnicamente aceitável, pois apresenta grandes desafios como evitar a energização do sistema de forma indevida inesperada, gerando risco operacional ao sistema, risco de vida aos seus trabalhadores, risco a qualidade de energia e risco a estabilidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

#### *H. Microrredes elétricas: Uma proposta de implementação no Brasil.*

Em seu trabalho [16] oferece uma visão geral das microrredes na atualidade, destacando os desafios técnicos, regulatórios, econômicos e de mercado que elas enfrentam. O autor também sugere maneiras de superar esses obstáculos para promover uma maior integração no sistema elétrico brasileiro. No que se refere aos desafios de mercado, são apresentados novos modelos de negócios propostos na literatura para as microrredes. Adicionalmente, para o contexto brasileiro, foi realizada uma análise da viabilidade de implementação de uma microrrede no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Para conduzir essa análise, foram quantificados os recursos disponíveis e considerando algumas particularidades desse centro.

#### *I. Modelagem Matemática Aplicada para o Corte de Carga em uma Microrrede Ílhada Considerando Indicadores de Qualidade de Serviço.*

Neste trabalho [17] aborda a utilização da geração distribuída de energia elétrica como uma ferramenta para melhorar a confiabilidade do serviço de distribuição de energia. Ele propõe um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para alocar recursos de forma eficiente em uma microrrede de uma concessionária de energia. O modelo considera o custo de dispositivos de armazenamento de energia, a capacidade de redução da carga dos consumidores e indicadores de qualidade de serviço. O autor realiza experimentos em uma microrrede real e conclui que o modelo pode determinar cortes de carga adequados, mas destaca a necessidade de aprimoramentos para lidar com cenários mais complexos com um maior número de consumidores.

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho pode-se observar inúmeras oportunidades e desafios para serem tratados, com relação as microrredes operando ilhadas. Também é possível constatar que em vários países, este modo de operação, principalmente em projetos de pesquisa, já está em estágio mais avançado em relação ao Brasil.

É possível observar que os aspectos regulatórios são um dos grandes entraves para aplicação em um sistema de distribuição real, pois fica a critério das distribuidoras autorizarem este modelo de operação, a qual atualmente é visto com desconfiança por parte dos agentes de distribuição.

Como cenário futuro, a aplicação dos conceitos de microrredes e operação ilhada, tendem a ser mais difundidos. Apesar dos desafios previstos para as distribuidoras, a operação ilhada através de microrredes trará inúmeros benefícios para a própria distribuidora, que poderá aproveitar este potencial gerador estabelecido pelas GD, para atender seus consumidores em caso de falha no fornecimento de energia pela fonte principal do sistema de distribuição.

Inúmeras possibilidades podem ser observadas, no que se diz respeito a elaboração de estudos, associados a implementação da inteligência de reconfiguração do sistema por meio das microrredes, assim como estabelecer premissas e métodos de controle para grandezas elétricas, como tensão e frequência quando ocorrer a operação ilhada. Também se observa a necessidade de se avaliar os aspectos regulatórios e suas fragilidades, com vistas a possibilitar a difusão dos conceitos de microrredes e ilhamento do sistema, assim como sua aplicabilidade em um sistema de distribuição.

#### V. REFERÊNCIAS

- [1] PRODIST. Módulo 1 - Introdução. ANEEL, 2018.
- [2] PRODIST. Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição. ANEEL, 2017.
- [3] PRODIST. Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição. ANEEL, 2010.
- [4] PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da energia Elétrica. ANEEL, 2021.
- [5] Resolução Normativa nº 1059. ANEEL, 2023.
- [6] Resolução Normativa nº 1000. ANEEL, 2010.
- [7] Y. An, D.Liu , B.Chen and J.Wang, “Enhancing the distribution grid resilience using cyber-physical oriented islanding strategy” IET Gener. Transm. Distrib., 2020, Vol. 14 Iss. 11, pp. 2026-2033.
- [8] R.F. Chidzonga and B. Nleya, “Perspectives “On Impact of High Penetration of Renewable Sources on LV Networks”.IEEE, 2020.
- [9] L. P. MENDONÇA, “Proposta de Sistema de Automação para Ilhamento Intencional de Redes de Distribuição com Geração Distribuída” Rio Janeiro. 2014.
- [10] F. PILO, G. CELLI and S.MOCCI, “Improvement of reliability in active networks with intentional islanding” n. April, p. 474-479, 2004.
- [11] G. KRISHNAN and D.N. GAONKAR, “Intentional islanding operations of distributed generation systems with a load shedding algorithm” PEDES 2012 - IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, IEEE, p. 1-6, 2012.
- [12] J. PERALTA, “Planned Islanding and Energy Storage at BC Hydro. 4th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources” p. 1-26, 2010.
- [13] J. C. GOMEZ and M.M, MARCOS, “Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages” 2008 IEEE/PES

- Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA, IEEE, p. 1-5, 2008.
- [14] IEEE Std 1547TM-2003, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. 2003.
  - [15] BDEW. Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V, Technical Guideline Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network”, 2008.
  - [16] BELLIDO, M.M.H, Microrredes elétricas: Uma proposta de implementação no Brasil . UFRJ/COPPE, 2018.
  - [17] ROESLER, P. H. Modelagem Matemática Aplicada para o Corte de Carga em uma Microrrede Ilhada Considerando Indicadores de Qualidade de Serviço. UTFPR, 2021
  - [18] IEC 61850. Communication networks and systems in substations - Introduction and overview.