

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO ISOLADA E CONECTADA À REDE

Ricardo Souza Figueredo – ricardoszf@gmail.com

Ildo Bet – ildo@phb.com.br

PHB Eletrônica LTDA.

Resumo. Este trabalho apresenta uma visão geral sobre os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) com sistema de armazenamento de energia para operação isolada e conectada à rede. Algumas configurações desses sistemas, utilizando inversores interativos com a rede e inversores híbridos, são apresentadas. As características, a operação e a aplicação desses inversores em sistemas de alimentação de emergência são discutidas. Além disso, a motivação, o princípio de operação e exemplos de aplicação de algumas estratégias de gerenciamento de energia (energy time-shift, autoconsumo e peak shaving) são apresentados.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Inversores híbridos, Bateria.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas classes principais: isolados e conectados à rede. Os sistemas fotovoltaicos isolados, que também são chamados de sistemas fotovoltaicos autônomos, são empregados em locais não atendidos pela rede elétrica.

A Fig. 1(a) apresenta o diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado. Esse tipo de sistema é composto de módulos fotovoltaicos (FV), controlador de carga (bloco CONTROL. CARGA), inversor e bateria (BT) (VILLALVA, 2012). Alguns equipamentos combinam as funções de controlador de carga e inversor em um único produto.

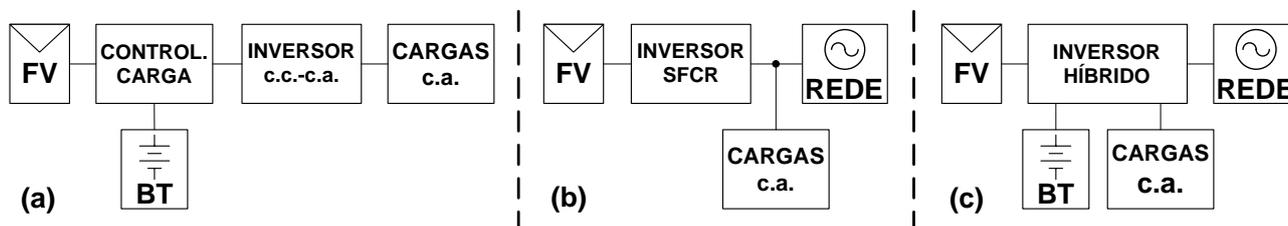


Figura 1 – (a) Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado;
(b) Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico conectado à rede sem bateria;
(c) Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico conectado à rede com bateria.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser divididos em duas sub-classes: com bateria e sem bateria (RASHID, 2011).

A Fig. 1(b) apresenta o diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico conectado à rede sem bateria. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem bateria são empregados em locais atendidos pela rede elétrica. Esse tipo de sistema fotovoltaico opera apenas com a presença da rede elétrica e dentro dos limites de tensão e frequência estabelecidos em norma (ABNT, 2013a).

A Fig. 1(c) apresenta o diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico conectado à rede com bateria. Esse sistema utiliza um inversor híbrido, que possui entradas para a conexão dos módulos fotovoltaicos, saída para a alimentação de cargas prioritárias e interfaces com fluxo de potência bidirecional para conexão à rede elétrica e à bateria. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede com bateria também são empregados em locais atendidos pela rede elétrica. No entanto, esses sistemas podem operar nas duas situações: isolados e conectados à rede.

Pesquisas de mercado apresentam uma previsão de crescimento de 10 vezes no período de 2014 a 2018 para o mercado de SFCR residenciais com armazenamento de energia (IHS, 2015). A redução das políticas de incentivo para a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem bateria em países como Alemanha e Austrália (SMA, 2010) e a tendência de redução de custo dos sistemas de armazenamento de energia (MANGHANI, 2015) têm impulsionado o desenvolvimento de produtos para esses sistemas (SVARC, 2015).

A inclusão de bateria nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede possibilita novas aplicações como sistemas de alimentação de emergência e a utilização de estratégias de gerenciamento de energia. Nas próximas seções deste trabalho serão apresentadas algumas configurações e aplicações dos SFCR com bateria e também as configurações mais comuns dos inversores utilizados nesse tipo de sistema.

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE COM BATERIA

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede com bateria, para operação isolada e conectada à rede, podem ser implementados utilizando-se inversores híbridos ou inversores interativos com a rede.

Os inversores híbridos combinam, em um único equipamento, as características dos inversores para sistemas isolados, dos inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede e das fontes de alimentação ininterrupta, também conhecidas em inglês como *uninterruptible power supply* (UPS). Esses inversores possuem entrada para a conexão dos módulos fotovoltaicos, para a bateria e para a rede elétrica. Além disso, a maioria dos inversores híbridos disponíveis comercialmente também possui uma saída para a conexão de cargas prioritárias alimentadas em corrente alternada.

É importante ressaltar que alguns inversores para SFCR com bateria disponíveis no mercado não funcionam sem a presença da rede elétrica, portanto, não podem funcionar como UPS (SMA, 2014b), (SAMSUNG, 2015). Esses inversores são adequados para aplicações onde se deseja aumentar o autoconsumo.

Os inversores interativos com a rede não possuem entrada para conexão direta dos módulos fotovoltaicos. No entanto, também é possível implementar sistemas fotovoltaicos para operação isolada e conectada à rede utilizando esse tipo de inversor. Nesse caso, existem duas estratégias para a conexão dos módulos fotovoltaicos: acoplamento em corrente contínua (c.c.) e acoplamento em corrente alternada (c.a.).

2.1 SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.c.

A Fig. 2 apresenta um SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.c. dos módulos fotovoltaicos. Os blocos c.a./c.c., c.c./c.a e c.c./c.c. representam, respectivamente, conversores bidirecionais de corrente alternada para corrente contínua (c.a.-c.c.), de corrente contínua para corrente alternada (c.c.-c.a.) e de corrente contínua para corrente contínua (c.c.-c.c.). O conversor c.a.-c.c. é um conversor bidirecional controlado em corrente, capaz de injetar ou absorver energia da rede elétrica. O conversor c.c.-c.c. é um conversor bidirecional capaz de efetuar a carga e a descarga da bateria. O conversor c.c.-c.a. funciona como fonte de tensão.

O bloco CNTL representa uma saída para acionamento da chave de transferência externa ou chave de desconexão de rede, alguns fabricantes produzem inversores com a chave de transferência integrada ao equipamento. O bloco COM representa uma interface de comunicação, que é utilizada nas estratégias de gerenciamento de energia. O bloco CARGAS CA representa as cargas prioritárias alimentadas em corrente alternada.

Nos diagramas de blocos apresentados a seguir não estão representadas as cargas não prioritárias. Essas cargas devem ser conectadas imediatamente após o medidor de energia (representado pelo bloco kWh). As cargas não prioritárias são alimentadas diretamente pela rede elétrica e permanecem sem alimentação em caso de interrupção do fornecimento.

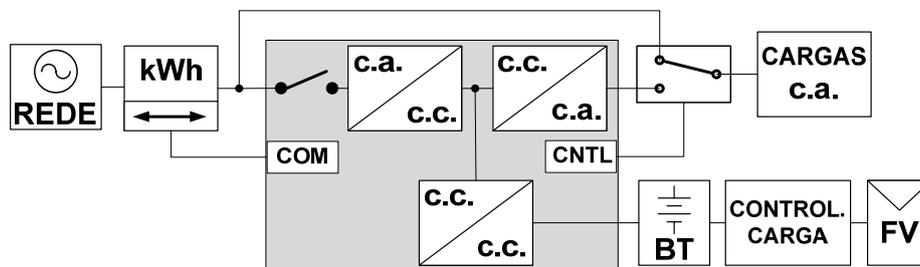


Figura 2 – Diagrama de blocos de um SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.c..

2.2 SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.a.

A Fig. 3 apresenta um SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.a. dos módulos fotovoltaicos.

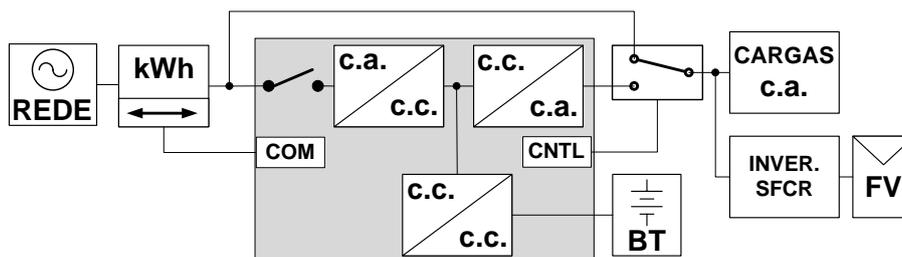


Figura 3 – Diagrama de blocos de um SFCR com bateria utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.a..

Quando se emprega essa configuração para a integração dos módulos FV, o dimensionamento dos módulos FV e do inversor para SFCR deve ser compatível com a potência do inversor interativo com a rede (OUTBACK, 2014), (VICTRON, 2015). No sistema da Fig. 3, o conversor c.c.-c.a. funciona como fonte de tensão e opera com fluxo de energia bidirecional quando ocorre interrupção do fornecimento da rede elétrica.

2.3 SFCR com bateria utilizando inversor híbrido (configuração 1)

A Fig. 4 apresenta um SFCR com bateria utilizando um inversor híbrido com dois conversores c.c.-c.a. e conexões independentes para a carga e para a rede elétrica (JIN-HEE *et al.*, 2014). Esse tipo de inversor híbrido possui quatro conversores internos, enquanto os inversores híbridos apresentados nas Figuras. 5 e 6 possuem apenas três conversores.

A presença de um conversor c.c.-c.a. adicional para a alimentação das cargas prioritárias aumenta a complexidade e o custo dessa configuração, além de reduzir o rendimento do sistema devido a um número maior de conversores operando simultaneamente. Por outro lado, esse conversor c.c.-c.a. adicional proporciona um desempenho otimizado para a alimentação de cargas críticas. Em caso de interrupção do fornecimento de energia pela rede elétrica, não existe tempo de transferência para a entrada em operação do sistema de alimentação de emergência. Além disso, a alimentação das cargas críticas está livre de distúrbios de qualidade de energia, que podem ocorrer na rede elétrica.

Na configuração da Fig. 4, o conversor c.c.-c.a. conectado à rede elétrica opera como uma fonte de corrente (*current-controlled mode*) (ABUSARA *et al.*, 2014), enquanto o valor eficaz da tensão e a frequência permanecem dentro da faixa de valores permitidos para a conexão à rede. Quando ocorre a desconexão entre esse conversor c.c.-c.a. e a rede elétrica, devido à ação do sistema de proteção anti-ilhamento, o mesmo permanece desligado até que a conexão com a rede elétrica seja reestabelecida.

O conversor c.c.-c.a., que alimenta as cargas prioritárias, opera sempre como uma fonte de tensão (*voltage-controlled mode*) (ABUSARA *et al.*, 2014). Esse conversor só é desligado quando a bateria atinge o nível de carga mínimo, estabelecido para a sua operação. Essa configuração de inversor híbrido tipicamente não é empregada em produtos comerciais. No entanto, ela é indicada para aplicações onde exista a exigência de fornecimento ininterrupto de energia e requisitos rigorosos de qualidade de energia para a alimentação de cargas críticas.

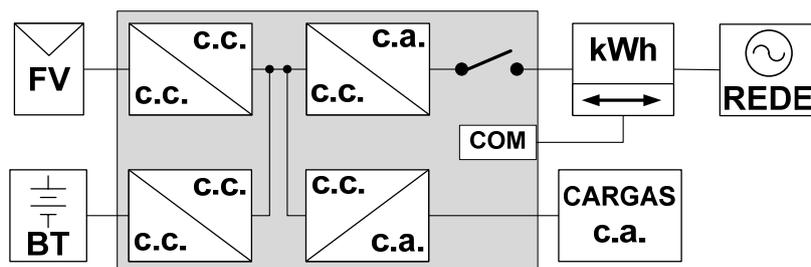


Figura 4 – Diagrama de blocos de um SFCR com bateria utilizando inversor híbrido com dois conversores c.c.-c.a. e conexões independentes para a carga e para a rede elétrica (configuração 1).

2.4 SFCR com bateria utilizando inversor híbrido (configuração 2)

A Fig. 5 apresenta um SFCR com bateria utilizando um inversor híbrido com apenas um conversor c.c.-c.a. e conexões independentes para as cargas e para a rede elétrica (ABB, 2015). Quando a rede elétrica está presente, essa configuração apresenta rendimento maior do que a configuração apresentada na Fig. 4, pois nesse caso, a conexão entre a rede elétrica e as cargas é estabelecida por meio dos contatos dos relés, representados pelas chaves dentro do bloco do inversor na Fig. 5. Por outro lado, nessa configuração a carga está exposta a distúrbios de qualidade de energia que podem ocorrer na alimentação fornecida pela rede elétrica.

Na configuração da Fig. 5, o conversor c.c.-c.a. do inversor híbrido opera como uma fonte de corrente, quando o inversor está conectado à rede elétrica e como uma fonte de tensão, quando o inversor está isolado da rede elétrica.

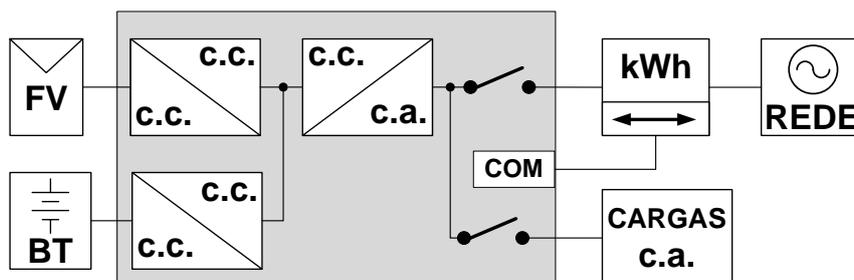


Figura 5 – Diagrama de blocos de um SFCR com bateria utilizando inversor híbrido com um conversor c.c.-c.a. e conexões independentes para a carga e para a rede elétrica (configuração 2).

2.5 SFCR com bateria utilizando inversor híbrido (configuração 3)

A Fig. 6 apresenta um SFCR com bateria utilizando um inversor híbrido com conexão única para a carga e para a rede elétrica (FRONIUS, 2015). Quando a rede elétrica está presente, as duas chaves permanecem fechadas e o conversor c.c.-c.a. opera como uma fonte de corrente conectada à rede.

Quando ocorre uma interrupção no fornecimento da rede elétrica, o sistema de proteção anti-ilhamento do inversor híbrido envia um sinal de comando para a abertura da chave externa, que tem a função de isolar a rede elétrica da saída do inversor e das cargas prioritárias. Após a abertura da chave externa, o inversor passa a operar como uma fonte de tensão alimentando as cargas a partir da energia produzida pelos módulos FV e da energia armazenada na bateria.

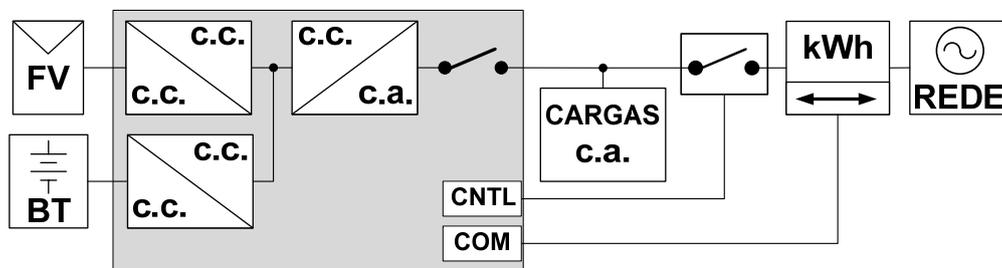


Figura 6 – Diagrama de blocos de um SFCR com bateria utilizando inversor híbrido com conexão única para a carga e para a rede elétrica (configuração 3).

3. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE EMERGÊNCIA

A operação dos SFCR com bateria desempenhando a função de sistema de alimentação de emergência tem como objetivo, prover a alimentação de cargas prioritárias durante a interrupção do fornecimento de energia pela rede elétrica. Nesse cenário, a energia utilizada para a alimentação das cargas prioritárias pode ser obtida da bateria e dos módulos fotovoltaicos, de acordo com a disponibilidade das fontes de energia e da energia consumida pelas cargas.

3.1 Sistema de alimentação de emergência utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.c. dos módulos FV

Considerando o SFCR com bateria, que emprega um inversor interativo com a rede e acoplamento c.c. (Fig. 2), operando como sistema de alimentação de emergência, obtém-se o comportamento descrito a seguir:

Quando a rede elétrica está presente, a chave de transferência externa ao inversor estabelece uma conexão entre a rede elétrica e as cargas prioritárias. Nessa condição, o conversor c.c.-c.a. permanece em estado de espera. A bateria pode ser carregada com energia obtida da rede elétrica, por meio do conversor c.a.-c.c. ou com a energia produzida pelos módulos FV, por meio do controlador de carga. Quando a bateria está carregada a energia produzida pelos módulos FV é injetada na rede elétrica, por meio dos conversores c.c.-c.c. e do conversor c.a.-c.c.. Nessa condição, os dois conversores operam com o fluxo de energia no sentido da bateria para a rede elétrica.

Quando ocorre uma interrupção no fornecimento de energia da rede elétrica, o inversor interativo aciona a chave de transferência externa estabelecendo a conexão entre a saída do conversor c.c.-c.a. e as cargas. No sistema da Fig. 2, o conversor c.c.-c.a. é controlado em tensão e opera com fluxo de energia unidirecional fornecendo energia obtida da bateria e dos módulos FV para as cargas. Quando a energia produzida pelos módulos FV é superior à energia consumida pelas cargas a energia excedente é utilizada para carregar a bateria. Quando a energia produzida pelos módulos FV é inferior à energia consumida pelas cargas, o complemento da energia necessária para a alimentação das cargas é fornecido pela bateria.

3.2 Sistema de alimentação de emergência utilizando inversor interativo com a rede e acoplamento c.a. dos módulos FV

Considerando o SFCR com bateria, que emprega um inversor interativo com a rede e acoplamento c.a. (Fig. 3), operando como sistema de alimentação de emergência, obtém-se o comportamento descrito a seguir:

Quando a rede elétrica está presente, a chave de transferência externa ao inversor estabelece a conexão entre a rede elétrica, as cargas prioritárias e o inversor para SFCR. Nessas condições, o conversor c.c.-c.a. permanece em estado de espera. A bateria pode ser carregada com energia obtida da rede elétrica, por meio do conversor c.a.-c.c.. As cargas podem ser alimentadas pelo inversor para SFCR e também pela rede elétrica. Quando a energia produzida pelos módulos FV é maior do que a energia consumida pelas cargas, a energia excedente é exportada para a rede elétrica. Quando a energia produzida pelos módulos FV é menor do que a energia consumida pelas cargas, a energia fornecida pela rede elétrica complementa a alimentação das cargas.

Quando ocorre uma interrupção no fornecimento de energia da rede elétrica, o inversor interativo aciona a chave de transferência externa estabelecendo a conexão entre a saída do conversor c.c.-c.a., as cargas e o inversor para SFCR.

Nessa condição, o conversor c.c.-c.a. opera convertendo a tensão c.c. obtida da bateria, por meio do conversor c.c.-c.c., para tensão c.a. que alimenta as cargas. Quando a energia produzida pelos módulos FV é maior do que a energia consumida pelas cargas a energia excedente é absorvida pelo inversor interativo com a rede para carregar a bateria. Quando a energia produzida pelos módulos FV é menor do que a energia consumida pelas cargas a energia fornecida pelo inversor interativo complementa a alimentação das cargas.

Se a descarga da bateria atingir o nível de desligamento do conversor c.c.-c.a. do inversor interativo com a rede, esse inversor deixa de fornecer tensão na saída que alimenta as cargas, e nessa condição, ocorre o desligamento do inversor para SFCR devido à atuação da proteção anti-ilhamento.

Quando a bateria se encontra completamente carregada não é possível absorver a energia excedente produzida pelos módulos FV. Nessa situação, o inversor interativo com a rede, que é responsável pelo gerenciamento do sistema precisa atuar para evitar que a energia excedente seja injetada no sistema. A seguir são apresentadas quatro estratégias que podem ser empregadas para realizar essa operação:

1) Quando existe um barramento de comunicação entre os inversores, o inversor interativo com a rede pode enviar um comando para que o inversor para SFCR reduza a potência fornecida em sua saída;

2) Quando existe uma chave em série apenas com a saída do inversor para SFCR comandada pelo inversor interativo com a rede, o inversor interativo pode acionar essa chave para provocar o desligamento do inversor para SFCR devido a atuação da proteção anti-ilhamento (STUDER, 2010);

3) Quando o inversor para SFCR atende o requisito de redução da potência ativa injetada na rede, em caso de elevação da frequência, o inversor interativo com a rede aumenta a frequência da onda senoidal fornecida em sua saída para reduzir a potência ativa injetada pelo inversor para SFCR. Esse requisito é estabelecido em algumas normas para inversores utilizados em SFCR (ABNT, 2013a). Alguns inversores para SFCR podem ser configurados para reduzir a potência linearmente em função do aumento da frequência da onda senoidal fornecida pelo inversor interativo com a rede, essa funcionalidade é denominada *frequency shift power control* (SMA, 2014a);

4) Quando existem cargas controladas pelo inversor interativo com a rede, que também são referidas como *diversion loads*, o inversor pode acionar essas cargas para absorver a potência excedente produzida pelos módulos FV (MAGNUM, 2010).

3.3 Sistema de alimentação de emergência utilizando inversor híbrido

Considerando um SFCR com bateria, que utiliza inversor híbrido, operando como sistema de alimentação de emergência, obtém-se o comportamento descrito a seguir:

Quando a rede elétrica está presente, as cargas são alimentadas com a tensão da rede elétrica nas configurações apresentadas nas Figuras. 2, 3, 5 e 6. A configuração apresentada na Fig. 4 é a única que alimenta as cargas por meio de um conversor c.c.-c.a. em todas as condições de operação. A bateria pode ser carregada pela rede elétrica ou pela energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos.

Quando ocorre uma interrupção no fornecimento de energia da rede elétrica, as cargas são alimentadas pelo conversor c.c.-c.a. do inversor híbrido, que pode utilizar a energia da bateria ou dos módulos fotovoltaicos de acordo com a disponibilidade. Quando a energia produzida pelos módulos FV é superior à energia consumida pelas cargas, a energia excedente é utilizada para carregar a bateria. Quando a energia produzida pelos módulos FV é inferior à energia consumida pelas cargas, a bateria fornece o complemento da energia para a alimentação das cargas.

4. ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Um dos motivos para a utilização de estratégias de gerenciamento de energia em SFCR com bateria é a defasagem entre a curva de produção diária de energia dos sistemas fotovoltaicos e os períodos onde há maior vantagem econômica na utilização da energia produzida na unidade consumidora.

Empregando-se os SFCR com bateria e as estratégias de gerenciamento de energia é possível armazenar a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, nos momentos de baixa demanda da unidade consumidora, para a utilização posterior, nos períodos de demanda elevada ou nos períodos em que a tarifa de energia é mais cara.

4.1 Energy time-shift

A estratégia de gerenciamento denominada *energy time-shift* consiste em armazenar energia, nos períodos de baixa demanda e baixo custo da energia da rede elétrica, para utilização posterior, nos períodos de alta demanda e alto custo da energia da rede elétrica. Em unidades consumidoras que possuem SFCR com bateria, a energia excedente produzida pelos módulos FV, que seria exportada para a rede elétrica num sistema sem bateria, pode ser armazenada para uso posterior no momento mais conveniente do ponto de vista econômico (IEC, 2011).

A Fig. 7 apresenta a curva diária de produção de energia dos módulos FV e a curva diária de demanda de uma unidade consumidora hipotética. Além disso, nessa figura são indicados os horários de ponta e fora de ponta considerados na tarifação horo-sazonal. O horário de ponta é composto por 3 horas consecutivas, no período entre as 17h e 22h. O horário fora de ponta é composto por um período de 21 horas diárias complementares ao horário de ponta. No horário de ponta a tarifa de energia elétrica é mais cara do que no horário fora de ponta (PROCEL, 2011).

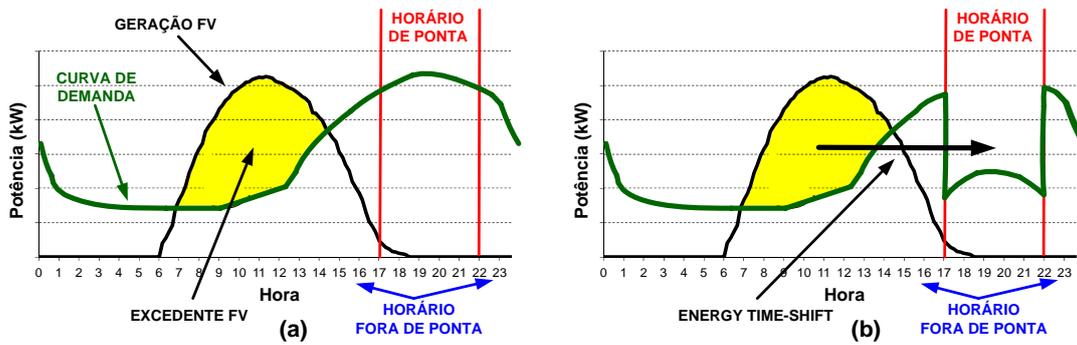


Figura 7 – Energy time-shift:

- (a) SFCR sem bateria - curva diária de geração dos módulos fotovoltaicos e curva diária de demanda;
- (b) SFCR com bateria - *energy time-shift* aplicado para redução do consumo e demanda no horário de ponta.

Na Fig. 7(a), considera-se que a unidade consumidora possui um SFCR sem bateria, nesse caso, a energia excedente produzida pelos módulos FV é injetada na rede elétrica.

Na Fig. 7(b), considera-se que a unidade consumidora possui um SFCR com bateria, nesse caso, a energia excedente produzida pelos módulos FV é armazenada na bateria. No exemplo da Fig. 7(b), a bateria é descarregada durante o período que vai das 17h às 22h. A energia descarregada no horário de ponta reduz a demanda e o consumo de energia da rede elétrica no período em que a tarifa é mais cara, reduzindo os gastos com a fatura de energia elétrica.

4.2 Autoconsumo

O autoconsumo é a razão entre a parcela da energia produzida pelos módulos FV que é consumida dentro da unidade consumidora ($E_{FV UC}$) e o total da energia produzida pelos módulos FV ($E_{FV TOT}$), definido pela Eq. (1).

$$Autoconsumo(\%) = (E_{FV UC} / E_{FV TOT}) \cdot 100 \quad (1)$$

Essa estratégia de gerenciamento de energia tem como objetivo maximizar a utilização da energia produzida pelos módulos FV dentro da unidade consumidora, o que resulta na redução do fluxo de energia entre a unidade consumidora e a rede elétrica. Esse processo é vantajoso no sistema de tarifação *feed-in tariff*, quando o valor pago pela energia importada da rede é maior do que o valor recebido pela energia exportada para a rede elétrica (SMA, 2010).

No Brasil a resolução normativa N°482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu o sistema de compensação de energia. Nesse sistema, pode ser vantajoso aumentar o autoconsumo devido à incidência de impostos na fatura de energia elétrica (RAUSCHMAYER e GALDINO, 2014).

A Fig. 8(a) apresenta um SFCR sem bateria e a Fig. 8(b) apresenta um SFCR com bateria, ilustrando $E_{FV TOT}$, $E_{FV UC}$ e $E_{FV REDE}$ (parcela da energia produzida pelos módulos FV que é exportada para a rede elétrica).

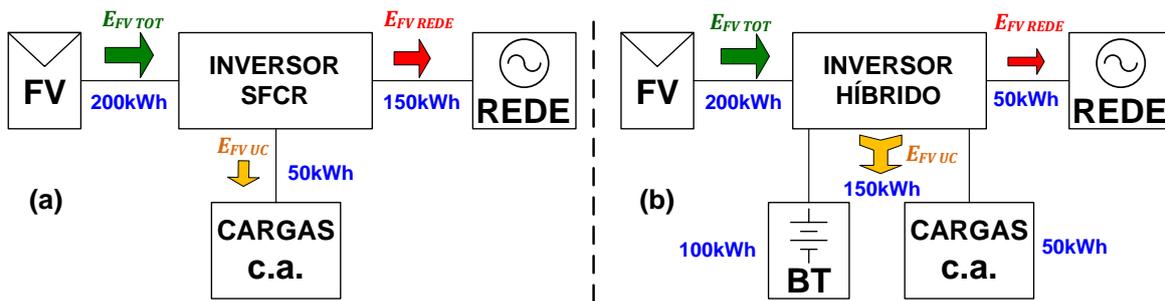


Figura 8 – Autoconsumo:

- (a) SFCR sem bateria (autoconsumo = 25%) - $E_{FV TOT}=200$ kWh; $E_{FV UC}=50$ kWh; $E_{FV REDE}=150$ kWh;
- (b) SFCR com bateria (autoconsumo = 75%) - $E_{FV TOT}=200$ kWh; $E_{FV UC}=150$ kWh; $E_{FV REDE}=50$ kWh.

Substituindo na Eq.(1) os valores de energia indicados na Fig. 8(a), obtém-se um autoconsumo de 25%. O autoconsumo que ocorre em um SFCR sem bateria e sem modificação no padrão de consumo é denominado autoconsumo natural. O autoconsumo natural em uma instalação residencial típica fica entre 20 e 40% (SMA, 2010).

Uma maneira de aumentar o autoconsumo, sem modificar o padrão de consumo, é por meio de um SFCR com bateria. Nesse sistema, quando a energia produzida pelos módulos FV é maior do que a energia consumida pelas cargas da unidade consumidora, a energia excedente é armazenada na bateria. Quando a energia produzida pelos módulos FV é menor do que a energia consumida pelas cargas, a energia da bateria complementa a alimentação das cargas da unidade consumidora. Substituindo na Eq.(1) os valores de energia indicados na Fig. 8(b), obtém-se um autoconsumo de 75%.

4.3 Peak shaving

A estratégia de gerenciamento de energia denominada *peak shaving* é empregada com o objetivo de reduzir o pico da curva de demanda (ZIPP, 2013).

Os consumidores do grupo A (atendidos em média e alta tensão $\geq 2,3$ kV) enquadrados na tarifação horo-sazonal, podem se beneficiar da aplicação da estratégia *peak shaving*, pois uma das parcelas da fatura de energia elétrica desses consumidores é referente a ultrapassagem. Essa parcela é cobrada quando a demanda medida ultrapassa a demanda contratada (PROCEL, 2011).

A Fig. 9 ilustra a aplicação da estratégia *peak shaving* para evitar a ultrapassagem da demanda contratada. Nesse exemplo de aplicação, a estratégia consiste em armazenar energia na bateria durante os períodos em que a demanda medida é menor do que a contratada, para complementar a alimentação das cargas da unidade consumidora, descarregando a bateria, quando a demanda das cargas é maior do que a demanda contratada.

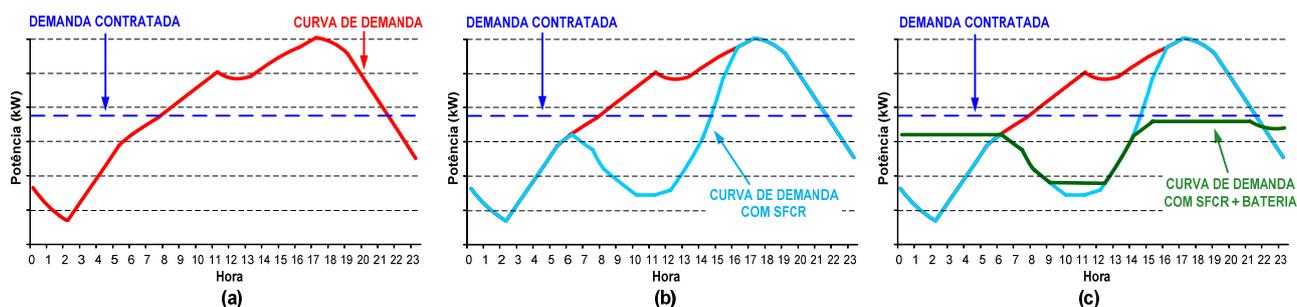


Figura 9 – *Peak shaving*:

- (a) sem SFCR - curva de demanda (vermelho); limite da demanda contratada (linha tracejada azul);
 (b) SFCR sem bateria - curva de demanda com SFCR sem bateria (ciano);
 (c) SFCR com bateria - curva de demanda com SFCR e bateria (verde).

Na Fig. 9(a) são apresentadas: a curva diária de demanda hipotética de uma unidade consumidora e a linha tracejada, que representa o limite da demanda contratada. Nessa figura observa-se que ocorre ultrapassagem da demanda contratada durante um longo período do dia.

Na Fig. 9(b) é apresentada a curva de demanda obtida após a instalação de um SFCR sem bateria. Nessa figura observa-se que durante o período do dia em que a energia produzida pelos módulos FV contribui para a alimentação das cargas, ocorre uma redução da curva de demanda. No entanto, após as 15 horas, aproximadamente, observa-se a ocorrência de ultrapassagem da demanda contratada.

Na Fig. 9(c) é apresentada a curva de demanda obtida após a instalação de um SFCR com bateria. Nessa figura observa-se que a curva de demanda obtida utilizando SFCR com bateria permanece abaixo do limite da demanda contratada durante todo o dia.

5 CONCLUSÃO

A inclusão de bateria nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede possibilita o aumento das funcionalidades e aplicações desses sistemas. Essas aplicações maximizam os benefícios técnicos e econômicos, que podem ser obtidos com a utilização dos sistemas fotovoltaicos.

Do ponto de vista do consumidor e proprietário do sistema fotovoltaico, a implementação de um sistema de alimentação de emergência minimiza os transtornos e prejuízos, que podem ser causados pela interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica. As estratégias de gerenciamento de energia otimizam o gerenciamento do consumo e da produção de energia na unidade consumidora, que por sua vez reduz o tempo de retorno do investimento.

Do ponto de vista do sistema elétrico, o aumento do autoconsumo reduz o carregamento e as perdas no sistema. A aplicação das estratégias de gerenciamento de energia também pode produzir outros benefícios como: uma curva de demanda mais nivelada; a redução do consumo no horário de ponta; a suavização da intermitência da curva de geração de energia do sistema FV. Além disso, a inclusão de bateria possibilita o aumento da penetração de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica.

Considerando os benefícios mencionados e a perspectiva de redução de custo dos sistemas de armazenamento de energia, a utilização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede com bateria deve apresentar um crescimento significativo nos próximos anos.

REFERÊNCIAS

- ABB. Product flyer for REACT-3.6/4.6-TL. 2015. Disponível em: <
https://library.e.abb.com/public/abf030c96ecac50d85257e1b00730610/REACT-3.6-4.6_BCD.00386_EN_RevB.pdf>. Acesso em: 22 Nov. 2015.

- ABNT. NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição ABNT 2013a.
- ABUSARA, M. A.; GUERRERO, J. M.; SHARKH, S. M. Line-Interactive UPS for Microgrids. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 61, n. 3, p. 1292-1300, 2014. ISSN 0278-0046.
- FRONIUS. Technical data Fronius Energy Package 2015. Disponível em: < http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-0B96D65D-AB922A73/fronius_international/SE_DOC_DBL_Fronius_Symo_Hybrid_EN_1__386411_snapshot.pdf >. Acesso em: 22 Nov. 2015.
- IEC. Energy Storage team. Electrical energy Storage: white paper. IEC Market Strategy Board 2011
- IHS. Residential Solar Energy Storage Market to Grow by Factor of 10 from 2014 to 2018. 2015. Disponível em: < <http://press.ihs.com/press-release/design-supply-chain/residential-solar-energy-storage-market-grow-factor-10-2014-2018> >. Acesso em: 25 Nov. 2015.
- JIN-HEE, Y.; KU-IN, J.; JUNG-MIN, K. Energy storage system with PV generation and on-line UPS functions. IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014, Sept. 28 - Oct. 2. p.1-4.
- MAGNUM, E. Using Magnum Energy's Inverters In AC Coupling Applications. 2010. Disponível em: < <http://www.magnum-dimensions.com/sites/default/files/MagArchive/AN-0002-AC-Coupling-Rev-5-10.pdf> >. Acesso em: 20 Nov. 2010.
- MANGHANI, R. U.S. solar-plus-storage market Drivers, Economics And Outlook. 2015. Disponível em: < <http://naatbatt.org/wp-content/uploads/2015/07/Intersolar-EES-Release-Event-07-14-15.pdf> >. Acesso em: 25 Nov. 2015.
- OUTBACK, P. T. Application Note Adding the battery back-up power option to existing grid-tied PV/solar systems. 2014. Disponível em: < http://www.outbackpower.com/downloads/documents/flexcoupled/app_note_ac.c_new.pdf >. Acesso em: 20 Nov. 2015
- PROCEL. Manual de Tarifação da Energia Elétrica. 2011. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf >. Acesso em: 25 Nov. 2015.
- RASHID, M. Power Electronics Handbook. Third Edition. Burlington, MA: Elsevier Science, 2011. ISBN 9780123820372.
- RAUSCHMAYER, H.; GALDINO, M. A. os impactos da regulamentação anel 482 e da legislação tributária no retorno financeiro de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. V CBENS - V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife.
- SAMSUNG, S. Energy storage system for homes. 2015. Disponível em: < [http://www.samsungdi.com/download?pathGbn=ESS_DOWN_PATH&fn=B26_AIO_for_enduser\(EN\)_UK082015_V4.pdf](http://www.samsungdi.com/download?pathGbn=ESS_DOWN_PATH&fn=B26_AIO_for_enduser(EN)_UK082015_V4.pdf) >. Acesso em: 21 Nov. 2015.
- SMA. the self-consumption bonus information and details regarding the self-consumption of solar energy. 2010. Disponível em: < <http://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/the-self-consumption-bonus.html> >. Acesso em: 24 Nov. 2015.
- SMA. PV Inverters - Use of PV inverters in off-grid systems and backup systems in North and South America. 2014a. Disponível em: < <http://files.sma.de/dl/7910/SB-OffGrid-TI-US-en-16.pdf> >. Acesso em: 22 Nov. 2015.
- SMA. SUNNY BOY 3600 / 5000 SMART ENERGY. 2014b. Disponível em: < <http://files.sma.de/dl/21567/SB5000SE-DEN1441web.pdf> >. Acesso em: 21 Nov. 2015.
- STUDER, I. S. Anti-blackout system for grid connected solar installations (Solsafe concept). 2010. Disponível em: < <http://www.studer-innotec.com/upload/folders/777.pdf> >. Acesso em: 22 Nov. 2015.
- SVARC, J. hybrid/off-grid inverter and solar energy storage review. 2015. Disponível em: < <http://www.cleanenergyreviews.info/blog/hybrid-solar-inverter-review> >. Acesso em: 25 Nov. 2015.
- VICTRON, E. AC-coupling and the Factor 1.0 rule. 2015. Disponível em: < http://www.victronenergy.com/live/ac_coupling:start >. Acesso em: 21 Nov. 2015.
- VILLALVA, M. G. G., J. R. Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 1ª Ed. São Paulo: Editora Érica, 2012. 224p. ISBN 9788536504162.
- ZIPP, K. solar white paper: peak demand reduction using battery storage. 2013. Disponível em: < <http://www.solarpowerworldonline.com/2013/02/solar-white-paper-peak-demand-reduction-using-battery-storage/> >. Acesso em: 25 Nov. 2015.

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH ENERGY STORAGE FOR ON-GRID AND OFF-GRID OPERATION

Abstract. *This work presents an overview about grid-connected photovoltaic systems with energy storage for off-grid and on-grid operation. Some configurations of these systems employing grid-interactive and hybrid inverters are presented. The characteristics, operating principle and application of these inverters in emergency power systems are discussed. Furthermore, the motivation, operating principle and application examples of energy management strategies, energy time-shift, self-consumption and peak shaving are shown.*

Key words: *Grid-connected photovoltaic systems, Hybrid inverters, Battery.*