

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM ARMAZENAMENTO CONECTADA À REDE ELÉTRICA

Kauê J. F. N. C. de Souza – kauenovaes@gmail.com

Alex R. A. Manito – alex@iee.usp.br

Teddy A. F. Melendez – tmelendez@iee.usp.br

André Mocelin – mocelin@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. A possibilidade de gerenciar a demanda de energia elétrica utilizando a geração distribuída com armazenamento apresenta-se como uma alternativa para diversificação da matriz elétrica brasileira. Este trabalho apresenta uma breve contextualização do atual cenário brasileiro de geração e as principais tecnologias de armazenamento. São destacados os fatores que entram e estimulam a geração distribuída com armazenamento. É apresentada a infraestrutura presente no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF), para análise operacional da gestão da geração e demanda de energia da geração distribuída com armazenamento conectada à rede.

Palavras-chaves: Geração distribuída, gestão da demanda.

1. INTRODUÇÃO

A geração centralizada é o principal modelo de geração de energia elétrica no Brasil. Isso é baseada na abundância de recurso primário para grandes centrais hidrelétricas, sendo na atualidade cerca de 61 % da potência instalada composta por esta forma de geração, (ANEEL, 2017). Contudo, esta modelo de geração apresenta perdas elevadas e altos investimentos no sistema de transmissão e distribuição, uma vez que a geração não está próxima dos grandes centros de consumo. Por conta disso o sistema elétrico está passando por uma transição, assim como apresentado na Figura 1. A possibilidade de gerenciamento da demanda e da geração traz uma nova realidade para o setor elétrico. A utilização de geração distribuída com armazenamento apresenta benefícios para o setor elétrico e os consumidores, como: atenuação da rampa de demanda, fornecimento de outros serviços ancilares, estabilização de tensão e frequência, correção de fator de potência, entre outros benefícios.

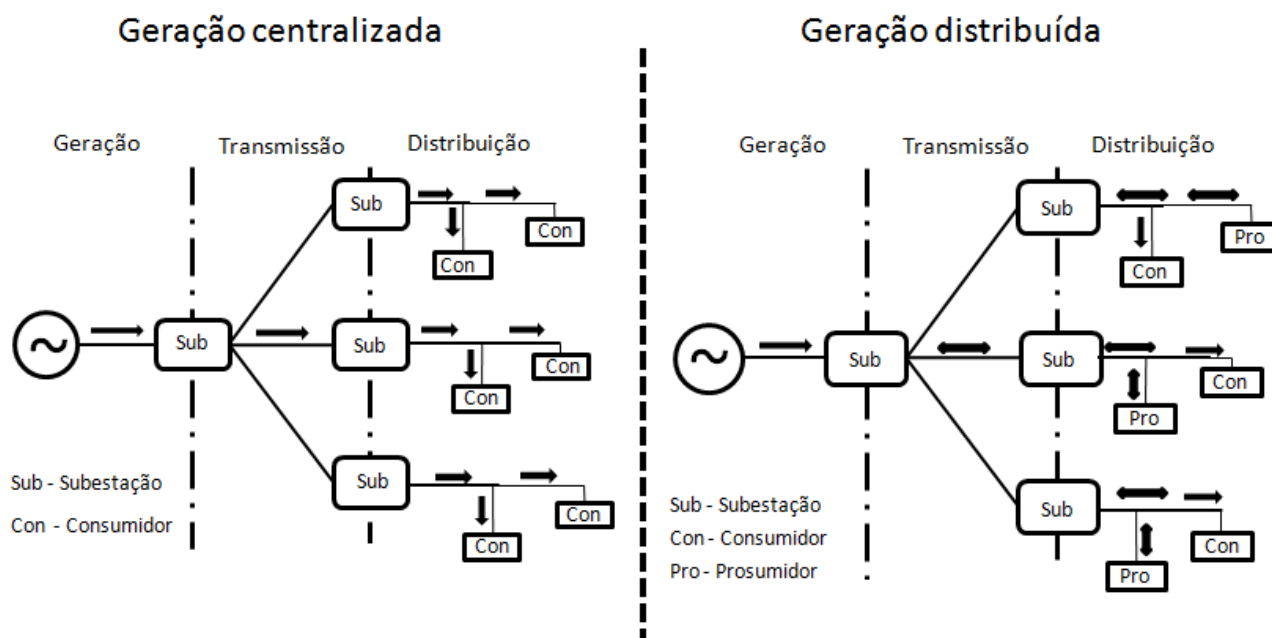


Figura 1- Exemplo da transição de geração centralizada para a geração distribuída.

Contudo, sistema de geração distribuída com armazenamento ainda não está presente no cenário brasileiro. Alguns trabalhos descrevem quais são as barreiras e oportunidades dos sistemas de armazenamento conectados a rede elétrica, SILVA e BORTONI (2016), CORREIA (2016), SILVA (2015). Este trabalho analisa um sistema de geração distribuída com armazenamento conectada à rede elétrica, instalado no O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, do Instituto de Energia e Ambiente, da Universidade de São Paulo (LSF/IEE/USP). São analisados possibilidades de gerenciamento da

demanda e da geração. O sistema de armazenamento utilizado na análise deste trabalho possui baterias estacionárias de chumbo ácido e geração por sistema fotovoltaico.

2. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Existem diversos sistemas de armazenamento de energia, que podem ser classificados de acordo com a forma de energia a ser armazenada, Mecânica; Eletroquímica/Química; Térmica e Elétrica. A Figura 2 apresenta os principais sistemas de armazenamento de energia.

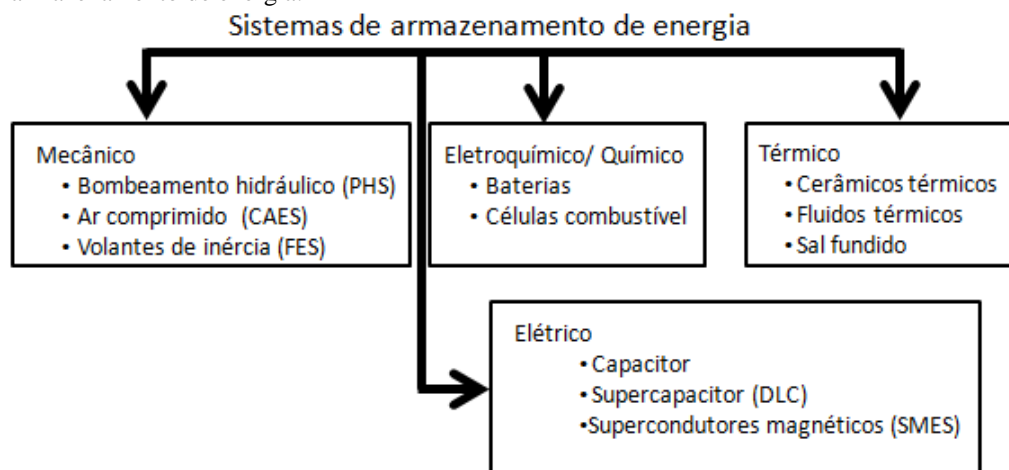


Figura 2 - Principais sistemas de armazenamento de energia.

Fonte: Adaptado (BHUIYAN e YAZDANI, 2012).

Na atualidade, o sistema mais utilizado é o bombeamento hidráulico (PHS), com cerca de 99 %, (IEC, 2011). O PHS é utilizado para armazenamento de grandes quantidades de energia em centrais hídricas reversíveis. Entretanto, esse tipo de armazenamento em grande escala não se apresenta como algo concreto para os prosumidores, haja vista a complexidade e necessidade de espaço para uma usina reversível. Uma tecnologia que já possui aplicações em outros sistemas e pode realizar o armazenamento de energia da GD são os acumuladores elétricos, comumente denominados de baterias. As baterias são comuns em aplicações no setor de transporte e sistemas de *backup*, além de serem utilizadas em sistemas de eletrificação rural.

2.1 Utilização de sistema de armazenamento para controle da demanda

A possibilidade de gerenciar a demanda de energia utilizando sistema de armazenamento tem fatores que entram e estimulam sua utilização. No atual cenário brasileiro a GD com armazenamento é apenas uma alternativa, pois ainda não existe regulamentação que possibilite este tipo de conexão à rede. A análise desta forma de conexão poderá servir como material de apoio para futuras discussões de formulação de possíveis medidas regulatórias.

Fatores que entram a geração distribuída com armazenamento. Dentre os fatores que não estimulam a utilização da GD com armazenamento podem ser destacados: custos ainda elevados dos acumuladores, limitações tecnológicas, fatores técnicos e ambientais, mão de obra, e regulamentação.

Custo do sistema. Custo das baterias é um dos fatores que ainda entram a sua utilização. O alto valor de aquisição, a curta vida útil e a consequente necessidade de trocas frequentes, relativamente a outros componentes do sistema de geração, são fatores que encarecem esse tipo de sistema de armazenamento. Portanto, na atualidade, o armazenamento em baterias para sistemas conectados à rede elétrica ainda não apresenta viabilidade econômica.

Limitações tecnológicas. Apesar das baterias já estarem no mercado há um tempo considerável, elas ainda apresentam aspectos ainda necessita de evolução tecnológica para utilização em maior escala, como maior vida útil em relação a tempo de utilização ou número de ciclos de carga e descarga; os processos de descarga também precisam de evolução, pois descargas profundas ou muito rápidas podem reduzir drasticamente a vida útil das baterias.

Fatores técnicos e ambientais. Os fatores técnicos estão associados à logística, manuseio e processo de descarte dos elementos. As baterias possuem componentes químicos e substâncias tóxicas. Logo, seu transporte torna-se mais complexo e necessitam de procedimentos específicos. O manuseio e o local de instalação demandam cuidados especiais, requerendo profissionais especializados, pois existe risco de acidentes, tanto do ponto de vista químico quanto elétrico. As baterias não podem ficar em locais de grande circulação de pessoas, principalmente de crianças, e

também não podem ficar expostas a temperaturas elevadas. O seu descarte de modo inadequado pode causar problemas ambientais graves e, portanto, deve ser feito de forma adequada, levando em consideração seus componentes tóxicos.

Mão de obra. A falta de profissionais qualificados para atuar no dimensionamento, instalação, manutenção de sistemas de GD é um problema. A criação de cursos dedicados a essas aplicações, com conteúdo teórico e prático adequados, são ações que devem ser tomadas.

Regulamentação. O Brasil ainda não possui uma regulamentação específica que permita a conexão de sistemas com armazenamento à rede elétrica. O questionamento sobre o modo de cobrança, e a possibilidade de “comprar” energia no momento em que ela está com menor preço e “vender” quando ela estiver com maior valor, pode ser um importante fator de estimular o uso mais racional da eletricidade e a sua produção por meio de fontes diversificadas e descentralizadas. Então a evolução dos aspectos regulatórios é para garantir um relacionamento justo entre prosumidor, (consumidor/produtor) e concessionária.

Fatores que estimulam a geração distribuída com armazenamento. Há fatores positivos que podem estimular o uso da GD com armazenamento e, portanto, merecem destaque, como: possibilidade de gerenciamento da demanda de energia, possibilidade de utilização de energia, mesmo em momentos de desconexão da rede elétrica, atenuação da rampa de demanda, e fornecimento de outros serviços ancilares da GD, como estabilização de tensão e frequência, correção de fator de potência, dentre outros.

Fornecimento de energia durante falta na rede elétrica A GD sem armazenamento se caracteriza por precisar de um sinal de tensão e frequência para os inversores de conexão à rede trabalharem. Quando estes parâmetros elétricos estão alterados ou ocorre uma falta de referencial, o inversor deve parar de realizar o condicionamento de potência e os prosumidores ficam sem energia, mesmo estando disponível o recurso solar. Então, para que esse fato não ocorra, a GD com armazenamento tem a possibilidade de, assim que constatar a ausência da rede elétrica, assumir a demanda de energia da residência, permitindo ao sistema operar de maneira ilhada, suprindo a demanda, sem estar conectado à rede.

Gerenciamento da demanda de energia. O gerenciamento da demanda de energia elétrica para o prosumidor pode gerar uma autônoma, a possibilidade de o mesmo buscar novos cenários tarifários, gerar um alívio para o sistema, ter controle sobre o consumo, dentre outros fatores. Também propicia a oportunidade de armazenar energia ao invés de injetar na rede quando a geração estiver maior que o consumo, buscar horários de maior demanda do sistema para injeção de energia, e a possibilidade de demandar energia no momento mais ocioso do sistema.

Atenuação da rampa de demanda. O sistema elétrico regula a relação entre demanda e geração pela frequência. Existem momentos de maior demanda de energia elétrica, principalmente por parte de alguns setores específicos como o comercial e industrial, e a maneira utilizada para atenuar a curva de carga tem sido utilizando diferentes tarifas para os horários de ponta e fora de ponta. Contudo, ainda assim no horário de maior demanda, todo o sistema GTD é sobrecarregado. O armazenamento de energia por parte dos prosumidores possibilita a atenuação da curva de demanda, porque esses clientes com acumulação podem se desconectar da rede no período de maior demanda, ou até mesmo injetar energia nesse momento, dependendo da disponibilidade do recurso de geração.

Serviços ancilares prestados à rede. A GD com armazenamento pode fornecer alguns serviços ancilares similares a GD sem armazenamento, mas a utilização do sistema de armazenamento pode possibilitar uma elevação do fornecimento de potência além do potencial da geração, também possibilitando apoio na estabilização da frequência da rede, demandando ou fornecendo potência, correção de fator de potência elevando e estabilizando a tensão no ponto de conexão e podendo auxiliar na regulação da frequência, dentre outros.

2.2 Inversor bidirecional

As baterias armazenam energia em corrente contínua, e a maioria dos equipamentos que são utilizados nas residências demanda energia em corrente alternada. Desta forma, é necessário utilizar um conversor c.c./c.a e que também faça a conversão inversa c.a./c.c. Os inversores bidirecionais realizam este tipo de conversão, e também podem ser encontrados em outras aplicações elétricas, tais como: veículos elétricos, veículos híbridos, sistemas de alimentação ininterrupta. Além disso eles também são usados em sistemas híbridos, para aumentar a confiabilidade de fornecimento de energia.

Os inversores bidirecionais possuem elementos que propiciam o controle sobre o sistema, mas sua utilização não exclui os inversores de conexão à rede e nem os controladores de carga.

3. MEDIDAS DE INCENTIVOS À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM ARMAZENAMENTO

GD com armazenamento possibilita novas perspectivas para o setor elétrico, a seguir são apresentadas algumas medidas que possibilitariam uma maior inserção de GD com armazenamento na rede.

Mudança do sistema de cobrança. A mudança no sistema de cobrança faz referência à possibilidade de adesão dos consumidores à tarifa branca. Este modo de cobrança estabelece postos horários, com horário de ponta e horário fora de ponta, com diferença tarifária no decorrer do dia. A possibilidade de armazenamento de energia permite ao prosumidor demandar energia no horário fora de ponta e estar isolado ou injetar energia na rede no horário de ponta. O prosumidor teria vantagens econômicas e o sistema estaria diminuindo a quantidade de consumidores no momento de maior demanda do sistema.

Incentivo a prosumidores. Os prosumidores com armazenamento poderão ter um papel importante para o setor elétrico, pois além de geradores de energia poderão ajudar a estabilizar o sistema, demandando energia nos momentos mais ociosos. O incentivo principalmente econômico para a maior aderência de novos prosumidores poderá elevar a penetração desta forma de geração.

Melhoria na qualidade da energia da rede. A rede elétrica deve apresentar estabilidade e confiabilidade. Porém, em alguns casos podem existir problemas técnicos possíveis de causar severos danos aos consumidores. Geralmente nos finais de linha a energia não possui uma boa qualidade. Os consumidores que ficam próximo desses locais sofrem com quedas e transitórios de tensão e frequência. A utilização da GD com armazenamento possibilitaria o fornecimento de energia ininterrupta durante os transitórios, garantindo maior confiabilidade para os prosumidores.

4. O LABORATORIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O LSF possui cinco sistemas de geração distribuída com armazenamento, que podem ou não ser conectadas à rede elétrica, e se conectarem entre si para realizar a troca de energia, assim como descrito por (MANITO, SOUZA, *et al.*, 2017a) e (MANITO, SOUZA, *et al.*, 2017b). Contudo, este trabalho aborda apenas a conexão de um sistema de geração distribuída com armazenamento à rede elétrica.

4.1 Descrição do sistema analisado

O sistema analisado possui subsistemas de geração, condicionamento de potência, armazenamento e distribuição e controle, além de subsistemas de sensoriamento, monitoramento e cargas.

A geração é composta por oito geradores fotovoltaicos, totalizando uma potência de 6,71 kWp, uma fonte c.c. de 10 kW, e um grupo moto-gerador de 40 kVA, além de estar conectado à rede elétrica. O sistema de condicionamento de potência é composto por sete inversores de conexão à rede, três inversores bidirecionais formadores de rede e dois controladores de carga. O sistema de armazenamento é composto por um banco de baterias VRLA, com vinte e quatro elementos associados em série, totalizando 48 V/490 Ah. A distribuição e o controle são realizados pelo *multicluster*, onde é realizado todo o acoplamento c.a. A Figura 3 representa um diagrama de blocos da topologia do sistema.

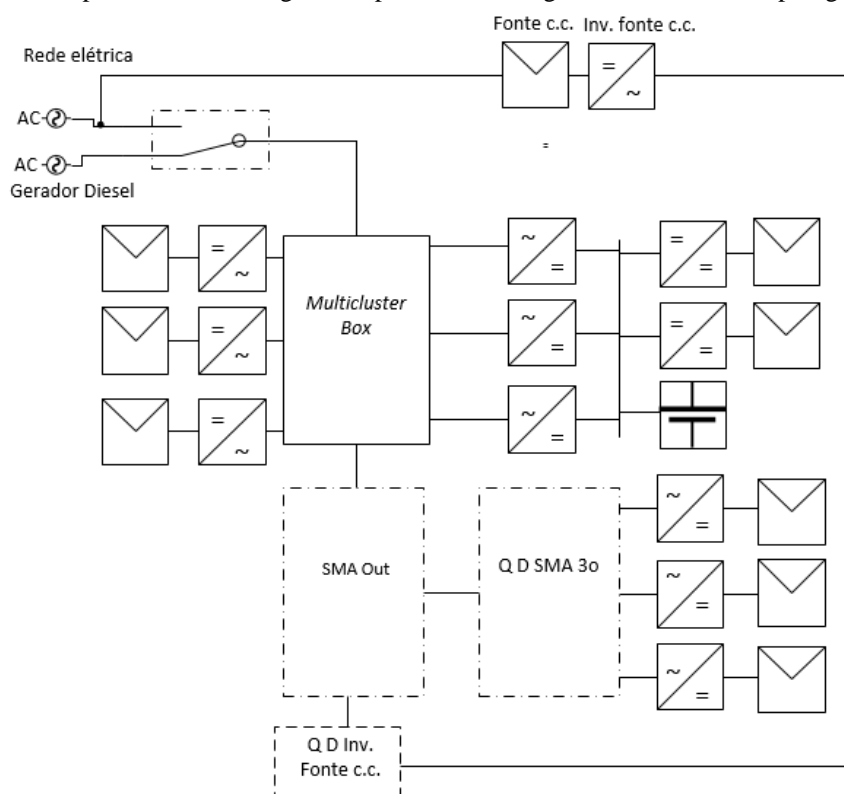


Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema analisado.

4.2 Metodologia para conexão da GD com armazenamento à rede elétrica

A simples conexão de inversores híbridos com armazenamento à rede elétrica, sem a devida configuração de alguns parâmetros dos inversores, não se caracteriza como uma forma de geração distribuída com armazenamento. A geração distribuída deve ser capaz de realizar a troca de energia com a rede elétrica, ora demandando, ora injetando energia. Para realização da análise deste trabalho alguns parâmetros foram alterados para possibilitar a gestão da demanda e da geração e, assim, o ST1 ser efetivamente uma GD com armazenamento conectada à rede elétrica.

4.3 Gestão da demanda na GD com armazenamento

A energia demandada da concessionária pode ser controlada de diferentes formas. O modo selecionado utiliza como referencial o estado de carga do banco de baterias (do inglês *State Of Charge*) e o horário do dia. Os parâmetros são ajustados no inversor bidirecional, sendo necessário selecionar dois horários, colocando o início de cada horário, cujo término será o início do horário subsequente. No horário determinado é necessário selecionar os valores mínimos para conexão com a rede e os valores máximos para desconexão. A Figura 4 apresenta esta relação da gestão de demanda, o t1 representa o primeiro horário, que abrange das 6 às 18 horas, neste caso o sistema irá se conectar com a rede quando o SOC estiver 40% e irá se desconectar quando o SOC estiver em 80%, já no t2 que representa o segundo horário das 18 às 6 horas do dia subsequente, a rede irá se conectar quando o SOC estiver em 30% e se desconectar quando o SOC estiver em 40%.

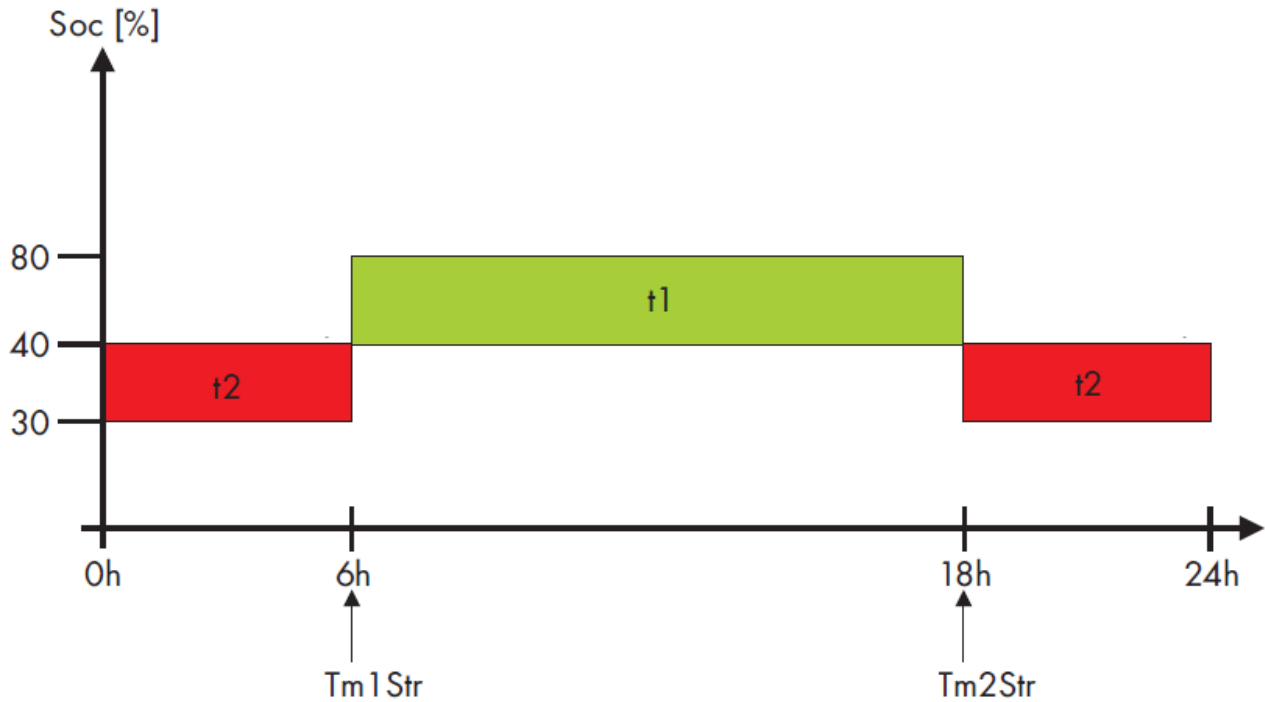


Figura 4 – Estratégia horária para controle da demanda.

Fonte: Adaptado (SMA AMERICA, 2011).

No período de desconexão da rede elétrica, o sistema de geração e/ou de armazenamento irá fornecer a energia demandada pela carga, assim como apresentado na Figura 5.

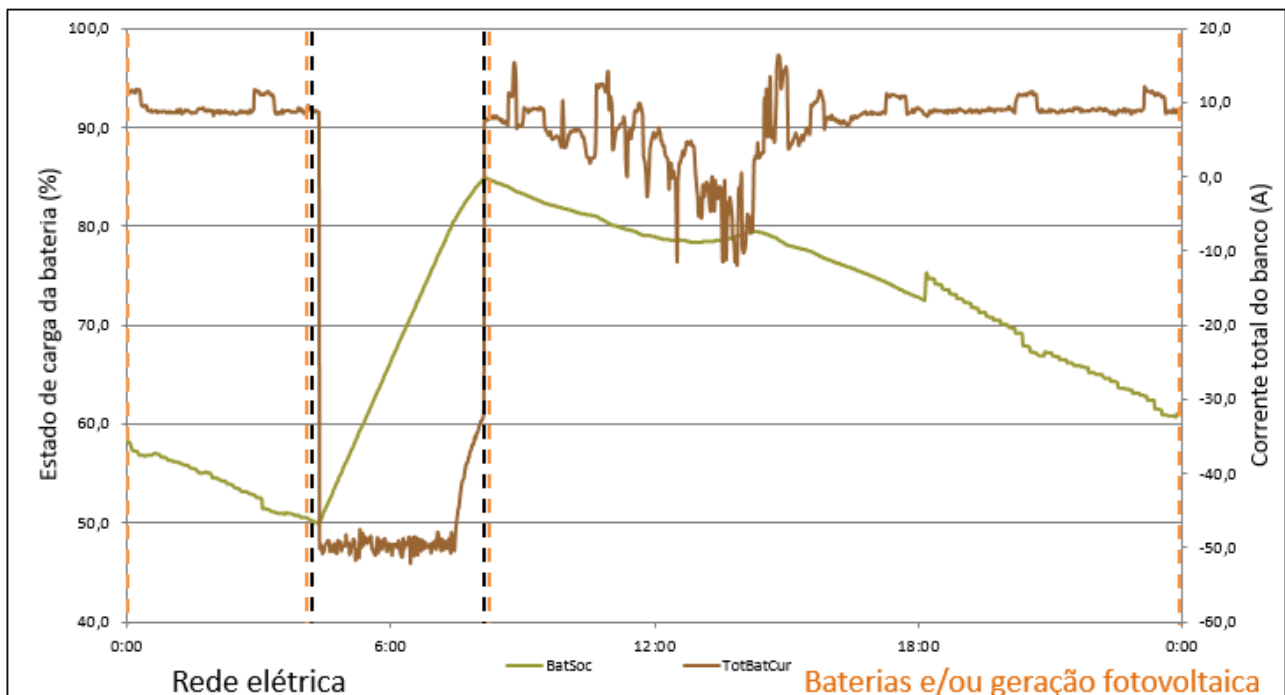


Figura 5 – Exemplo de fornecimento de energia do sistema.

4.4 Gestão da geração na GD com armazenamento

A gestão da geração torna-se possível através de parametrizações nos inversores bidirecionais, sendo necessário permitir o fluxo reverso de potência para a rede elétrica, determinar o valor máximo de potência que o sistema poderá fornecer, e o tempo máximo do fluxo de potência para a rede elétrica. Após esta parametrização é possível realizar a troca de energia com a rede elétrica; porém, a energia injetada na rede será somente a energia excedente do sistema, isso é, a energia que estiver sendo produzida quando o banco de baterias estiver com plena carga e a geração estiver maior que a demanda. Nesse momento, o sistema tem duas possibilidades: elevar a frequência para desconexão dos inversores de conexão à rede, ou injetar energia na rede elétrica. A Figura 6 apresenta um dia em que a geração estava maior que a demanda e o banco de baterias estava totalmente carregado. Neste caso, a frequência foi elevada, para retirada da geração c.a. diminuindo o fornecimento de potência, e o despacho do excedente de energia para a rede elétrica não foi liberado.

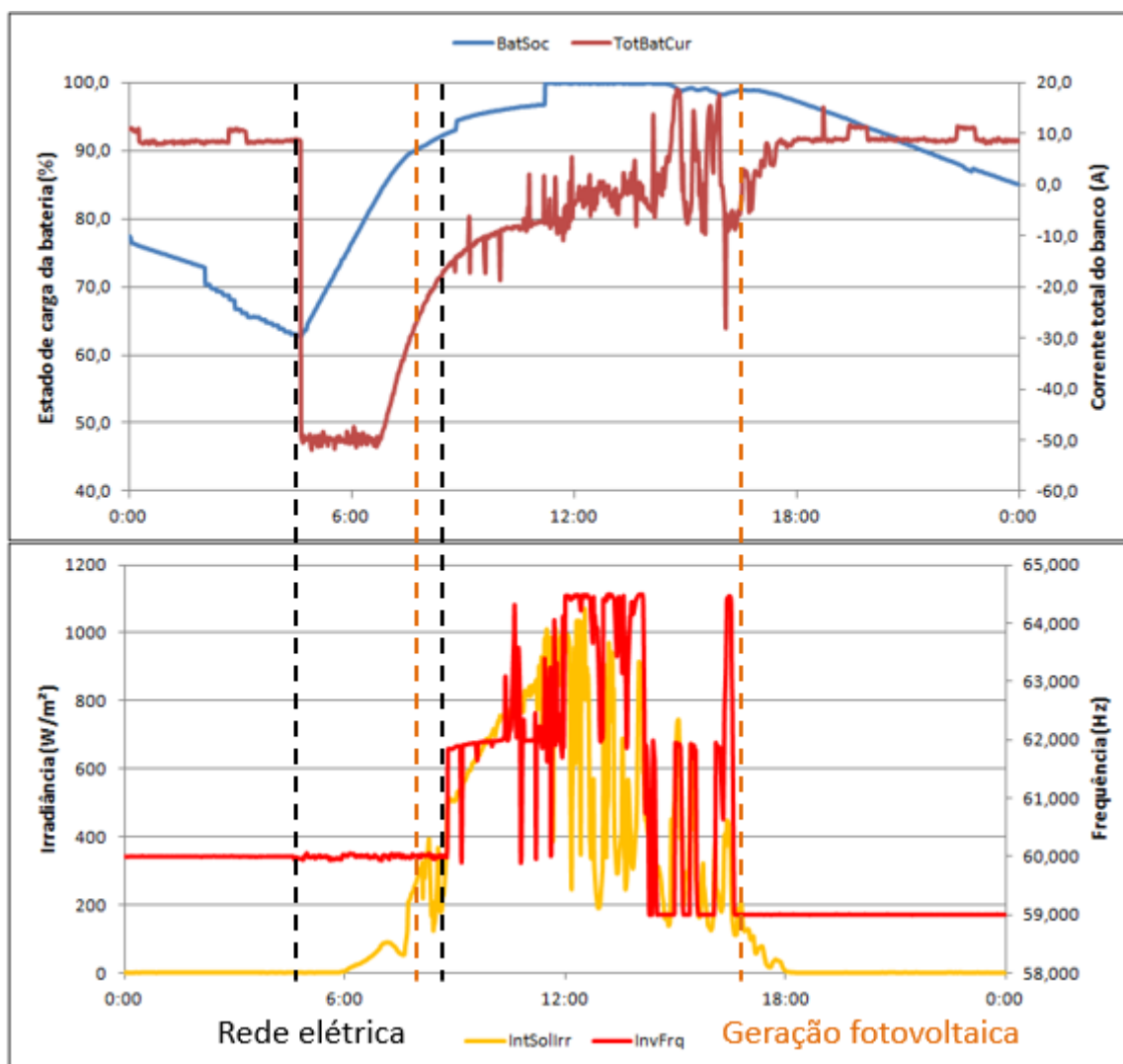


Figura 6 – Exemplo de controle da geração.

A Figura 7 apresenta um dia em que a geração estava maior que a demanda e o banco de baterias estavam completamente carregados, sendo então possível despachar a energia excedente para a rede elétrica. O sistema analisado não possui a função que permite a retirada de energia armazenada nas baterias para injeção na rede elétrica.



Figura 7 – Exemplo de injeção de energia na rede.

5. CONCLUSÃO

Dado os custos e perdas associados à geração centralizada e ao reforço de linhas para atender a demandas de pico que raramente ocorrem pode haver um potencial para alternativas diferentes daquelas baseadas inteiramente no aumento de capacidade do sistema e, neste caso, o gerenciamento de energia poderia representar economias consideráveis em investimentos. O gerenciamento melhorado de energia pode trazer benefícios para as concessionárias e consumidores desta, como achatar a curva de demanda, oferecer suporte à regulação de tensão e frequência, absorver variações bruscas de carga no sistema de distribuição, possibilitar robustez e autonomia para os prosumidores, além de potencializarem os benefícios de fontes de energia não despacháveis, uma característica comum a sistemas de geração distribuída. Contudo, apesar dos potenciais benefícios que podem ser oferecidos às redes de distribuição, sistemas com inversores bidirecionais de energia ainda precisam superar barreiras de ordem técnica, mercadológicas e regulatórias. Além da questão do custo, que atualmente se encontra relativamente alto, em grande parte devido ao armazenamento de energia com baterias.

A operação dos sistemas de distribuição de energia se tornaria mais complexa em um cenário com agentes ativos que negociam com a rede, pelo menos em um primeiro momento, pois apesar de maior flexibilidade de operação, se não forem estabelecidas regras claras e bem definidas sobre como os agentes devem interagir, situações indesejadas podem ocorrer ou os benefícios da utilização de armazenamento podem ser apenas marginais. Deve-se ter em mente que os objetivos dos diversos agentes que interagem com o sistema de distribuição não serão necessariamente os mesmos e que não necessariamente todos eles estarão interessados em cooperar, podendo, em alguns momentos, competir pela compra ou pela venda de energia em um mercado de energia ou pela provisão de serviços em um mercado de serviços ancilares. A rede de distribuição não pode acomodar qualquer quantidade de penetração de elementos ativos e a operação desordenada de tais elementos pode produzir efeitos como; contribuir para aumentar os níveis de distorção harmônica de tensão, reduções da vida útil dos componentes do sistema por sobrecarga, sobretensão em alimentadores de distribuição formação de novos e/ou deslocamento de picos de demanda.

No Brasil, ainda que algumas formas de recursos distribuídos (microgeração e minigeração) possam ser conectadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e fazer parte do sistema de compensação de energia, segundo às condições estabelecidas na Resolução Normativa N° 687/2015 da ANEEL, não há condições estabelecidas para o acoplamento de sistemas de armazenamento com inversores bidirecionais para interagir com a rede elétrica. Esta tarefa, entretanto, não é trivial. Sistemas de armazenamento para troca de energia com a rede permitiriam novos modos de operação que afetariam como os diversos agentes iriam interagir com a rede elétrica e mesmo gerar conflitos de interesses entre estes agentes. Por exemplo, pode ser que concessionárias não estariam interessadas em uma situação na qual consumidores com armazenamento comprariam energia em horários de tarifa menor para vender a mesma energia em horários de tarifa mais alta. Contudo, em outro cenário a mesma situação poderia ser vista pelas concessionárias como a provisão de um serviço ancilar que reduziria o esforço sobre linhas que de outra forma estariam sobrecarregadas. Este exemplo ilustra como os diversos agentes podem ter diferentes interesses ante a mesma situação e, desta forma, é necessária a criação de condições claras para que todos os agentes possam interagir e para que todos os benefícios possam ser apreciados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financeiro concedido pela CAPES, CNPq e FAPESP.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 04 set. 2017.
- Benedito, R. D. S. Análise de um mecanismo de compensação de reativos incorporado aos inversores de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. São Paulo: Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Instituto de Energia e Ambiente), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências., 2014.
- Bhuiyan, A. F.; Yazdani, A. Energy storage technologies for grid-connected and offgrid power system applications. IEEE Electrical Power and Energy Conference, London, p. 303-310, Outubro 2012.
- Correia, T. A. L. T. Sistemas de Armazenamento de Energia Integrados em Centrais Fotovoltaicas. Porto: Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia , 2016.
- IEC. Electrical Energy Storage. International Electrotechnical Commission, 2011. Disponível em: <<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2017.
- Manito, A.; Souza, K.; Mocelin, A.; Melendez, T.; Zilles, R.; Pinho, J. Integration of autonomous renewable energy generation systems with different topologies in a smart grid cluster to enhance performance in usual operational situations. Solar World Congress, Abu Dhabi, 30 out. 2017a.
- Manito, A.; Souza, K.; Mocelin, A.; Melendez, T.; Zilles, R.; Pinho, J. Laboratory Infrastructure for Research and Capacity Building on Isolated and Grid-Connected Smart Micro-Grids. European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Amsterdam, 26 set. 2017b.
- Pinto, A. Avaliação do impacto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão. São Paulo: Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Instituto de Energia e Ambiente), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências., 2016.
- SILVA, A. C. Utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia para Melhoria das Condições de Estabilidade de Redes Isoladas. Porto Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2015.
- SILVA, Y. F. F. C.; BORTONI, E. C. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em rede inteligentes: características, oportunidades e barreiras. 1. ed. [S.l.]: Revista brasileira de energia, v. 22, 2016.
- SMA AMERICA. Sunny Island 5048: Technical Description si5048-tb-ten110340, i5048-tb-ten110340, tbe-si5048, Version 4.0. [S.l.]: [s.n.], 2011.

DISTRIBUTED GENERATION WITH STORAGE CONNECTED TO MAIN GRID

Abstract. *The possibility of managing the demand for electric energy using distributed generation with storage presents itself as an alternative for the diversification of the Brazilian electric energy matrix. This paper presents a brief contextualization of the current Brazilian generation scenario and the main storage technologies. The factors that hinder and stimulate distributed generation with storage are highlighted. The infrastructure of the Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) for operational analysis of generation and demand management of the distributed generation with grid connected storage is presented*

Key-words: *Distributed generation, demand management*