

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

NORMAS E PADRÕES DE CONEXÃO E OPERAÇÃO DE MICRORREDES – LEVANTAMENTO DO STATUS BRASILEIRO E PROPOSTA DE NORMATIZAÇÃO TÉCNICA

JOSÉ FILHO DA COSTA CASTRO⁽¹⁾; ANTONIO ROBERTO DONADON⁽¹⁾; RONALDO ANTONIO RONCOLATTO⁽¹⁾; JOAO HENRIQUE APARECIDO LEITE⁽¹⁾; ALEXANDER BARROS LIMA⁽¹⁾; VITTORIA EMANOUELLA MARTINS SOARES DE ANDRADE⁽¹⁾; RAFAEL GOMES BENTO⁽²⁾; JOSÉ GOMES DE MATOS⁽³⁾; RODOLFO QUADROS⁽⁴⁾; PEDRO ANDRE CARVALHO ROSAS⁽¹⁾; LEONARDO MENDES SOUSA XAVIER⁽¹⁾; JOÃO INÁCIO YUTAKA OTA⁽⁴⁾

IATI – INSTITUTO AVANÇADO DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (1); CPFL PAULISTA (2); FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (3); UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (4)

RESUMO

Um dos desafios enfrentados pelas concessionárias de distribuição para viabilizar a conexão e operação de Microrredes é a ausência de um conjunto sólido de normas técnicas no país. Uma alternativa tem sido utilizar e adaptar os padrões existentes aplicados para micro e minigeração distribuída. Nesse contexto, este informe técnico apresenta uma análise do status de desenvolvimento de normas, padrões e requisitos gerais de conexão e operação de microrredes, bem como uma proposta de normatização e estruturação de requisitos técnicos e operacionais relativos à implantação de projetos de microrredes no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE

Conexão e operação de microrredes; microrredes; mini e microgeração; regras e procedimentos normativos

1.0 INTRODUÇÃO

Em termos gerais, microrredes podem ser descritas como sistemas integrados compostos por recursos energéticos distribuídos e cargas elétricas operando como uma rede única e autônoma, em paralelo ou “ilhada” da rede de distribuição. Microrredes inteligentes são pequenos e modernos sistemas que imitam em menor escala o grande sistema elétrico centralizado de hoje. De forma similar aos sistemas elétricos de potência de grande porte, microrredes podem gerar, distribuir e regular o fluxo de eletricidade aos consumidores, conectando-se tanto entre si quanto com a rede principal para aumento da capacidade, confiabilidade e eficiência [1]. Os sistemas de armazenamento de energia geralmente são incluídos para garantir disponibilidade (possibilidade de operação ilhada) e confiabilidade [2]. Um dos desafios relevantes para a implantação das microrredes no Brasil está associado à possibilidade de operação ilhada. Atualmente, devido a preocupações relacionadas à segurança e estabilidade durante a restauração da rede após uma falha, o arcabouço normativo não permite que cargas ou geradores enquadrados como micro/minigeração operem no modo ilhado. Entretanto, algumas categorias de geradores, tais como os autoprodutores de energia operando em paralelismo com a rede, podem operar de forma ilhada da rede de distribuição. Vislumbra-se que uma adequada padronização do tema pode contribuir para o desenvolvimento e incorporação de novas tecnologias e até beneficiar a rede elétrica por meio de acordos operativos bem estruturados (por exemplo, via microrredes provendo suporte à rede).

Visando propor padrões e procedimentos no âmbito de microrredes, foi realizada uma extensa revisão das Normas e Padrões Internacionais, tal como a IEEE Std. 1547 (*Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*), IEEE Std. 2030.7/8/9 (*IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System, End-Use Applications, and Loads*) e IEC 62898 (*Guidelines for Microgrid Projects Planning and Specification – P2 for Operation*). Adicionalmente, buscou-se também avaliar as estratégias utilizadas pelos agentes de distribuição de outros países para viabilizar a conexão e operação de microrredes, garantindo o atendimento aos requisitos técnicos de tensão, frequência, estabilidade, proteções, entre outros, bem como o equilíbrio econômico-financeiro do mercado de distribuição de energia. Entre os macroobjetivos da iniciativa do projeto de pesquisa está também fomentar a discussão de pontos importantes e críticos para a elaboração de regulamentos e normas específicas a nível nacional para o tema, considerando cenários de implantação de microrredes em larga escala no país. As principais contribuições e os resultados apresentados neste trabalho são originados da experiência de implantação de um Living Lab para Microrrede na região de Campinas, São Paulo, Brasil. O projeto faz parte de uma iniciativa de pesquisa e desenvolvimento (P&D), que envolve as equipes da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e do Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), financiado pelas distribuidoras do Grupo CPFL Energia, com recursos de P&D da Agência Reguladora ANEEL. O conjunto normativo proposto no projeto de pesquisa classifica as microrredes em função da carga instalada e do porte físico e aplicação das instalações em: Nanogrid ou nanorrede, Campusgrid e Congrid. Com uma carga instalada de até 75 kW, a Nanogrid pode ser ter acoplamento CA, CC ou híbrido. Microrredes do tipo Campusgrid teriam capacidade instalada da ordem de Megawatt, incluindo

diferentes tipos de cargas, inclusive cargas especiais potencialmente perturbadoras, podendo suprir edifícios e incorporar tecnologias de produção de energia como solar, eólica, CHP (*Combined Heat Engine*) entre outros. Por fim, uma microrrede do tipo Congrid teria capacidade instalada de algumas centenas de kW, tendo como finalidade/aplicabilidade o suprimento a cargas majoritariamente do tipo residencial, podendo incluir sistema de geração fotovoltaica (SFV) e sistemas de armazenamento de energia (SAE) existente no local.

Por fim, os principais resultados mostram um panorama das normas e padrões atualmente em uso no Brasil para conexão e operação de microrredes, um levantamento das normas que devem influenciar a criação da regulamentação, a discussão dos aspectos críticos associados à conexão de microrredes e, principalmente, uma proposta inicial de padronização específica para os sistemas elétricos do Brasil.

2.0 VISÃO GERAL DAS NORMAS PARA MICRORREDES E REDS

Microrredes são dotadas de Recursos Energéticos Distribuídos - REDs (Distributed Energy Resources - DERs), recursos de geração e sistemas de armazenamento alocados de forma descentralizada, dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição, com conexão próxima à carga elétrica (a jusante do Ponto de Acoplamento Comum – PAC ou localizados junto a unidades consumidoras, a jusante do medidor (*behind-the-meter*). De certa forma, a implantação em larga escala das tecnologias de microrredes depende também do desenvolvimento e aplicação da infraestrutura de integração dos recursos distribuídos. Os REDs podem incluir tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, ações de eficiência energética, estratégias de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), bem como veículos elétricos com conversores e/ou estações de recarga aptas para a operação no modo V2G (*Vehicle to Grid*) [3]- [4]. Nos últimos anos, tem-se observado uma aceleração da inserção dos REDs, justificada principalmente pela redução nos custos de investimentos e transação, pela maior disseminação das tecnologias de telecomunicação e controle, bem como pelo papel mais ativo dos consumidores. O recente crescimento indica que a difusão destas tecnologias apresenta um elevado potencial disruptivo, capaz de transformar profundamente os sistemas elétricos que hoje são predominantemente operados com recursos de maior porte e gerenciados centralizadamente [5].

O conjunto de normas nacionais e internacionais aplicáveis a microrredes pode ser segmentado em função das entidades normatizantes e âmbito de aplicação, com destaque para o Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE e a International Electrotechnical Commission – IEC. Adicionalmente, em cada país há também normas e padrões locais e os criados pelas concessionárias locais de energia, que usualmente consideram as diretrizes e os padrões recomendados pelo IEEE e a IEC, mas com os devidos ajustes aos aspectos regulatórios locais e especificidades de cada sistema elétrico.

2.1 Normas Internacionais

Os critérios de conexão e operação de geração distribuída, sistemas de armazenamento e os controles adequados para a conexão de microrredes, atendendo os requisitos mínimos em relação a níveis de tensão, de frequência, de qualidade de energia e de capacidade de regulação de suas variáveis de estado, operação conectada à rede, operação ilhada, são descritos, principalmente, nas famílias de normas IEEE 2030 e IEC 62898: A) IEC Technical Specification Part 1: Guidelines for Microgrid Projects Planning and Specification (IEC TS 62898-1); B) IEC Technical Specification Part 2: Guidelines for Operation (IEC TS 62898-2); C) IEEE Standard for the Specification of Microgrids Controllers (IEEE Std 2030.7); D) IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers (IEEE Std 2030.8) e E) IEEE Recommended Practice for the Planning and design of Microgrid (IEEE Std 2030.9).

Associados às Microrredes, as infraestruturas de REDs permitem a maior participação do consumidor tanto na geração, quanto na gestão do consumo da sua própria energia. Em essência, os recursos distribuídos para compor uma microrrede contemplam: i) fontes de geração distribuída (GD), ii) tecnologias de armazenamento de energia (ESS - *Energy Storage Systems*), iii) veículos elétricos (EV – *Electrical Vehicles*) e seus sistemas de recarga. Cada um desses recursos apresenta características específicas de operação e, em função da possibilidade de ocorrência de impactos na rede de distribuição, devem apresentar requisitos diferenciados de conexão à rede de distribuição. As especificações técnicas e os testes de interconexão e interoperabilidade entre os sistemas de energia elétrica e os REDs são o foco da norma IEEE Std 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, que estabelece os critérios de desempenho da operação, as considerações de segurança e manutenção da interconexão, bem como os requisitos gerais associados à resposta a condições anormais, qualidade de energia, ilhamento e especificações de teste e requisitos para projeto, produção, avaliação de instalação, comissionamento e testes periódicos. Adicionalmente, além de atender os requisitos de interconexão, interface e interoperabilidade estabelecidos no padrão IEEE 1547, quando presentes, cada um dos REDs devem atender às normas específicas de cada tecnologia. Considerando todos os documentos avaliados, foi verificado que, no geral, os estados americanos vêm seguindo as diretrizes do padrão IEEE 1547 para nortear os requisitos de operação [6] de microrredes, enquanto os países Europeus vêm adotando requisitos em conformidades com as recomendações das normas IEC.

2.2 Normas Nacionais

Embora os padrões IEEE 2030, IEC 62898 e IEEE 1547 apresentem requisitos e diretrizes gerais para a interconexão e operação adequada e segura de microrredes e seus REDs, os sistemas elétricos apresentam especificidades intrínsecas ao local/região de instalação. Desta forma, as microrredes instaladas no Brasil devem observar os requisitos regulatórios locais, estabelecidos pela ANEEL com a anuência dos agentes do setor elétrico,

e as normas técnicas nacionais, com destaque para o conjunto normativo estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. – ABNT. Em termos de diretrizes normativas/regulatórias, os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, devendo ser obedecido por qualquer recurso energético conectado aos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil. Adicionalmente, ressalta-se que os diversos limites operativos requeridos no padrão IEEE são diferentes dos impostos no PRODIST (Módulo 8) [7]. Como ilustrado na Tabela 1, é possível observar que os limites da faixa de variação de frequência em regime normal de operação são distintos. Idem para os limites operativos requeridos para detecção e tempos de transição para ilhamento, no padrão IEEE também são diferentes dos impostos nas normas IEC, como ilustrado na Tabela 2.

Tabela 1 - Limites de Frequência - Comparação PRODIST vs IEEE

Norma	Limites de Frequência em Operação Normal em Regime Permanente (Hz)	Faixa de Variação
PRODIST	59,9 $< f \leq$ 60,1	$\pm 0,1$ Hz
IEEE 1547	58,8 $< f \leq$ 61,2	$\pm 1,2$ Hz

Tabela 2 – Limites operativos de tensão e frequência para ilhamento – Padrão IEEE vs IEC [8].

IEEE 1547		IEC	
Limitação de Frequência (Hz)	Tempo de Atuação (s)	Limitação de Frequência (Hz)	Tempo de Atuação (s)
$f < 59,3$	0,16	$f < 59$	0,1
$f > 60,5$	0,16	$f > 61$	0,1
Limitação de Tensão (Vrms _s)	Tempo de Atuação (s)	Limitação de Tensão (Vrms)	Tempo de Atuação (s)
$V < 0,5V_n$	0,16	$V < 0,5V_n$	0,1
$0,5V_n < V < 0,88V_n$	2	$0,5V_n < V < 0,85V_n$	2
$1,1V_n < V < 1,2V_n$	1	$V_n < V < 1,1V_n$	2
$1,2V_n < V$	0,16	$1,1V_n < V < 1,35V_n$	0,05

Embora o conjunto normativo para algumas tecnologias, como inversores para geração distribuída, esteja bem desenvolvido no Brasil, ainda não há normas específicas para microrredes da ABNT. Recentemente, no âmbito do COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações), foi instaurada a Comissão de Estudos 003 (CB-003), tendo como referência as diretrizes e requisitos estabelecidos na família normativa IEC 62898, com o objetivo de implementar (por meio da tradução/adaptação da norma IEC correlata) normas específicas para microrredes com conexão ao sistema interligado nacional e instaladas no Brasil. Um ponto de atenção é que não trata apenas de traduzir a norma internacional, mas ressaltar diferenças em relação, por exemplo, à frequência, como mostrado na Tabela 1.

3.0 MICRORREDES DE REFERÊNCIA DO PROJETO MERGE - NANOGRID, CONGRID E CAMPUSGRID - DEFINIÇÕES GERAIS E CLASSIFICAÇÕES NORMATIVAS

No âmbito do projeto MERGE da CPFL – Desenvolvimento de Microrredes Eficientes, Confiáveis e Sustentáveis, três microrredes são desenvolvidas: a Nanogrid (uma nanorede – microrrede de pequeno porte limitada a uma UC única), a Congrid (uma microrrede condominial) e a Campusgrid (uma microrrede com conexão em média tensão). Cada uma dessas microrredes apresenta peculiaridades associadas a topologias, potência instalada e tipo de aplicação. A Figura 1a ilustra o modelo conceitual da nanorede proposta no projeto MERGE, que tem como característica a presença de um barramento CC e, na topologia de referência, contendo os seguintes elementos: (1) Microgeração distribuída (GD); (2) Sistema de Armazenamento de Energia (SAE); (3) Estação de recarga veicular e (4) Conversores e subsistemas de integração. A nanorede é formatada idealmente de modo que a soma das cargas instaladas não supere o limite para conexão de instalações no Sistema de Distribuição em Baixa Tensão ou Rede Secundária (SDBT).

A microrrede Campusgrid, atualmente em estágio de implantação na Cidade Universitária Zeferino Vaz, na Unicamp/Campinas, tem como um dos requisitos o fornecimento de energia, com a máxima resiliência possível, para atender total ou em parte às cargas, diante de distúrbios que afetem a operação da rede de distribuição. A Campusgrid tem a capacidade de operar conectada à rede principal da concessionária ou de forma ilhada, com suprimento de energia da rede principal e a possibilidade de exportação do excedente. Quando operando no modo ilhado, além das fontes que irão prover a microrrede, a integração de sistemas de armazenamento de energia e/ou de outras fontes despacháveis serão utilizadas para mitigar interrupções e manter a operação segura e adequada da Campusgrid. A microrrede Congrid tem o objetivo de implantar um piloto para um conjunto de cargas residenciais, levando o conceito a consumidores da CPFL. Em princípio a ideia é projetar e implantar a microrrede em um local caracterizado como condomínio residencial, que passaria a integrar tecnologias de geração, armazenamento e gestão, podendo operar em modo conectado com a rede de distribuição ou em ilhamento forçado ou intencional.

Embora academicamente o conceito de microrrede seja sólido e amplamente aceito, um dos desafios a serem superados é o adequado enquadramento das Unidades Consumidoras dotadas de microrredes e a consolidação/convergência das definições normativas para diferentes categorias de microrredes, uma vez que as normas brasileiras impõem requisitos diferenciados de conexão e operação em função da carga instalada e da tensão de conexão. Os tópicos a seguir apresentam uma proposta de estruturação/categorização de microrredes, com as devidas definições, observando os limites regulatórios de carga e tensão impostos na Resolução Normativa 414 da

ANEEL.

O Artigo 12, da REN 414, aborda o enquadramento da Tensão de Fornecimento de unidades consumidoras em função da carga instalada e da demanda contratada: I – tensão secundária em rede aérea, quando a carga instalada na unidade consumidora for igual ou inferior a 75 kW; III – tensão primária de distribuição inferior a 69 kV, quando a carga instalada na unidade consumidora for superior a 75 kW e a demanda a ser contratada pelo interessado, para o fornecimento, for igual ou inferior a 2.500 kW; e IV – tensão primária de distribuição igual ou superior a 69 kV: quando a demanda a ser contratada pelo interessado, para o fornecimento, for superior a 2.500 kW. Utilizando regulamentação estabelecida, observando os aspectos técnicos consolidados na literatura e no arcabouço normativo, três categorias gerais de microrredes podem ser estabelecidas: (1) Nanorredes, (2) Microrredes condominiais e (3) microrredes de Campus. Os tópicos a seguir as descrevem sucintamente.

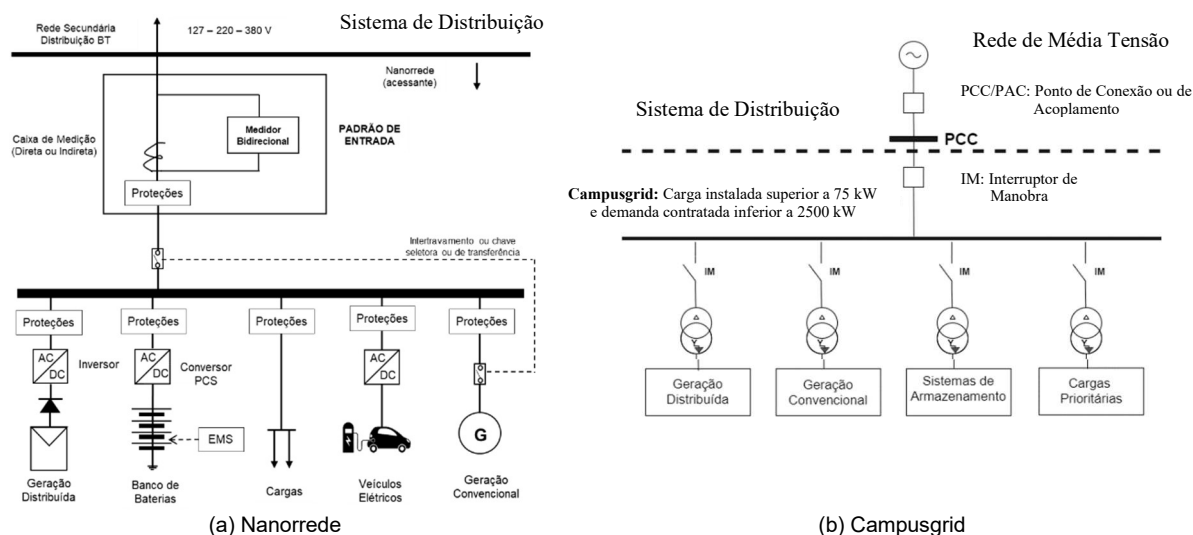


Figura 1 – Diagrama Unifilar – (a) Nanorrede e seus REDs – com acoplamento CA e (b) Esquema Genérico de uma Campusgrid – Adaptado da GED 13 da CPFL [9].

3.1 Nanorrede – Definição normativa

Nanorredes são microrredes de pequeno porte, delimitadas a uma única unidade consumidora de um sistema de distribuição de energia, capazes de se conectar ou de se desconectar com outras unidades por meio de um gateway. Nesse sistema, cargas locais são alimentadas pela produção de energia local e podem até optar por utilizar um sistema de controle ou o armazenamento de energia [10].

Considerando o contexto de aplicação, o arcabouço normativo e regulatório brasileiro, uma Microrrede do tipo Nanorrede pode ser definida referencialmente como: “Unidade consumidora única, com carga instalada de até 75 kW, formando uma microrrede dotada de recursos energéticos distribuídos operando de forma coordenada/controlada, com conexão em baixa tensão, com a possibilidade de operação conectada na rede distribuição da concessionária ou de forma ilhada, ainda que apenas momentaneamente, desde que adequadamente dimensionada para tal e obedecendo o Acordo Operativo e as normas técnicas vigentes.

Um diagrama unifilar de conexão, para definição do padrão de entrada de nanorredes conectadas ao SDBT pode ser observado na Figura 1a, considerando acoplamento CA e CC e a presença de GD, gerador (fonte não-renovável), SAE, estação de recarga para veículos elétricos e cargas convencionais. O intertravamento do gerador de emergência é um requisito para evitar a operação em paralelismo com a rede de distribuição (permitido apenas para conexões em média e alta tensão).

3.2 Campusgrid e Congrid

Microrredes do tipo Campusgrid ou Congrid podem ser definidas como: Grupo de cargas interconectadas operando de forma coordenada como uma unidade consumidora única, com carga instalada superior a 75 kW e a demanda contratada no ponto de conexão para o fornecimento, igual ou inferior a 2.500 kW, formando um micro sistema elétrico autônomo, dotado de recursos energéticos distribuídos, cujo ponto de entrega ocorre em média tensão, com a possibilidade de operação conectada na rede distribuição da concessionária ou de forma ilhada, por certos períodos de tempo e ainda que apenas momentaneamente, desde que adequadamente dimensionada para tal e obedecendo o Acordo Operativo e as normas técnicas vigentes. Podendo ser dotada dos seguintes subsistemas: (1) Cargas essenciais ininterruptíveis: Cargas que devem ter suprimento de forma continuada, sem interrupções de curta ou longa duração; (2) Cargas convencionais não-essenciais: Cargas que podem ter o suprimento interrompido em situações de desconexão da microrrede ao sistema de fornecimento da distribuidora; (3) Sistema de Armazenamento de Energia (SAE): fonte de energia/potência secundária para as cargas; (4) Geração Própria: grupo gerador com capacidade de operar em paralelismo com as cargas da microrrede e (5) Sistema de gerenciamento de

energia (EMS – Energy Management System termo derivado do inglês): sistema de controle, em alto ou baixo nível, responsável por gerenciar e controlar a operação dos subsistemas da microrrede.

Microrredes do tipo Campusgrid e Congrid se diferenciam pelo perfil de implantação e aplicação final. A Congrid é uma microrrede formada por unidades consumidoras que formam um condomínio residencial, podendo cada UC ser individualizada em uma nanorrede. Tendo como base tais informações, o esquema genérico apresentado na Figura 1b ilustra uma topologia de conexão de microrredes em média tensão. É importante ressaltar, contudo, que um Campusgrid não necessariamente precisa conter todos esses elementos. Também não há a necessidade da distribuição em média tensão ser radial.

A conexão e operação de microrredes pode impor uma série de desafios operativos, uma vez que a presença de REDs (usualmente geração renovável variável) associados a cargas gerenciáveis e sistemas de armazenamento, coordenados por um sistema de controle/gerenciamento atuando como uma entidade única, ainda é uma condição nova nos sistemas de distribuição energia. Nesse sentido, embora o desenvolvimento das tecnologias esteja avançado e as soluções tecnológicas estejam consolidadas, alguns aspectos normativos e regulatórios podem ser considerados críticos, devendo ser abordados e devidamente endereçados para assegurar a penetração sustentável de microrredes. Entre esses aspectos, pode-se citar os modos de operação da microrrede e a possibilidade de exportação do excedente energético, a definição dos atores e modos de gestão dos ativos, a maior complexidade para o ajuste dos sistemas de proteção, a operação dos sistemas de armazenamento e o provimento de serviços ancilares, as preocupações associadas ao padrão de conexão e a segurança das ações de manutenção, o gap existente na normatização dos inversores híbridos e os aspectos regulatórios correlacionados. O tópico a seguir apresenta uma breve descrição destes aspectos.

4 ASPECTOS CRÍTICOS PARA NORMATIZAÇÃO

A principal diferença entre a utilização de microrredes e a simples integração de unidades de geração distribuída às redes de distribuição é a possibilidade de operação tanto em modo interligado quanto em modo ilhado [11]. A operação de uma microrrede pode, então, ser dividida em três modos: conectada à rede, em ilhamento (ou operação autônoma) e sincronização/reconexão (modos transitórios).

4.1 Modos de Operação - Operação Conectada à Rede (Operação em Paralelo)

A operação em paralelo ocorre quando a microrrede (MR) produz energia de corrente alternada enquanto está eletricamente conectada ao equipamento de geração da concessionária local. Nessa condição, a MR deve apresentar valores de tensão e de frequência compatíveis com as da rede de distribuição [12]. Deve atender, também, os requisitos mínimos de qualidade de energia, bem como não interferir nas funções de proteção e confiabilidade da concessionária. A operação paralela pode ser dividida em casos em que toda a energia produzida é consumida pela carga do cliente (chamada de não exportação) e aqueles em que parte dessa energia é exportada para o sistema de distribuição da concessionária (chamada de exportação). A exportação é definida em relação ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC), onde o equipamento da concessionária se conecta ao equipamento do cliente. Na maioria dos casos, é demarcado pelo medidor de faturamento, podendo, contudo, estar associado a um transformador de serviço, a uma chave seccionadora ou algum outro equipamento, conforme definido pela concessionária.

4.2 Modos de Operação - Operação em modo Ilhado

Uma das características mais importantes de uma microrrede é sua capacidade de operar tanto no modo conectado à rede quanto no modo ilhado. Quando a MR opera no modo conectado à rede, a rede principal é quem estabelece as condições operativas dos níveis de tensão e da frequência. No modo ilhado, a tensão e a frequência são determinadas pela operação de seus REDs e, portanto, um esquema de controle apropriado é necessário para garantir uma operação estável e resiliente [12]. Segundo a norma IEC 62898, a MR pode ir para o modo de ilhamento quando: i) os requisitos de qualidade e estabilidade de energia não forem totalmente atendidos pela rede principal (para proteger os equipamentos e manter a integridade), e ii) quando for solicitado pelo Operador do Sistema de Distribuição. Este Operador pode se beneficiar com a inclusão de MRs na rede principal, pois pode considerá-las como “cargas flexíveis” (ou mesmo “geração flexível”, dependendo da direção da troca do fluxo de energia). Isso significa que essas cargas podem ser deixadas de fora sempre que necessário (por exemplo, no caso de uma contingência) e reconectar em condições normais da rede, sem graves impactos econômicos e sociais. Além disso, o perfil do dia seguinte para a demanda de energia ou geração da MR pode ser regulado conforme acordos predefinidos entre o Operador do Sistema de Distribuição e o operador da MR [13].

A transição para a operação em ilha pode ocorrer como resultado de uma falha permanente na rede principal ou devido à uma desconexão intencional. No caso de a transição ser malsucedida (por exemplo, devido à uma falha durante a transição) ocorre o desligamento das cargas - nesse caso, a estratégia de black-start é empregada. Na Figura 2 são apresentados de maneira detalhada os modos operacionais. Nesse sentido, o restabelecimento do serviço é realizado primeiro desligando as unidades de geração de distribuição (GD) e, a seguir, religando-as de forma controlada. Vale ressaltar que, segundo a norma IEC TS 62898-2, os requisitos de operação de uma microrrede no modo ilhado, com exceção das proteções, não difere dos requisitos de quando ela está operando conectada com a rede da distribuidora. Em outras palavras, os limites de tensão, frequência, distorções harmônicas, entre outros, devem ser equivalentes e são especificados pelas normas da concessionária. A microrrede deverá ter recursos para manter esses níveis dentro dos limites durante a operação ilhada. Para microrredes conectadas ao sistema de

distribuição, mesmo durante a operação ilhada recomenda-se que a MR deve atender a todos os requisitos de operação determinados pelo PRODIST.

4.3 Sistemas de Armazenamento em Microrredes

Devido à variabilidade e intermitência da GD, pode ser difícil manter os requisitos usuais de frequência, ao mesmo tempo que acomoda as flutuações de carga, principalmente em modos de operação de forma ilhada. Nesse sentido, os Sistemas de Armazenamento de Energia – SAE desempenham um papel fundamental, principalmente se houver a possibilidade de paralelismo contínuo e desconexão automática da rede elétrica. Devido à capacidade de operar como carga ou gerador, carregando ou descarregando, o emprego de SAE pode mitigar o impacto das variações da GD renovável e da carga, garantindo a estabilidade e confiabilidade da Microrrede [14]. Entre os requisitos para o SAE quando a MR estiver no modo ilhado, cita-se: a) Havendo mais de um sistema de armazenamento de energia, para aquele com conversores de maior capacidade recomenda-se adotar o controle no modo V/f (atuando como formador de rede – função *grid forming*), para estabelecer e manter a tensão e frequência do sistema, desde que não haja outro RED de atuação rápida/controlável (como microturbinas ou geradores a diesel) utilizado para esta finalidade e b) Quando a potência de saída dos recursos de geração da microrrede forem insuficientes para atender a demanda, o SAE deve iniciar a compensação de potência atuando como geração. Quando a potência de saída dos recursos de geração não controláveis da microrrede excederem a demanda da carga, a potência excedente deve ser absorvida pelo sistema de armazenamento (atuação como carga). Caso o SAE atue como geração e ainda assim não for possível atender a demanda de potência com segurança, o EMS deve atuar os esquemas de alívio de carga (corte de carga – equivalentes aos ERACs implementados via SEPs – Sistemas Especiais de Proteção no sistema elétrico de potência). Em relação aos aspectos críticos/pontos de atenção, ressalta-se que ainda não há norma técnica brasileira específica para sistemas de armazenamento via baterias (BESS – *Battery Energy Storage System*) ou mesmo para inversores híbridos. No âmbito da ABNT foi instaurada também uma comissão técnica para implantação normas para sistemas de armazenamento (TC 120). Segundo a Lei de Liberdade Econômica, se o país não tiver normas atualizadas sobre determinado assunto, normas internacionais devem ser adotadas.

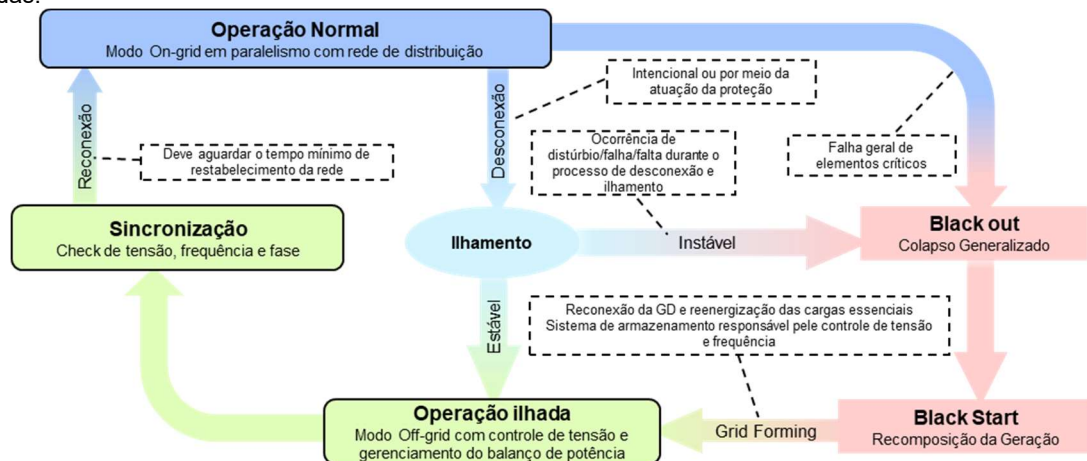


Figura 2 – Modos de Operação de Microrredes [8].

4.4 Atores, modos de gestão e responsabilidades

Assim como nos sistemas elétricos convencionais, estruturado e com funções bem definidas e segmentadas nas instituições setoriais, as funções gestão e operação das microrredes devem ser adequadamente atribuídas aos atores responsáveis. A operação das microrredes com unidades de geração distribuída requer uma estratégia de gerenciamento de potência (Power Management Strategy – PMS) e de energia (Energy Management Strategy – EMS) [15]. Para a implementação dessas estratégias, adota-se um nível hierárquico para estabelecer um padrão operativo, como mostra a Figura 3, no qual são definidos os seguintes atores: (1) ORD – Operador da Rede de Distribuição, (2) OM – Operador de Mercado, (3) OCM – Operador Central da Microrrede (ou MCC – Microgrid Central Controller), e um OL – Operador Local, associado a cada Central de Geração/Carga da microrrede. Em função da ainda incipiente inserção de microrredes no Brasil, modelos com controle local centralizado têm sido implantados (com o controlador/operador local desempenhando ambas as funções de PMS e EMS).

Em cenários com disseminação massiva de microrredes, a adequada atribuição das responsabilidades operativas será essencial para a operação eletricamente segura do sistema elétrico. A Figura 3 ilustra uma proposta/modelo com atribuição de atores para a gestão descentralizada de microrredes, adaptado aos padrões institucionais do modelo setorial brasileiro, considerando a possibilidade de microrredes formarem contratos de fornecimento de energia via ACL – Ambiente de Contratação Livre. A camada regulatória é composta por órgãos que podem influenciar/atuar nas camadas de regulamentação normativa técnica e econômica: (1) ANEEL – visando estabelecer a regulação técnica-econômica com maior foco nas camadas administrativa-jurídica-contratual, (2) ONS/Distribuidora – observando as interfaces com o Operador de Rede e (3) CCEE/Distribuidora – observando as interfaces com os operadores de mercado. Os controles implementados em cada nível hierárquico devem estar

interfaceados por um sistema de comunicação com interoperabilidade. O ORD e o OM são incorporados na estrutura de gestão do sistema elétrico ou do sistema de distribuição, cabendo ao OCM (alocado no centro de operação da microrrede ou implementado no próprio EMS para microrredes de menor porte) a interface entre as entidades e a microrrede. Dadas as especificidades de cada aplicação com microrrede e a inserção ainda incipiente no setor elétrico, a definição da responsabilidade entre os agentes ainda não tem sido abordada por meio de regulamentação específica. O tema não dispõe, portanto, de regras consolidadas, permitindo então que possam ser firmados Acordos Operativos estabelecendo as diretrizes, requisitos, regras e condições gerais de conexão e procedimentos operacionais em cada caso.

4.5 Proteções em Microrredes

A proteção elétrica desenvolvida para aplicação em microrredes deve contemplar uma série de requisitos quando se trata de análise de curtos-circuitos. A microrrede pode operar conectada à rede de distribuição ou de maneira ilhada, e, em ambos os casos, o sistema de proteção deve ser capaz de atuar de forma adequada para que não cause impacto na rede de distribuição e na própria microrrede. Dessa forma, alguns pontos devem ser levados em consideração no momento de definir qual esquema protetivo será utilizado na microrrede: I. Na ocorrência de uma falta na rede de distribuição, a microrrede deve ter a capacidade de operar em condição ilhada a fim de preservar as cargas dentro da sua operação elétrica; II. A microrrede deve possuir a capacidade de identificar e atuar em faltas que ocorram dentro da sua rede operativa, seja conectada à rede de distribuição ou em modo de operação ilhada; III.

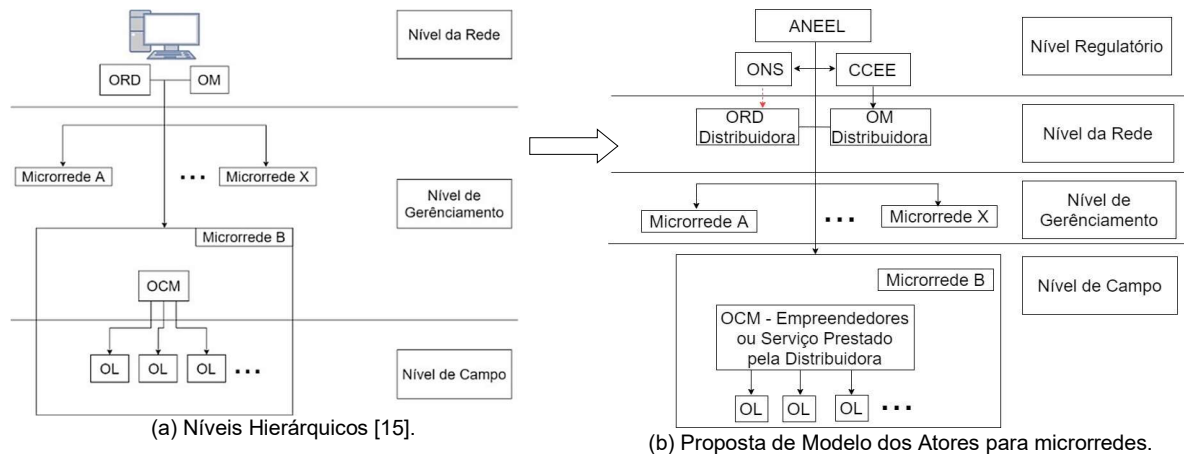


Figura 3 - Níveis Hierárquicos em uma microrrede e Modelo dos Atores acerca das microrredes no Brasil.

Em caso de microrrede com elevada participação de geração distribuída, é necessário que os níveis de curto-circuito sejam calculados de acordo com a variação da participação da geração para que os disparos dos relés de proteção sejam redefinidos para atender aos requisitos de proteção; IV. Os dispositivos de proteção devem possuir comunicação rápida e confiável e atuar de acordo com o estado operativo da microrrede; V. Para garantir os níveis de curto-circuito dentro da faixa operativa dos equipamentos de proteção, recomenda-se que o projeto da microrrede disponha de um sistema de armazenamento de energia robusto ou sistema com inversor e/ou máquina com mecânica inercial para elevar os níveis de curto-circuito durante uma falta.

No que se refere aos aspectos normativos de proteção aplicáveis ao ponto de conexão da unidade consumidora dotada de microrrede com micro e minigeração distribuída com inversor fotovoltaico eletrônico, o equipamento deve atender irrestritamente os requisitos da ABNT NBR 16149:2013, NBR 16150:2013 e NBR IEC 62116:2012 [16]. Os controladores de microrredes devem atender ao disposto na IEC 2030.7. Para o ponto de conexão, as proteções devem incorporar, a depender da potência instalada, as proteções de sub e sobretensão (27/59), sub e sobrefrequência (81 U/O), desbalanço de tensão (47), sobrecorrente direcional (67), sobrecorrente c/ restrição de tensão (50V/51V), sincronismo (25), Anti-ilhamento, sobrecorrente (50/51), sobrecorrente de neutro (50N/51N/51G), sobretensão de neutro (59N), direcional de potência (32), medição de ângulo de fase (78), taxa de variação de frequência (81 df/dt).

5 CONCLUSÃO

Este Informe Técnico teve como objetivo apresentar uma visão geral das Normas Técnicas internacionais e Nacionais relacionadas à conexão e operação de microrredes, considerando desde sistemas de pequeno porte limitadas a uma unidade consumidora – categorizadas como nanogrid, até sistema de médio porte com conexão em média tensão – caso da Campusgrid e Congrid. Dadas as especificidades associadas à integração de microrredes ao sistema elétricos, no âmbito do projeto MERGE, estão sendo propostas de normas segmentadas em (1) conexão e (2) operação, aplicáveis a Nanorredes, Congrid e Campusgrid.

Em termos de requisitos operativos de microrredes, observando que o objetivo normativo é garantir a segurança da operação e atender os limites de tensão, frequência, entre outros, para o ponto de conexão das

microrredes ao sistema de distribuição foram adotados como referência os limites impostos pelo PRODIST da ANEEL para conexão de unidades consumidoras. Adicionalmente, cada um dos REDs (sistema fotovoltaico, bateria, chaves, carregadores, entre outros) deve atender também as normas técnicas associadas a cada tecnologia de equipamento. No contexto específico de microrredes no Brasil, ainda está em elaboração uma norma técnica do tipo ABNT NBR IEC abordando especificamente os requisitos de operação. Desta forma, neste estágio de maturação do tema, como documentos de referência para operação de microrredes são utilizados o grupo de normas internacionais IEEE 1547, IEEE 2030 e IEC 68892.

Dado o estágio de desenvolvimento inicial do arcabouço normativo e regulatório associado à Microrredes conectadas aos sistemas de distribuição no Brasil, este informe teve como objetivo consolidar as discussões de características e pontos críticos, de modo a contextualizar as regras propostas, descrevendo os principais pontos que devem ser considerados para uma operação estável e segura, em todos os modos de operação de microrredes de pequeno e médio porte. Entre os pontos críticos estão: os modos de operação, os requisitos mínimos para os diferentes modos de operação, estudos operativos, interoperabilidade de sistemas, operação de sistemas de armazenamento em ambiente de microrredes e as características gerais para a celebração do Acordo Operativo. Os estudos, levantamentos e proposições apresentados, em conjunto com as famílias de normas IEEE 1547, IEEE 2030, IEC 62898 e UL1741, podem ser a base para a proposição dos procedimentos operativos iniciais para microrredes no Brasil. Por fim, ressalta-se, ainda, que apesar dos equipamentos e conversores atenderem os requisitos das normas técnicas, a conexão dos recursos distribuídos, quando não planejada adequadamente, pode provocar distúrbios, como desequilíbrio de fases, fluxo reverso, sub/sobretensões, entre outros. Desta forma, reforça-se a necessidade de se avaliar e determinar critérios operativos específicos visando mitigar essas ocorrências, inclusive com a imposição de execução de estudos pré-operacionais e a formação de Acordos Operativos.

Os autores agradecem ao programa de P&D do Setor Elétrico, regulado pela ANEEL, através do projeto PD-00063-3058/2019, intitulado “PA3058 – Merge: Desenvolvimento de Microrredes Eficientes, Confiáveis e Sustentáveis”, que insere-se neste contexto contribuindo de forma efetiva por meio do desenvolvimento de propostas de Normas, com uma visão ampla dos atores, de modo a promover e potencializar o emprego de novas tecnologias, manter o equilíbrio sustentável entre os agentes e objetivando a segurança sistêmica de longo prazo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Márcio Venício Pilar Alcântara (ANEEL), “Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica,” Revista O Setor Elétrico, pp. 36-45, Cap. VIII, 2011.
- [2] D. Manz, R. Piwko e N. Miller, “Look Before You Leap: The Role of Energy Storage in the Grid,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, pp. 75 - 84,, July-Aug. 2012.
- [3] FGV Energia, “Distributed Energy Resources,” Maio, 2016.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Nota Técnica EPE-DEA-NT-016/2018-r0: Recursos Energéticos Distribuídos - Impactos no Planejamento Energético,” Rio de Janeiro, julho de 2018.
- [5] World Energy Council, “World Energy Trilemma,” 2017.
- [6] M. S. M. I. Consortium, “Missouri Microgrid Interconnection Requirements: Prepared for the Missouri Department of Economic,” June, 2016.
- [7] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,” Revisão 12, vigência a partir de 01/01/2021.
- [8] O. Palizban, K. Kauhaniemi e J. M. & Guerrero, “Microgrids in Active Network Management-Part II: System Operation,” *Power Quality and Protection. Renewable & Sustainable Energy Reviews*, pp. 440-451, 04 04 2014.
- [9] CPFL- Companhia Paulista de Força e Luz, “Norma Técnica GED13 - Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição,” Versão 2.25, Campinas, 2020.
- [10] D. Burmester, R. Rayudu, W. Seah e D. Akinyele, “A review of nanogrid topologies and technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, p. 760–775, 2017.
- [11] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulos, R. Yinger e J. Eto, “The CERTS MicroGrid Concept. White Paper on Integration of Distributed Energy Resources,” 2002.
- [12] IEC - International Electrotechnical Commission, “IEC TS 62898-2: Guidelines for Operation,” 2018.
- [13] L. Zacharia, A. Kyriakou, L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, C. Panayiotou, B. Azzopardi e N. M. e. N. Borg, “Islanding and Resynchronization Procedure of a University Campus Microgrid,” *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Sevilla, 2018.
- [14] D. W. Gao, *Energy Storage for Sustainable Microgrids*, Denver, USA: Elsevier, 2015.
- [15] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou e A. Dimeas, “Microgrid Management - Control and Operation Aspects of Microgrids,” *IEEE Power and Energy Magazine*, 2008.

- [16] CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz, "GED 15303 - Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Compensação de Energia Elétrica," 2019.
- [17] CPFL- Companhia Paulista de Força e Luz, GED 33: Ligação de Autoprodutores em Paralelo com Sistema de Distribuição da CPFL, 2017.
- [18] L. Zacharia, A. Kyriakou, L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, C. Panayiotou, B. Azzopardi, N. Martensen e N. Borg, "Islanding and Resynchronization Procedure of a University Campus Microgrid," em *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Sevilla, 2018.

DADOS BIOGRÁFICOS



JOSÉ FILHO DA COSTA CATRO, Possui Doutorado pela PUC Rio, Mestrado pela UNIFEI e graduação em Engenharia Elétrica pela UFMA. Atuou junto à UFES/EBSERH (Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares). Foi Analista de Pesquisa Energética, na Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Atualmente é professor na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, onde desenvolve pesquisas na área de microrredes, sistemas de distribuição de energia, tecnologias de mobilidade elétrica e estudos elétricos de conexão de fontes de geração.

(2) PEDRO ANDRE CARVALHO ROSAS Possui doutorado pela Universidade Técnica da Dinamarca (2003). Atualmente é professor Adjunto da UFPE. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: turbinas eólicas, qualidade de energia, integração elétrica de novas fontes, armazenamento e mobilidade elétrica. Atualmente coordena dois projetos estratégicos: 21 da ANEEL sobre aplicação de armazenamento em centrais eólicas com objetivo de viabilizar sistemas de armazenamento e o 22 da ANEEL sobre mobilidade elétrica.

(3) ANTONIO ROBERTO DONADON Consultor independente, doutorando em Engenharia Elétrica (UNICAMP) – área Smart Grids – microrredes; mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos (UNICAMP); foi gerente do Programa de P&D da CPFL Piratininga, junto a ANEEL, vivência no setor elétrico de mais de 30 anos e de mais de 10 anos na implantação de metodologias de prospecção, construção e avaliação de portfólios de projetos; elaboração/construção/gerenciamento de projetos com foco tanto na operação, quanto na inserção de novas tecnologias de smart grids, proposição e gerenciamento de projetos de energias renováveis, de GD e digitalização.

(4) RONALDO ANTONIO RONCOLATTO Graduado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (1981) Com pós-graduação em Administração de Empresas pela EAESP/FGV, MBA em Gerência de Projetos e Especialização em Planejamento Energético. Ingressou na CPFL em 1982 e fez carreira na área de Engenharia de Distribuição, onde exerceu o cargo de Gerente de Engenharia de Manutenção e Normas e Padrões. Atualmente é Pesquisador Sênior na Área de Sistemas de Energia e consultor nas áreas de distribuição de energia elétrica, geração fotovoltaica, microrredes, armazenamento de energia e integração de projetos.

(5) JOAO HENRIQUE APARECIDO LEITE Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos e mestrado em Operação de Sistemas Eletroenergéticos pela Universidade de São Paulo. Atualmente, é pesquisador associado ao Instituto de Tecnologia e Inovação (IATI) trabalhando no desenvolvimento de normas e padrões de microrredes em um projeto de P&D. Adicionalmente, atua também como engenheiro de pesquisa e desenvolvimento no Laboratório Colaborativo Vasco da Gama (VGColab), na qual estuda e auxilia no desenvolvimento de pesquisa em sistemas de armazenamento de energia para aplicações de larga escala. Possui experiência em geração renovável, estudos elétricos e Sistemas de Armazenamento de Energia.

(6) ALEXANDER BARROS LIMA Possui graduação em Engenharia Elétrica-Eletrônica PUC-MG, mestrado e doutorado pela UFMG. Atualmente é professor Adjunto na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em aterramentos elétricos (projetos, medição, modelagem, simulação e análise de desempenho frente à correntes de baixas e altas frequências), compatibilidade eletromagnética e transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

(7) VITTORIA EMANOUELLA MARTINS SOARES DE ANDRADE, possui graduação em engenharia elétrica pela UFMA, com passagem no exterior na Lakehead University/Canadá. Tem experiência na área de estudos elétricos de conexão de empreendimentos ao SIN. Atualmente é pesquisadora de iniciação científica no Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação - IATI e mestranda em Engenharia Elétrica na UFPE.

(8) RAFAEL GOMES BENTO Analista de Projetos de Inovação na CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz. Possui formação técnica em eletroeletrônica pelo Colégio Técnico de Campinas (2008) e graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pelo Centro Universitário Salesiano de São Paulo (2015). Atua na prospecção, formatação e gerenciamento de projetos de inovação tecnológica no âmbito do Programa de P&D do Setor de Energia Elétrica, regulado pela ANEEL, com foco em projetos voltados ao segmento de distribuição de energia.

(9) LEONARDO MENDES SOUSA XAVIER Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Técnico em Eletrotécnica pelo Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

(IFPE). Atualmente, trabalha como Engenheiro de estudos elétricos na área de fluxo de potência, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos na empresa Aeroespacial Tecnologias.

(10) JOSÉ GOMES DE MATOS Doutor em Engenharia Elétrica pela UFMA (2014), Mestre em Engenharia Elétrica pela UFCG (1986) e Graduado em Engenharia Elétrica pela UFCG (1980). É Professor Associado 3 da Universidade Federal do Maranhão. Suas principais áreas de interesse são Eletrônica de Potência, Sistema de Controle, Sistema de Geração de Energia Elétrica com Fontes Renováveis, Geração Distribuída e Microgrids (Microrredes / Minirredes).

(11) RODOLFO QUADROS Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso, em 2013, Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal de Mato Grosso, em 2017, Mestre em Engenharia de Edificações e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso, em 2017 e atualmente está cursando Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, na área de microrredes. Desde 2013 é Engenheiro Eletricista na Universidade Federal de Mato Grosso. As áreas interesses de pesquisa incluem teorias de potência, microrredes, redes inteligentes, medição e faturamento de energia elétrica, qualidade de energia elétrica e segurança.

(12) JOÃO INÁCIO YUTAKA OTA Possui doutorado em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Tecnologia de Tóquio - Tokyo Institute of Technology (2016), mestrado (2011) e graduação (2008) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é Pesquisador de Pós-Doutorado na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Possui experiência em Eletrônica de Potência aplicada a Redes Elétricas, Conversores de Potência, Eletrônica Industrial e em Sistemas e Controles Eletrônicos. Tem interesse em Eletrônica de Potência aplicada a Redes Elétricas, Sistemas de Armazenamento por Baterias, Compensadores Síncronos Estáticos (Statcom), Microrredes, Smart Grids e Qualidade de Energia Elétrica.