



O QUE SÃO MICRORREDES? – CONCEITOS, COMPONENTES E CONTROLE

Marcus E. T. Souza Jr.*¹, Fernando C. Melo¹, Ernane A. A. Coelho¹, Luiz C. G. de Freitas¹

¹NUPEP – Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – Este artigo coloca em debate a seguinte pergunta: O que são microrredes? Apesar da alta popularidade do assunto entre acadêmicos, pesquisadores, engenheiros e empresas, raramente há um consenso sobre sua definição. O problema não é a falta de respostas para a questão posta, mas, ao contrário, a abundância delas. Certamente existem algumas convergências entre os vários caminhos, pois, se fosse diferente, não comporiam uma única categoria de sistema. É por esses motivos que este trabalho propõe tão somente apontar certas direções sobre a discussão do tema das microrredes. Nele, são abordados os principais conceitos sobre a matéria a partir de suas características fundamentais, delineando algumas estratégias específicas e pontos em comum. Em seguida, os componentes que as formam são assinalados. Finalmente, o caso particular do controle hierárquico baseado no método *droop* convencional foi escolhido e exposto dentre as diferentes técnicas de controle para microrredes.

Palavras-Chave – Controle hierárquico, controle por método de *droop*, geração distribuída, microrredes, paralelismo de inversores, redes elétricas inteligentes.

WHAT ARE MICROGRIDS? – CONCEPTS, COMPONENTS AND CONTROL

Abstract – This paper puts in debate the following question: What are microgrids? Despite the high popularity of the subject among academicians, researchers, engineers and companies, there is rarely a consensus about its definition. The problem is not the lack of response to the issue, but on the contrary, its abundance. There are certainly some convergences among the various paths, for if it were different, they would not form a single system category. It is for these reasons that this work proposes only to point out certain directions on the microgrids topic discussion. The main concepts of the matter are approached from their fundamental characteristics, outlining some specific strategies and common points. Then the components that form them are indicated. Finally, the case of the hierarchical control based on the droop method is chosen and exposed among the different control techniques for microgrids.

Keywords – Distributed generation, droop control method, hierarchical control, microgrids, parallel-connected inverters, smart grids.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um elemento essencial na sociedade moderna. Ela é empregada em todos os produtos, serviços e atividades em que a humanidade atua. Por isso, é de suma importância o modo como ela é produzida, distribuída e consumida. Recentemente, as maiores preocupações com o bem-estar social e com o meio ambiente e o progresso tecnológico colocaram a organização da rede elétrica em julgamento. Após quase um século, a estrutura inalterada em essência, que parece ter apenas crescido sob os mesmos moldes, e as concepções tradicionais do sistema elétrico parecem ruir e dar espaço a uma nova arquitetura. Foi neste contexto que surgiu a ideia contemporânea sobre microrredes.

Uma das forças que impulsionou o aparecimento delas foi a expansão da Geração Distribuída (GD) no setor elétrico. As tecnologias de GD são consideradas aqui todos os dispositivos de produção de energia elétrica que podem ser instalados nos mais variados lugares, independente do seu ponto de conexão no sistema elétrico e de sua capacidade, estando espalhada por toda a rede elétrica (junto à carga, na distribuição, na transmissão e como usinas) ou mesmo completamente isolada [1]. Dentre suas distintas formas, a GD de pequeno porte, renovável e próxima ao consumo é a que mais tem ganhado adeptos e evoluído atualmente. Os maiores motivos são o reduzido custo, o baixo impacto ambiental e os benefícios sociais.

Além da GD, outros avanços tecnológicos contribuíram para a materialização das microrredes. A Eletrônica de Potência (EP), especialmente quando empregada na GD [2], é um deles. A fabricação e o uso de dispositivos de EP mais eficientes, menores e mais robustos agregados a métodos de controle avançados permitem a realização de diversas configurações de microrredes e, mais do que isso, possibilitam o gerenciamento de energia adequado delas. Outros recursos indispensáveis para a evolução das microrredes que podem ser citados são a utilização de computadores modernos, os microcontroladores, a digitalização, as telecomunicações, as tecnologias da informação, a automatização e as novas técnicas da engenharia aplicadas ao sistema elétrico.

Mais importante ainda do que os aspectos tecnológicos, as motivações socioeconômicas e ambientais também levaram

*marcus11jr@hotmail.com

ao desenvolvimento das microrredes. No âmbito do meio ambiente, a poluição atmosférica e a depleção dos combustíveis fósseis, os impactos das grandes hidroelétricas nos rios e seus arredores e os resíduos e o risco de acidentes de usinas nucleares são algumas das causas para se diversificar as fontes de energia elétrica mais comuns da matriz mundial. Neste mesmo sentido, as mudanças climáticas ocasionadas por emissões antropogênicas de gases do efeito estufa são outro ponto central. O aquecimento global elevou a temperatura média global em, aproximadamente, 1°C acima dos níveis pré-industriais [3] e um maior aumento já nos próximos anos pode resultar em graves consequências para a humanidade e para a natureza. Das emissões, o setor de energia foi um dos maiores contribuintes com uma parcela de 35% do total em 2010 [4], o que faz com que transformações nesta área sejam imprescindíveis.

Já nas conjunturas social e econômica, pode-se dizer que, nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, há uma forte exigência dos usuários por uma eletricidade que seja barata, confiável e de alta qualidade, com seus indicadores sendo cada vez mais rigorosos. Estas cobranças se unem ao crescimento do consumo mundial de energia elétrica que passou de 10.901,84 TWh para 23.106,86 TWh entre 1990 e 2016 [5]. Todavia, apesar do crescimento, 850 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade [6], um número muito elevado. Tais considerações mostram que é preciso rapidamente conciliar um maior acesso à energia elétrica sustentável com preços baixos a um patamar elevado de confiabilidade e qualidade.

Todos estes itens convergiram na consolidação das microrredes como um novo modelo único de sistema elétrico que tenta abarcar os avanços tecnológicos mais recentes de produção e distribuição de eletricidade na tentativa de resolver problemas de ordem social, econômica e ambiental. A ascensão destas estruturas em conjunto com suas bases, técnicas ou não, faz com que seja de ampla relevância o conhecimento do tema. O propósito deste artigo é, assim, apresentar e debater as ideias fundamentais sobre microrredes.

Para cumprir este objetivo, o trabalho foi disposto da seguinte maneira: primeiramente, o conceito de microrredes é tratado com base em discussões sobre suas características básicas; em segundo lugar, os componentes primordiais que formam uma microrrede são destrinchados. Em seguida, suas estratégias de controles são abordadas. O controle hierárquico com método *droop* é enfatizado.

II. CONCEITOS DE MICRORREDES

Alguns elementos que caracterizam uma microrrede são: seu porte reduzido em relação à rede elétrica convencional, a instalação em uma região delimitada, a possibilidade de trabalhar de forma ilhada e a proximidade entre a geração e o consumo. Contudo, estas características não constituem uma inovação. Afinal, os primeiros sistemas elétricos no mundo eram pequenos, possuíam produções locais próximas das cargas e operavam isolados. Alguns exemplos podem ser enumerados: as instalações de iluminação pública na *Avenue de l'Opéra*, na *Place de l'Opéra* e no *Arc de triomphe* em Paris, na França, de 1878 [7], as das cidades inglesas Godalming e Chesterfield de 1881 [8], a de *Pearl Street* em Nova Iorque, concebida por Thomas Edison, nos Estados

Unidos, de 1882, e aquelas de Berlim, como a do *Café Bauer* na *Friedrichstrasse* e da região central da cidade, de 1883 [9]. Os processos históricos que levaram à edificação de sistemas elétricos de linhas quilométricas com grandes usinas distantes dos centros de consumo [1] estão fora do escopo deste artigo. O importante aqui é compreender as diferenças destes modelos para as atuais microrredes e por que houve um retorno às topologias similares a estas antigas. Tendo esclarecidas estas questões, uma ideia geral sobre microrredes pode ser alcançada.

Atualmente, ainda falta consenso sobre o que exatamente são as microrredes, mas como foi indicado, todas elas possuem propriedades congruentes. As que acabaram de ser expostas e que remetem aos sistemas do fim do século XIX são algumas delas. A concepção moderna das microrredes, por sua vez, surgiu por volta dos anos 2000 [10]. A primeira distinção clara é a integração de duas ou mais fontes de GD em cada microrrede. A possibilidade de conectar várias tecnologias de GD, e não apenas uma, próximas das cargas é o cerne das microrredes contemporâneas. Ora, ligar uma única tecnologia de GD diretamente às cargas é o que se conhece como “sistema isolado”. É por essa razão que há a necessidade de se incluir na concepção de microrredes um número sempre maior que a unidade de fontes de GD.

Outro ponto que aparenta incoerência é que um alto número de fontes de GD conectadas próximas à carga em uma pequena região é uma situação plausível para “sistemas conectados à rede”. Daí surge mais uma distinção das microrredes: ser um sistema único, aglomerando múltiplas fontes e cargas, que podem funcionar de modo paralelo à rede ou em ilhamento intencional, mantendo o fornecimento de energia elétrica a seus consumidores ininterruptamente. Aqui, entende-se que um sistema em paralelo à rede é aquele que possui referências externas de tensão e de frequência, providas pela própria rede, enquanto ilhado é aquele que opera sem estas referências externas, produzindo-as internamente pelo sistema de controle [11].

A conexão em paralelo de diversas fontes de GD em sistemas ilhados e a flexibilidade de operação em relação às referências de tensão e frequência são dois fortes indícios de mais um imperativo para a definição das microrredes modernas. Todas elas devem dispor de controles avançados em suas unidades, principalmente em relação ao compartilhamento adequado de energia. A dependência da EP pelas microrredes reside nestes processos. São os dispositivos semicondutores atrelados a microntroladores e sistemas digitais que permitem o controle e o gerenciamento das microrredes, além de garantir confiabilidade e flexibilidade. Esta é uma vantagem interessante, uma vez que a maior parte das tecnologias de GD fazem uso da EP.

Todos estes atributos unem as diferentes concepções modernas de microrredes, sejam elas CA, CC ou híbridas (CA e CC) e independentemente de suas configurações. Também é importante ressaltar que, para alguns autores [12], as microrredes inteligentes serão a base das redes elétricas inteligentes ou *smart grids*.

III. COMPONENTES DE MICRORREDES

As microrredes são formadas por alguns componentes fundamentais. Com exceção das linhas de distribuição de

energia elétrica, as de comunicação (quando necessárias) e as cargas, há ao menos três outros itens que, geralmente, constituem uma microrrede. São elas: as fontes de GD, os conversores de EP e dispositivos de armazenamento de energia. A seguir, cada um destes elementos é exposto, indicando a relevância deles para a operação das microrredes.

A. Geração Distribuída e Microrredes

A produção de energia elétrica é parte capital das microrredes e, por esta razão, o uso da GD já é manifesto. Porém, a geração de eletricidade em si não é a única propriedade que diferencia sua adoção. Conforme já definido, há uma alta variedade de fontes de GD. As de pequena ou média capacidade, precisamente aquelas que são mais facilmente integradas às microrredes, são também as que mais tiveram crescimento no setor elétrico nos últimos anos. Algumas destas tecnologias podem ser citadas. Uma delas é a energia solar fotovoltaica, constituída pelos módulos fotovoltaicos, cuja produção de eletricidade se dá diretamente pela conversão da luz solar. Outra de grande adesão são as turbinas eólicas, que transformam a energia dos ventos em energia elétrica. O movimento das águas dos rios também pode ser usado para produção de energia elétrica em tamanho reduzido através das pequenas hidroelétricas. As células a combustível, que convertem energia química em elétrica de maneira altamente eficiente, são um outro exemplo. Por fim, podem ser também mencionados os pequenos geradores térmicos e a bioenergia. Essas duas fontes podem ser usadas em conjunto ou outros combustíveis podem servir como matéria-prima para os pequenos geradores térmicos. Aqui, vale ressaltar que tecnologias mais recentes proporcionam a estes geradores uma produção em escala menor que aquela encontrada nas grandes termoelétricas de maneira eficiente, como é o caso em máquinas recíprocas, turbinas a gás ou a combustão e microturbinas [1].

É interessante notar que a grande gama de fontes de GD proporciona uma enorme diversidade de configurações de microrredes. Este é um fator preponderante para elas, pois dependem fortemente das condições locais de instalação. Ora, ampliando as possibilidades e os meios de se produzir energia elétrica, eliminam-se as dificuldades materiais para se erigir uma microrrede. Há lugares com escassez de água, mas alta incidência solar. Em outros, biomassa está ao alcance com facilidade, enquanto os ventos têm baixa velocidade. Onde existirem luz solar, ventos intensos e rios com vazões apropriadas, a microrrede pode ser formada por diferentes tecnologias de GD e pode, assim, mitigar efeitos de variabilidade e intermitência aumentando sua confiabilidade. Resumindo, as diferentes características de cada fonte de GD podem ser aproveitadas para cada situação geográfica e física onde será instalada a microrrede, resultando em uma infinidade de estruturas. Além disso, uma boa parte das fontes de GD é modular, isto é, podem ser reconfiguradas com facilidade, o que se reflete na própria arquitetura da microrrede, trazendo flexibilidade para a mesma.

Finalmente, outros dois atributos da GD que são essenciais para a melhor operação das microrredes são chamados de *para-a-para* (*peer-to-peer*) e *ligar-e-usar* (*plug-and-play*) [13]. O primeiro se refere à independência de seus componentes, particularmente da sua produção de energia elétrica. Ou seja, na falta de uma das fontes de GD, o funcionamento da

microrrede não pode ser afetado. O último, por sua vez, está relacionado à possibilidade de conectar a GD em qualquer ponto do sistema e em qualquer momento, sem impactar o controle geral.

B. Eletrônica de Potência e Microrredes

A EP com seus conversores tem sido aplicada em inúmeros equipamentos do setor elétrico. No caso específico das microrredes, são várias as suas atribuições, sendo uma peça fundamental na operação e no controle das fontes de GD que as compõem. Recentemente, todas as tecnologias de GD aludidas anteriormente que podem fazer parte de uma microrrede, também podem ser integradas e se beneficiar da EP. De fato, os módulos fotovoltaicos, que geram potência CC, são conectados a conversores CC-CC para adequar a tensão de saída, além de maximizar sua produção de energia através dos métodos de rastreamento de máxima potência (MPPT – *maximum power point tracking*) [14]. Eles também podem ser ligados a inversores solares (UPC – Unidades de Condicionamento de Potência) para ter saídas senoidais CA [15]. O mesmo se dá para as células a combustível que possuem saída CC e podem ter o nível de tensão adaptado via conversor CC-CC ou ainda ser ligado a um conversor CC-CA [16]. As turbinas eólicas mais sofisticadas, por sua vez, são parcial ou totalmente dependentes de EP, podendo ser usados conversores do tipo *back-to-back* indiretamente no primeiro caso, como acontece com o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG - *Doubly fed induction generator*), ou diretamente no segundo. Em qualquer um deles, destacam-se o maior controle de velocidade, partidas suaves, alimentação local de reativo e maximização da potência [17]. Já as pequenas hidroelétricas dependem da velocidade natural das águas e da vazão disponível, pois são em grande parte do tipo fio d'água, onde a acumulação é mínima ou mesmo nula. Um controle rigoroso deve ser feito e isto é proporcionado pela EP com conversores similares àqueles empregados em turbinas eólicas [18]. As microturbinas trabalham em velocidades altíssimas, gerando potência CA de frequência elevada por meio de rotações de 50.000 RPM até 120.000 RPM. Torna-se imperativo, assim, o uso de conversores para adequar a frequência para aquela usada pelas cargas (60 Hz, por exemplo). Um retificador seguido de um inversor é um exemplo desta aplicação [19].

Além de fornecer saídas elétricas nas formas mais comuns de consumo e padronizadas por normas, a EP também pode flexibilizar o modo como é fornecida a energia elétrica. Níveis e formas de onda de tensão e corrente geradas podem ser diferentes de acordo com as necessidades dos usuários, ampliando ainda mais o leque de possibilidades de projetos de microrredes. Com o desenvolvimento de conversores próprios para cada situação, as microrredes podem ter arquiteturas que são CA, CC ou híbridas com diferentes valores de tensão e frequência a partir do objetivo de cada uma e independente das fontes de GD escolhidas.

A flexibilização nas microrredes é uma propriedade importante obtida através da EP. No entanto, os conversores são ainda mais cruciais para o controle delas. As redes de distribuição convencionais são sistemas passivos. As microrredes, por sua vez, são sistemas inerentemente ativos [20], pois a operação correta está impreterivelmente sujeita a um gerenciamento rigoroso do compartilhamento de potência

entre as fontes de GD, as cargas e, quando for o caso, a rede das concessionárias. Como as tecnologias de EP mais modernas embarcam dispositivos digitais e microcontroladores, técnicas avançadas de controle podem ser implementadas localmente para que os requisitos das microrredes onde se encontram instaladas possam ser atendidos de uma maneira eficiente, com custo reduzido e mínimo impacto ambiental. Mais ainda, é pela EP que se faz a sincronização e a conexão da microrrede com a rede, permitindo transições do modo ilhado para o modo conectado em paralelo com esta de forma suave.

C. Armazenamento de Energia e Microrredes

Uma das vantagens das microrredes é a possibilidade de operar em modo ilhado. Sua confiabilidade é, assim, superior àquela encontrada em redes convencionais, cujas interconexões fazem com que partes substanciais sejam desligadas, mesmo que não tenham sido efetivamente atingidas por faltas. Contudo, o ilhamento unido à variabilidade e à intermitência de algumas fontes de GD, como é o caso de sistemas fotovoltaicos, que têm sua produção afetada por nuvens e param de gerar eletricidade à noite, e energia eólica, que dependem de velocidades muitas vezes imprevisíveis do vento, reduz a mesma confiabilidade. É preciso, portanto, suprimir os efeitos negativos das produções variáveis ao longo do tempo de energia elétrica ou mesmo evitar a falta de fornecimento de eletricidade quando a geração for interrompida por efeitos naturais. O armazenamento de energia é uma das melhores soluções nestas situações e, por esse motivo, é um componente nas microrredes.

Para suprir essas necessidades, múltiplas tecnologias de armazenamento de energia estão disponíveis no mercado. Assim como ocorre com as fontes de GD, os dispositivos de armazenamento de energia podem ser escolhidos a partir das diferentes conjunturas de cada microrrede. Algumas delas podem ser mencionadas a seguir [21]. A primeira delas é a bateria, equipamento que guarda energia química quando recebe eletricidade e que pode disponibilizá-la nesta mesma forma. A segunda é o supercapacitor que, por ter uma alta capacitância, é capaz de armazenar grande quantidade de energia em suas placas através de seu campo elétrico e seu dielétrico separando-as. A terceira é o *flywheel*, dispositivo eletromecânico que armazena energia por uma massa girante ligada a uma máquina elétrica que pode funcionar como motor ou gerador. Há ainda o armazenamento por ar comprimido e por usinas hidroelétricas reversíveis ou de bombeamento. O emprego de qualquer uma delas eleva a disponibilidade de energia elétrica na microrrede. Quando esta é construída em regiões de difícil acesso, em pequenas ilhas ou em outros locais completamente isolados, o armazenamento de energia também permite o suprimento temporário de eletricidade na falta de abastecimento para determinadas fontes de GD.

Um benefício do armazenamento de energia está associado à própria operação da microrrede em circunstâncias normais. Como será visto adiante, alguns métodos de controle funcionarão adequadamente apenas se os geradores forem despacháveis, o que, como já se afirmou, não é o caso de muitas fontes de GD. Este impasse é resolvido pelo armazenamento de energia. Fora isso, há muitas outras vantagens técnicas com a adoção destes elementos, tais como: suportes de tensão e frequência, nivelamento de

carga/produção de pico (*peak shaving*), reserva de prontidão (*spinning reserve*), entre outros [22].

IV. CONTROLE DE MICRORREDES

Métodos de controle sofisticados desempenham papel vital nas microrredes. Ao contrário das redes elétricas tradicionais onde, apesar do maior volume de energia elétrica envolvido, as variações de carga são mais previsíveis e a produção é resumida em grandes usinas para um número alto de usuários distantes, as microrredes são profundamente impactadas por pequenas mudanças no consumo interno de eletricidade e têm como base múltiplas fontes de geração com características diversas em um espaço reduzido. Gerenciamento, compartilhamento de potência, otimização, flexibilidade e sincronização tornam-se requisitos imprescindíveis a serem preenchidos quando se trata de microrredes. Tudo isso deve ser realizado com rapidez e confiança, o que só pode ser feito através de controles aprimorados. Nesta seção, serão vistos diferentes tipos de controle para microrredes, com destaque para o controle hierárquico e o método de controle *droop*.

A. Tipos de Controle de Microrredes

O controle das microrredes pode ser dividido basicamente em duas linhas: centralizada e descentralizada (ou distribuída) [23]. Algumas arquiteturas podem abarcar as duas simultaneamente para diferentes tarefas.

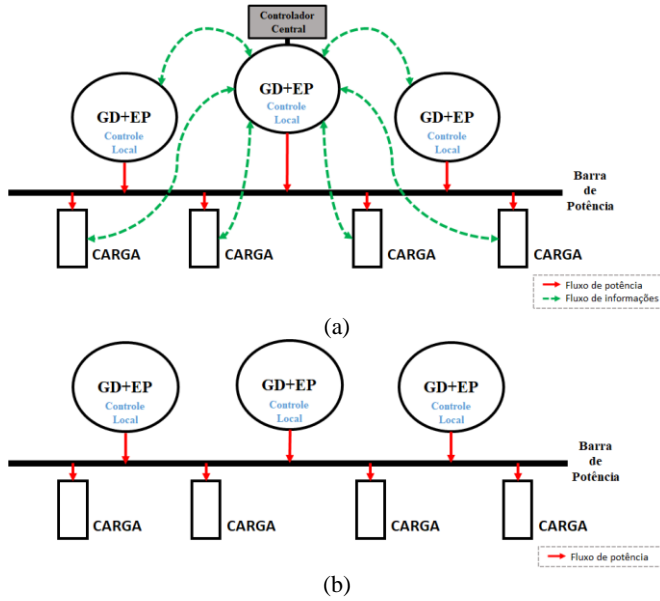
No controle centralizado, visto na Figura 1(a), uma única unidade define as ações a serem tomadas por todos os elementos da microrrede, o que exige linhas de comunicação para envio das informações. Em [24], um controlador central, instalado em uma subestação, emite pontos de ajuste para controladores locais das fontes de GD e das cargas, comandando toda a operação da microrrede. Mais ainda, uma ou mais unidades de GD nesta configuração operam como mestre, transmitindo referências de tensão para as outras. Já em [25], um controlador central é utilizado para otimizar e maximizar a produção da microrrede, definindo as trocas de energia quando conectada à rede elétrica com base na participação em mercados de energia.

No controle descentralizado ou distribuído, ilustrado na Figura 1(b), por sua vez, cada unidade é controlada localmente, independentemente, na maioria das vezes, de informação dos outros dispositivos da microrrede. Trabalham, portanto, apenas com informações locais. Deste modo, há pouca ou nenhuma comunicação. O grande problema aqui reside no compartilhamento adequado de potências e no paralelismo dos conversores. A solução utilizada recentemente retoma o controle aplicado ao paralelismo de sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*) [26]. O método de controle *droop* [27], que será visto com mais detalhes no próximo tópico, contorna este impasse ao permitir o compartilhamento automático, sem qualquer comunicação, de carga e o paralelismo na microrrede usando equações matemáticas e cálculo de potências do próprio conversor onde está embarcado.

O controle, também, pode ser classificado pelo modo como operam os conversores [28]. No caso de operarem como fontes ideais com impedâncias pequenas de saída provendo referências de tensão para a microrrede, eles são chamados de formadores de rede (*grid-forming*). Já para os conversores que

apenas fornecem energia elétrica para uma microrrede pré-existente, podendo ser idealmente representados por fontes de corrente de alta impedância de saída, o nome dado é alimentador de rede (*grid-feeding*). Para o funcionamento correto, estes conversores devem estar sincronizados com as outras fontes de tensão. Por fim, há ainda a categoria dos conversores de suporte à rede (*grid-supporting*), que regulam a tensão da microrrede ao controlar as potências ativa e reativa que entregam.

Figura 1: Controles de microrrede: (a) Controle Centralizado; (b) Controle Descentralizado.



B. O Controle Hierárquico e o Método de Controle droop

Uma das fortes tendências de padronização de controle de microrredes é o controle hierárquico [29]. Nesta estrutura, as tarefas dos conversores são dadas em diferentes níveis de comando, o que permite manter estabilidade e confiabilidade na microrrede. Normalmente, são quatro os níveis. O primeiro deles é formado pelas malhas internas de corrente e de tensão dos conversores. Por serem controles intrínsecos, eles podem ser desconsiderados dentro da hierarquia ou assinalados como controle de nível zero.

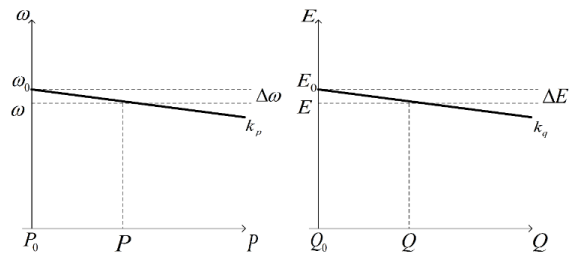
Em seguida, tem-se o controle primário. É por ele que se faz o gerenciamento e compartilhamento de potências internamente à microrrede, atuando, portanto, principalmente sobre o modo ilhado. Aqui, o método mais usado é o controle *droop*. Esta técnica emula em conversores o comportamento de geradores síncronos isolados conectados em paralelo [27]. Tal controle é implementado em cada unidade. Ele permite o paralelismo e o compartilhamento de potência automaticamente sem qualquer comunicação. Estas vantagens preenchem os requisitos de par-a-par (*peer-to-peer*) e ligar-e-usar (*plug-and-play*). No caso CA, as equações (1) e (2) regem a operação de cada inversor em paralelo, sendo que, para isso, bastam medições locais de tensão e corrente e cálculo de potências ativa P e reativa Q , referências dadas de amplitude E_0 , frequência ω_0 e de potências P_0 e Q_0 e coeficientes de *droop* k_p e k_q . É importante ressaltar que o controle de *droop* é influenciado pelas características das linhas da microrrede onde o respectivo conversor está conectado. Elas devem ser

predominantemente indutivas ($X_L \gg R$) para um bom funcionamento. Para diminuir esta dependência física, foi implementada, também para o controle primário, a impedância virtual [30], que imita uma indutância ou uma resistência através apenas de modificações no controle. A Figura 2 mostra as curvas características de *droop* de potência ativa e frequência ($Px\omega$) e potência reativa e tensão (QxV). Uma das desvantagens do método de controle *droop* está justamente nas quedas de frequência e de tensão para se fazer o compartilhamento de potência. A redução é pequena e, na maioria dos casos, não afeta a operação geral da microrrede. Existem diversas versões modificadas do *droop* na literatura que tentam superar seus problemas [31]. Todavia, detalhes destas técnicas estão fora do escopo do artigo.

$$\omega = \omega_0 - k_p(P - P_0) \quad (1)$$

$$E = E_0 - k_q(Q - Q_0) \quad (2)$$

Figura 2: Curvas características do método de controle *droop*.



Por último, dois outros níveis completam a hierarquia. O controle secundário participa na regulação e na restauração de frequência (CA) e tensão na microrrede para os níveis desejados. O controle terciário, por sua vez, estabelece a sincronização, o fluxo de potência e outros aspectos da conexão da microrrede com o sistema elétrico ou com outras microrredes.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados os principais conceitos envolvendo as microrredes. O contexto da aparição de suas versões modernas foi abordado e, em seguida, suas principais características foram discutidas. Seus componentes fundamentais, isto é, a geração distribuída, a eletrônica de potência e o armazenamento de energia, foram tratados e a importância de cada um para as microrredes foi elucidada. Por fim, seus controles foram discutidos, sendo dada maior ênfase ao controle hierárquico utilizando o método *droop*.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001. Além disso, os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - FEELT, ao CNPq e à FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] M. M. E. T. Souza Jr., *Reflexões acerca da Geração Distribuída e suas Implicações no Sistema Elétrico, na Sociedade e no Meio Ambiente*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22352>
- [2] F. Blaabjerg, Zhe Chen, S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Setembro 2004.
- [3] IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C – Summary for Policymakers*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers/>
- [4] IPCC (2014). *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [5] IEA (2018). *World Energy Balances 2018*. Disponível em: <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>
- [6] IEA, IRENA, UNSD, WB, WHO (2019). *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019*. Disponível em: <https://trackingsdg7.esmap.org>
- [7] B. Bowers, *A History of Electric Light and Power*, Peter Peregrinus Press, 1982.
- [8] P. Strange, "Early Electricity Supply in Britain: Chesterfield and Godalming", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 126, no. 9, pp. 863-868, Setembro 1979.
- [9] T. P. Hughes, *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*, John Hopkins University Press, Baltimore, 1983.
- [10] R. H. Lasseter, "MicroGrids", in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, vol. 1, pp. 305-308, 2002.
- [11] P. L. Villeneuve, "Concerns generated by islanding [electric power generation]", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 49-53, 2004.
- [12] H. Farhangi, "The path of the smart grid", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, 2010.
- [13] R. H. Lasseter, P. Piagi, "Microgrid: a conceptual solution", in *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 6, pp. 4285-4290, 2004.
- [14] T. Eram, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, Junho 2007.
- [15] S. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n° 5, pp. 1292-1306, Setembro/Outubro 2005.
- [16] A. Kirubakaran, S. Jain, R. K. Nema, "A Review on Fuel Cell Technologies and Power Electronic Interface", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2430-2440, 2009.
- [17] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859-1875, Agosto 2009.
- [18] S. Nababan, E. Muljadi, F. Blaabjerg, "An Overview of Power Topologies for Micro-Hydro Turbines", in *3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 737-744, 2012.
- [19] A. Bertani, C. Bossi, F. Fornari, S. Massucco, S. Spelta, F. Tivegna, "A Microturbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operation", in *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition 2004*, vol. 1, pp. 360-365, 2004.
- [20] P. Djapic et al., "Taking an active approach", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 68-77, 2007.
- [21] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6-7, pp. 1513-1522, 2009.
- [22] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, D. Morton, "Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid", in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1627-1632, 2008.
- [23] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, Julho 2014.
- [24] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, Maio 2006.
- [25] A. G. Tsikalakis, N. D. Hatziargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation", in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2011, pp. 1-8.
- [26] E. A. A. Coelho, *Técnicas de Controle Aplicadas Ao Paralelismo de Inversores*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2000.
- [27] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, P. F. D. Garcia, "Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 533-542, Março-Abril 2002.
- [28] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Novembro 2012.
- [29] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Janeiro 2011.
- [30] J. M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 4, pp. 1126-1135, Agosto 2005.
- [31] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, Março 2017.