

# INVERSORES FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS – CLASSIFICAÇÃO, MODOS DE OPERAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Lucas Vizzotto Bellinaso – lbellinaso@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Cachoeira do Sul e Grupo de Eletrônica de Potência e Controle

Leandro Michels – michels@gepoc.ufsm.br

Universidade Federal de Santa Maria, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle

**Resumo.** *Inversores fotovoltaicos híbridos são aqueles que operam conectados à rede e apresentam armazenamento de energia em baterias para alimentar cargas prioritárias na ausência de rede elétrica. Assim, reúnem as características de inversores conectados à rede convencionais e fontes ininterruptas de energia (UPS). O objetivo deste trabalho é apresentar classificação, modos de operação e princípios de funcionamento de inversores híbridos através de revisão da literatura e discussão. A classificação de inversores híbridos foi obtida baseando-se nas classes de UPS descritas na IEC 62040. Os modos de operação dos conversores estáticos integrados no inversor híbrido são apresentados, e critérios genéricos para seleção desses modos são discutidos. Por fim, princípios de funcionamento dos inversores híbridos são revisados considerando normas de inversores fotovoltaicos e UPS. As operações conectada (on-grid) e desconectada da rede (off-grid) são discutidas, além dos processos de desconexão e reconexão à rede. A análise realizada mostra que é possível que o inversor híbrido opere como carga antes de finalizar o tempo mínimo de reconexão descrito na NBR 16149, o que aumenta a autonomia das baterias. Além disso, constata-se que é relevante que o inversor híbrido realize uma transferência suave entre modos on-grid e off-grid para que cargas como motores não sofram esforços mecânicos desnecessários e sobrecorrentes.*

**Palavras-chave:** *Inversores fotovoltaicos conectados à rede, Armazenamento de Energia, UPS.*

## 1. INTRODUÇÃO

Inversores fotovoltaicos são necessários em sistemas fotovoltaicos como interface entre a geração em corrente contínua e a rede elétrica ou cargas de corrente alternada (Bellinaso and Michels 2014). Inversores fotovoltaicos normalmente são classificados em dois tipos em relação à aplicação: inversores conectados à rede (on-grid) (Kjaer, Pedersen, and Blaabjerg, 2005) e inversores desconectados da rede elétrica (off-grid) (Schwertner et al., 2013). Inversores on-grid injetam a potência gerada pelo sistema fotovoltaico diretamente na rede elétrica, e devem fornecer energia à rede apenas se a rede está em condições normais, de acordo com normas específicas como a NBR 16149/150 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013), a NBR IEC 62116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012) e a IEC 62109 (International Electrotechnical Commission, 2010), que trata dos requisitos de segurança de inversores. Inversores off-grid são empregados em sistemas isolados da rede elétrica para alimentação de cargas em corrente alternada, normalmente fornecendo tensão senoidal. Esses inversores também empregam a IEC 62109 para seus requisitos de segurança. Como a geração fotovoltaica é dependente da presença de irradiação solar, sistemas autônomos normalmente utilizam baterias para armazenam a energia durante o dia e consumir durante a noite (Duryea, Islam, and Lawrance, 1999).

Recentemente, inversores híbridos que reúnem as características on e off-grid têm surgido no mercado. Esses inversores híbridos funcionam conectados à rede, podendo fornecer energia solar à rede elétrica, mas podem também atender a cargas prioritárias durante faltas da rede elétrica. A continuidade de operação é importante para aplicações em que custos com faltas de energia superam os custos do equipamento (Karpati et al., 2012). Inversores híbridos podem ser tratados como uma fonte ininterrupta de energia (UPS – *Uninterruptible Power Supply*), pois seu objetivo é manter a carga sendo alimentada em caso de faltas de da rede elétrica. Nesse caso, pode-se considerar as normas de UPS como a IEC 62040 (International Electrotechnical Commission, 1999). Por ser uma tecnologia insipiente, normas específicas para inversores híbridos ainda não foram desenvolvidas. Contudo, muitas normas desenvolvidas para UPS e de inversores conectados à rede podem ser aplicadas ou adaptadas para esta aplicação. Além disso, diversas tecnologias empregadas em *microgrids* e UPS também podem ser aplicadas em inversor fotovoltaicos híbridos (Heredero-Peris et al., 2013; Azevedo et al., 2013; Chiang et al., 2010). Entretanto, alguns pontos importantes como a classificação de inversores híbridos e as transições entre os modos de operação não estão claramente definidas na literatura.

O tema de inversores fotovoltaicos híbridos é relevante para a realidade brasileira. Esses inversores apresentam vantagens em relação à UPS de poder fornecer energia elétrica excedente à rede elétrica e funcionar de maneira autônoma durante vários dias sem necessitar de reabastecimento de combustível. Caso a diferença de preço entre um inversor conectado à rede normal e um híbrido não for significativa, esses inversores poderão assumir grande parcela do mercado brasileiro de sistemas fotovoltaicos nos próximos anos. Sendo assim, esse artigo tem o objetivo de explicar o

funcionamento geral de inversores híbridos, considerando normas de inversores conectados à rede e de UPSs. Na seção 2, uma classificação de inversores híbridos é proposta baseando-se na norma IEC 62040. Na seção 3, modos de operação dos inversores híbridos são relacionados considerando os conversores estáticos internos ao inversor. Na seção 4, o funcionamento on-grid e off-grid, assim como as transições entre esses modos são explicadas. Também são avaliados alguns possíveis requisitos para que esses inversores melhor atendam às cargas.

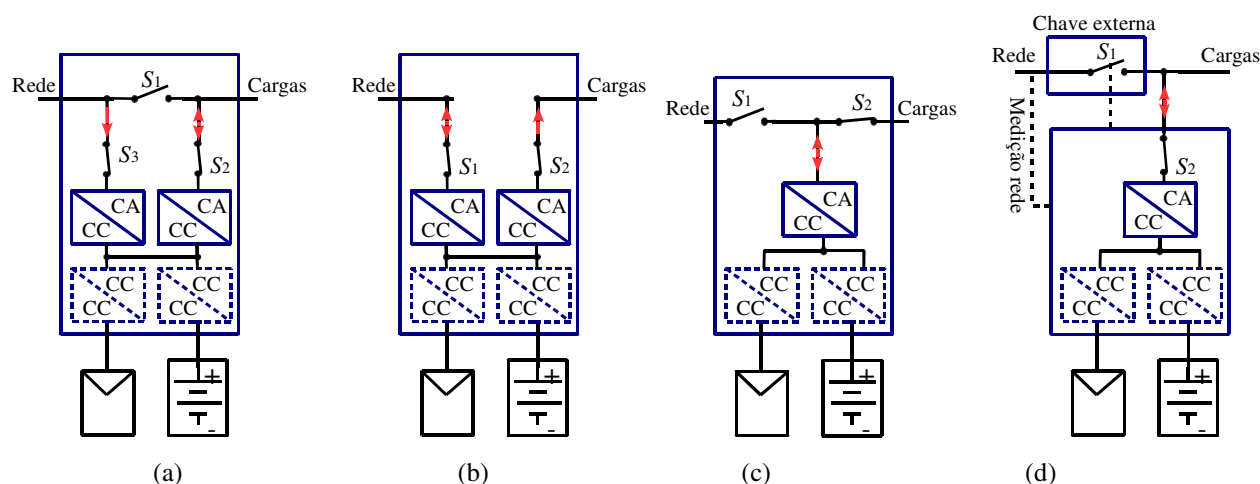


Figura 1 – Tipos de inversores híbridos: (a) espera passiva – com um retificador CA-CC para carga de baterias e um inversor CC-CA para conexão à rede e alimentação das cargas; (b) dupla conversão – com dois conversores CC-CA e saída para rede e cargas independentes; (c) interativa com a rede – com único conversor CC-CA com comutação da saída para rede e cargas; (d) interativa com a rede – com único conversor CC-CA e única saída para rede e cargas.

## 2. CLASSIFICAÇÃO DE INVERSORES HÍBRIDOS

Inversores fotovoltaicos híbridos podem ser classificados em relação à sua conexão elétrica com a rede e as cargas. Para isso, podem ser comparados com fontes ininterruptas de energia (UPS - *Uninterruptible Power Supply*), que possuem três tipos principais de acordo com a IEC 62040: (a) UPS de espera passiva (*Passive Stand-by*); (b) UPS de dupla conversão (*double conversion*); e (c) UPS interativa com a rede (*line-interactive*) (Karve, 2000; Bekiarov and Emadi, 2002).

UPSs de espera passiva apresentam um conversor CC-CA (inversor) para alimentar as cargas apenas quando há falta da rede elétrica. Essa UPS apresenta também um retificador (CA-CC) com potência inferior que carrega as baterias quando há presença da rede elétrica. A Fig. 1(a) apresenta um inversor híbrido desse tipo. O retificador CA-CC seria utilizado exclusivamente para carga das baterias. O conversor CC-CA de saída (inversor) seria utilizado para fornecer energia à rede e alimentar as cargas prioritárias. Essa classe de inversor híbrido não é comercialmente adotada, pois apresenta maior custo sem vantagens técnicas.

UPSs de dupla conversão apresentam um conversor CA-CC (retificador) de potência superior à do conversor CC-CA (inversor). Essa UPS geralmente funciona de maneira contínua, mesmo quando a rede está em condições normais. Apresenta a vantagem de a tensão e frequência da carga serem controladas de maneira independente da rede, o que garante qualidade no fornecimento de energia. Entretanto, pode-se também inserir uma chave de by-pass entre entrada da rede e saída para as cargas para aumentar a confiabilidade. Essa chave seria acionada em caso de falhas do inversor, ou para obter maior eficiência de conversão. Um tipo de inversor híbrido com dupla conversão é apresentado na Fig. 1(b). Apresenta dois conversores CC-CA: um que conecta à rede elétrica de acordo com a NBR 16149, e outro que alimentara as cargas prioritárias, de acordo com IEC 62040. Da mesma forma que para as UPSs, esse tipo de inversor híbrido pode garantir a qualidade da energia fornecida à carga independente das condições da rede.

UPSs interativas com a rede apresentam um único conversor CC-CA bidirecional que funciona também como carregador de baterias. Os tipos de inversores híbridos apresentados na Fig. 1(c) e 1(d) são como esse tipo de UPS, pois há um único conversor CC-CA bidirecional. Na Fig. 1(c) é apresentado um tipo de inversor híbrido em que as saídas para a rede e cargas são separadas. Os conversores CC-CC são opcionais, de acordo com a topologia empregada. Esse tipo de inversor apresenta a vantagem de ter todas as chaves necessárias para garantir a segurança do sistema integrada no equipamento. Na Fig. 1(d) é apresentado um tipo de inversor híbrido que apresenta uma única saída para rede e cargas. Esse sistema necessita de uma chave externa para desconexão da rede com comunicação com o inversor para garantir a desconexão. Além disso, o inversor deve monitorar a tensão da rede a montante dessa chave para conectar novamente quando há retorno das condições normais de tensão e frequência da rede.

## 3. MODOS DE OPERAÇÃO

Um inversor híbrido pode operar conectado ou desconectado da rede elétrica. Esses modos são ilustrados na Fig. 2, onde se apresenta a direção da energia originada do gerador fotovoltaico (GFV), rede elétrica e baterias. Durante operação conectada à rede (Fig. 2(a)), verifica-se que a energia gerada pelo GFV pode ser utilizada para carregar as

baterias, alimentar as cargas prioritárias ou injetar o excedente na rede elétrica. A energia da rede pode ser utilizada para alimentar as cargas ou carregar as baterias. Já a energia armazenada nas baterias pode ser utilizada para alimentar as cargas ou injetar na rede. Entretanto, destaca-se que injetar energia das baterias normalmente não é economicamente viável, pois o custo da energia da rede é inferior ao custo da energia armazenada nas baterias. Em operação desconectada da rede elétrica (Fig. 2(b)), a energia do GFV é utilizada para carregar as baterias e alimentar a carga. A energia armazenada nas baterias alimenta as cargas quando há escassez de energia fotovoltaica.

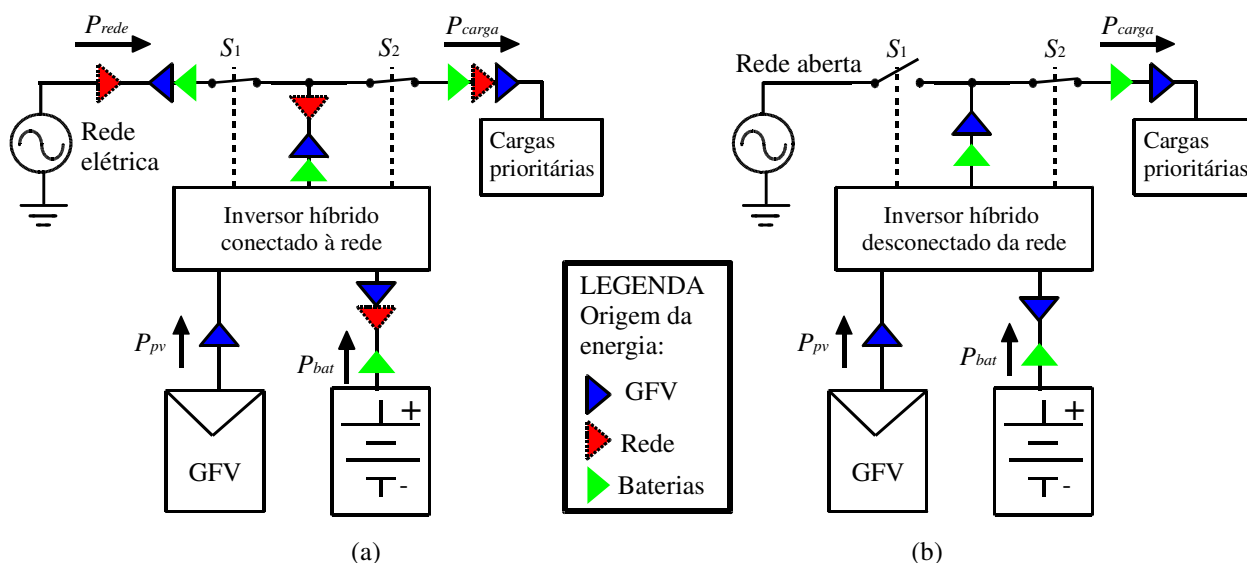


Figura 2 – Inversor híbrido funcionando (a) conectado à rede e (b) desconectado da rede.

Os conversores CC-CC e CC-CA internos ao inversor híbrido (Fig. 1) apresentam diferentes modos de operação de acordo com o tipo de controle aplicado e o fluxo da potência. O conversor CC-CC que conecta o banco de baterias, por exemplo, apresenta diferentes modos de carga e descarga. Esses modos de operação devem ser selecionados pelo inversor para atender aos seguintes critérios:

**Equilíbrio de potências.** O inversor fotovoltaico deve operar de maneira estável. A tensão do barramento CC que conecta os conversores (Schwertner et al., 2013; Candido, Michels, e Hey, 2010) deve permanecer dentro de limites seguros. Para isso, é necessário garantir o balanço de potências das fontes e cargas. Desconsiderando perdas, a equação do equilíbrio de potências de um inversor híbrido é dada por:

$$P_{carga} = P_{rede} + P_{pv} + P_{bat} \quad (1)$$

onde:

$P_{carga}$ : potência consumida pelas cargas prioritárias;

$P_{rede}$ : potência obtida na rede elétrica (nula para operação desconectada da rede);

$P_{pv}$ : potência gerada pelo gerador fotovoltaico (GFV);

$P_{bat}$ : potência de descarga das baterias.

$P_{pv}$ ,  $P_{bat}$  e  $P_{rede}$  são controladas pelo inversor híbrido.  $P_{carga}$  é controlada pelo usuário, que define quando ligar e desligar determinada carga. O inversor híbrido pode apenas desligar a carga em caso de falta de energia. Portanto, para garantir o balanço de potências do inversor, existem quatro graus de liberdade: controle das potências  $P_{pv}$ ,  $P_{bat}$  e  $P_{rede}$ , e desligamento da carga.

**Restrições de projeto.** Limites físicos dos componentes do sistema, como corrente, potência, tensão, ou temperatura máxima devem ser considerados na escolha dos modos de operação dos conversores (International Electrotechnical Commission 2010). Uma importante restrição física aplicada a inversores híbridos é a carga e descarga máxima das baterias. Além disso, existem limites relacionados a normas técnicas e regulamentação que influenciam nos modos de operação do sistema. Como exemplo, não é permitido no Brasil que inversores fotovoltaicos regulem a tensão da rede elétrica.

**Minimização de custos ou maximização de lucro.** Inversores híbridos possibilitam escolher quando, como e quanto carregar e descarregar baterias. Em caso de tarifa de energia variável ao longo do dia, isso permite carregar as baterias em horários em que a energia da rede é barata, e descarregar quando é cara (horário de pico) (Chen et al., 2011). Entretanto, isso aumenta o risco em caso de falta de energia após descarga das baterias, e pode reduzir a vida útil das baterias (Riffonneau et al., 2011), o que pode se tornar inviável.

Os possíveis modos de operação do inversor híbrido são a combinação dos modos de operação dos conversores que compõe esse inversor. Os conversores CC-CC e CC-CA podem operar com potência independente ou dependente

do balanço de potências. Considerando a topologia da Fig. 1(d), podem-se obter os modos de operação dos conversores em função do balanço de potências. Os modos de operação dos conversores são descritos a seguir.

**Conversor CC-CC conectado ao gerador fotovoltaico.** Pode operar em 4 modos de operação: i) desligado; ii) potência constante; iii) seguimento do ponto de máxima potência (SPMP); e iv) potência dependente do balanço de potências.

**Conversor CC-CC que controla carga das baterias.** Pode operar em 5 modos de operação genéricos: i) desligado; ii) carga independente, com corrente constante, pulsada ou flutuação (Koutroulis e Kalaitzakis, 2004); iii) carga dependente do balanço de potências; iv) descarga independente; e v) descarga dependente do balanço de potências.

**Conversor CC-CA.** Pode operar em 6 modos de operação: i) desligado; ii) inversor on-grid, com controle de saída independente do balanço de potências; iii) inversor on-grid, com corrente controlada para garantir balanço de potências; iv) carga de baterias on-grid, com controle de entrada independente do balanço de potências; v) carga de baterias on-grid, com controle de entrada dependente do balanço de potências; e vi) inversor off-grid, controlando a tensão de saída.

No caso de inversores híbridos com dupla conversão, mostrado na Fig. 1(b), o conversor conectado à rede opera apenas nos modos (i) a (v) (on-grid) ou desligado, enquanto o conversor conectado às cargas opera apenas no modo (vi) (off-grid) ou desligado.

Considerando todas as possíveis operações dos conversores, podem-se obter  $4 \cdot 5 \cdot 6 = 120$  combinações de modos de operação. Entretanto, várias dessas combinações não são utilizadas, ou são implementadas de maneira simplificada. Normalmente um único conversor controla o balanço de potências do inversor híbrido, enquanto os outros operam de maneira independente.

## 4. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Os princípios de funcionamento aqui apresentados são relativos aos conversores CC-CA na saída dos inversores híbridos. Esses conversores são a parte mais crítica de inversores híbridos, pois servem de interface com a rede e cargas prioritárias.

### 4.1 Operação conectada à rede (on-grid)

Quando conectado à rede, o inversor híbrido deve funcionar da mesma maneira que um inversor conectado à rede convencional, de acordo com a NBR 16149. O inversor deve controlar sua corrente de saída de forma senoidal, com conteúdo harmônico reduzido e independente de distorções da tensão e curto-circuitos. A referência de corrente senoidal é obtida sincronizando a tensão da rede com uma malha de captura de fase (PLL – *Phase Locked Loop*) (Freijedo et al., 2009).

A Fig. 3 ilustra a operação conectada à rede em modo corrente, válida tanto para um inversor conectado à rede convencional quanto um inversor híbrido. Na situação apresentada, o inversor injeta corrente na rede elétrica, que fornece a tensão de referência. Inicialmente, a carga 1 está ligada com corrente inferior à do inversor. Como o inversor injeta mais potência do que a carga absorve, a potência excedente é injetada na rede elétrica. No instante  $t_1$  a carga 2 é ligada com potência superior à do inversor. Verifica-se que ocorre um degrau na corrente da rede para atender essa carga, e o sentido do fluxo de potência da rede é trocado. Ao mesmo tempo, a corrente de saída do inversor não é afetada. Dessa forma, verifica-se que o modo corrente mantém a corrente de saída do inversor constante, de maneira independente da carga, caso essa carga não afete a tensão do ponto de conexão.

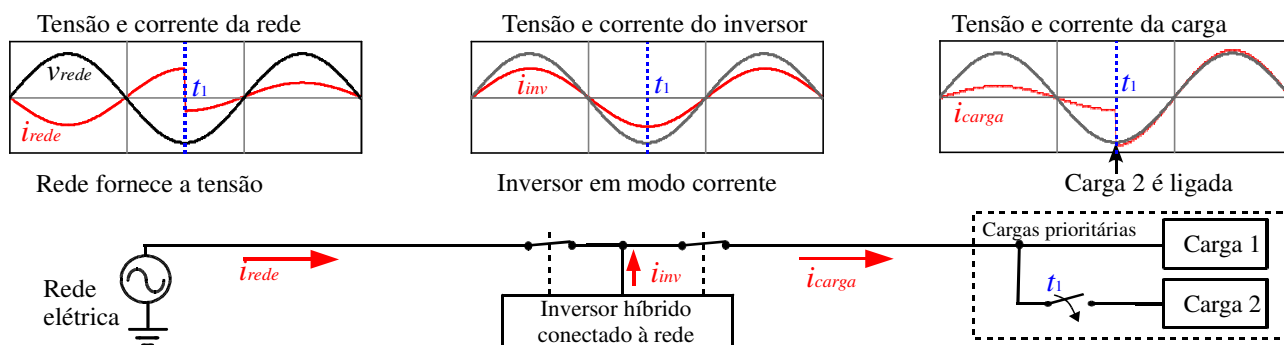


Figura 3 – Inversor híbrido conectado à rede (modo corrente)

Diferentemente de um inversor conectado à rede convencional, um inversor híbrido pode também obter potência da rede para carregar as baterias. Esse modo é chamado aqui de carga de baterias on-grid. Nesse modo, o inversor

funciona como uma carga convencional, e deveria atender a normas de cargas convencionais. Entretanto, como o mesmo conversor CC-CA é utilizado, pode-se operar em modo corrente senoidal sem que isso adicione custos ao equipamento. Nesse caso, a corrente deve ser controlada para ser senoidal, com os mesmos limites de distorção harmônica da NBR 16149. Deve-se destacar que a corrente máxima nesse modo de operação pode ser a mesma do modo inversor on-grid sem que isso ultrapasse os limites de corrente dos componentes internos do equipamento.

Uma questão relevante quanto ao modo de carga de baterias pela rede é o consumo de potência reativa. Na NBR 16149, inversores conectados à rede maiores do que 3 kW podem operar com fator de potência indutivo inferior a 0,98 quando a tensão eficaz da rede é superior a 104% da nominal. Isso reduz a tensão da rede para valores mais próximos da nominal, mitigando problemas com sobre tensão. Entretanto, essa regra pode não ser aplicável ao modo de carga de baterias pela rede (on-grid), pois o inversor opera como uma carga convencional, o que não é o escopo da NBR 16149. Mais estudos devem ser realizados para tratar desse modo de operação de inversores híbridos.

Outra questão relevante em operação on-grid de inversores híbridos é o curto-circuito das cargas prioritárias. A corrente de saída do inversor híbrido é limitada pela malha de controle de corrente, mas uma corrente de curto-circuito proveniente da rede é muito maior. Nas topologias da Fig. 1(c) e Fig. 1(d), uma corrente de curto-circuito das cargas prioritárias seria proveniente da rede e passaria pela chave  $S_1$ . Por isso, essa chave deve ter capacidade para suportar a corrente de curto-circuito máxima presumida no ponto de instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) sem danificar-se, até a proteção atuar. Dispositivos de proteção na entrada da rede são necessários para garantir a segurança da instalação. Caso essa chave  $S_1$  seja danificada, o inversor não poderá operar desconectado da rede elétrica.

#### 4.2 Operação desconectada da rede (off-grid)

Quando há falta da rede elétrica ou a tensão da rede está fora dos padrões da NBR 16149, o inversor híbrido opera de maneira desconectada da rede (off-grid) para suprir cargas prioritárias. Assim, o inversor opera da mesma maneira que uma UPS, controlando a tensão de saída de acordo com requisitos da IEC 62040. O inversor deve poder suprir corrente da carga. Cargas não lineares e com nível CC de corrente também deve ser supridas. A Fig. 4 ilustra a operação off-grid, em que o inversor opera em modo tensão. A tensão é controlada pelo inversor, e a corrente do inversor depende da carga. No instante em que a carga 2 é ligada, ocorre um degrau na corrente do inversor para suprir essa carga, mas a tensão é mantida constante. Dessa forma, verifica-se que a tensão de saída do inversor híbrido deve ser idealmente independente da carga no modo off-grid.

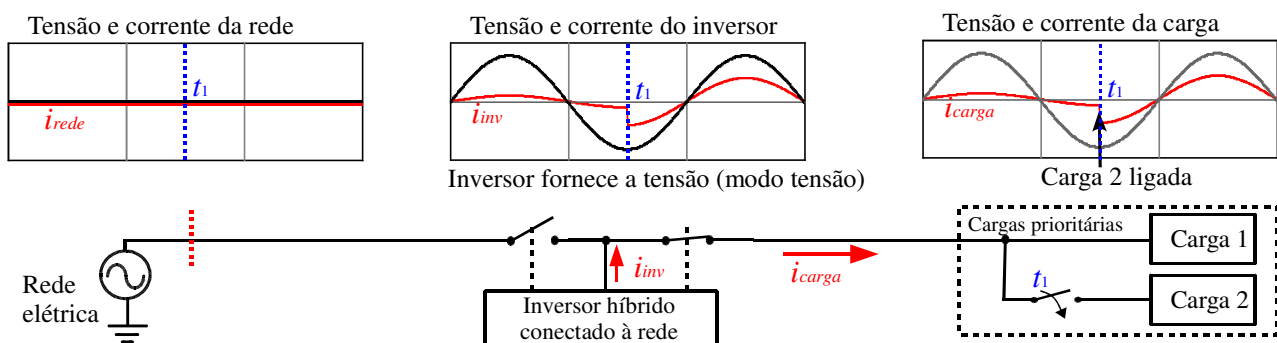


Figura 4 – Operação desconectada da rede (modo tensão).

A IEC 62040 estabelece a possibilidade de uma UPS fornecer tensão senoidal e não senoidal. Entretanto, nas topologias de inversor híbrido da Fig. 1(c) e Fig. 1(d) o mesmo conversor CC-CA que fornece corrente senoidal para a rede também fornece tensão no modo desconectado da rede. Nesses casos, não se justifica a utilização de corrente não senoidal para fins de redução de custos do conversor. Além disso, o fornecimento de tensão não senoidal limita as cargas que podem ser ligadas.

Existe uma possível diferença de aplicação entre inversores fotovoltaicos híbridos e UPSs. UPSs são normalmente utilizados em tecnologia da informação e telecomunicações. Diferentemente de UPSs, inversores fotovoltaicos híbridos possivelmente serão utilizados para uso geral: residencial, rural, comercial e industrial. Por isso, deve-se considerar a utilização de cargas com elevada corrente de partida, como motores de geladeiras e ar-condicionado, e também cargas não lineares, como retificadores não controlados. Assim, a qualidade da tensão fornecida em caso de correntes de partida e cargas não lineares são questões relevantes a considerar em inversores fotovoltaicos híbridos.

Outra questão importante para a operação em modo off-grid é a proteção contra sobre-carga e curto-circuito. O inversor controla a tensão de saída, mas pode apresentar também medição e controle de corrente para desligar em caso de sobrecorrente ou curto-circuito. Uma maneira de garantir essa proteção é utilizar uma estrutura de controle com malha externa de tensão e malha interna de corrente (Deng, Oruganti, and Srinivasan 2005; Kjaer, Pedersen, and Blaabjerg 2005; Bekiarov and Emadi 2002). Dessa maneira, a corrente é limitada pela saturação da referência de controle.

### 4.3 Processo de desconexão da rede

Os critérios para desconexão da rede de um inversor híbrido devem ser os mesmos descritos nas normas NBR 16149, NBR IEC 62116 e IEC 62109-2. As duas primeiras são importantes para garantir a segurança da rede elétrica em relação ao sistema fotovoltaico. Na IEC 62109-2, o objetivo da desconexão da rede é garantir a segurança do equipamento e do usuário. Nessa norma, o inversor deve desconectar em caso de falha simples no inversor, ou falhas de isolamento no lado CC, além de avisar as falhas.

De acordo com a NBR 16149, inversores com tensão de entrada superior a 35 V ou potência superior a 1 kW devem desconectar da rede com uma chave mecânica (relés ou contatores). O inversor deve se desconectar da rede ao receber comando remoto e também em caso de injeção de componente contínua superior à 1 A, sobre/sub tensão e frequência da rede e ilhamento. O ilhamento é uma situação em que a rede está aberta, mas o inversor continua alimentando cargas de mesma potência ativa e reativa, mantendo níveis normais de tensão e frequência. Isso pode resultar em risco de choque elétrico para trabalhadores da rede. Para evitar essa situação, a NBR IEC 62116 apresenta testes em que o inversor deve ser submetido para verificar se é capaz de detectar o ilhamento e desconectar da rede.

O processo de desconexão da rede depende da topologia de inversor híbrido. Na topologia de dupla conversão (Fig. 1(b)), apenas a chave  $S_1$  é aberta, enquanto o conversor CC-CA conectado às cargas continua a operar normalmente em modo tensão, com tensão e frequência independentes da rede elétrica. Por esse motivo, não existe interrupção de fornecimento das cargas.

Nas topologias com um único conversor CC-CA (Fig. 1(c) e Fig. 1(d)), o processo de desconexão é mais complexo. A chave  $S_1$  é aberta e o conversor modifica seu modo de operação de modo corrente para modo tensão. Pode existir uma breve interrupção de fornecimento durante abertura da chave e mudança de modos de operação, tipicamente de até 10 ms para classe 3 de UPS (International Electrotechnical Commission, 1999). Durante esse processo, as variações máximas da frequência (Hz/s) e da fase (rad/s) da tensão devem ser limitadas para evitar esforços nas cargas. Cargas lineares como motores podem sofrer esforços mecânicos perigosos e sobre-corrente em caso de variações abruptas de fase e frequência. No final do processo, tensão e frequência do modo tensão do inversor devem convergir para os valores nominais (por exemplo, 220 V / 60 Hz). Destaca-se que a proteção contra corrente contínua da NBR 16149 não pode ser empregada no modo tensão, pois uns tipos de cargas podem demandar corrente CC.

### 4.4 Processo de reconexão à rede

O processo de reconexão é o fechamento da chave  $S_1$  da Fig. 1. A NBR 16149 norma estipula que o inversor pode retomar o fornecimento de energia à rede somente após 20 a 300 segundos do retorno das condições normais de tensão e frequência da rede. Esse atraso no tempo de reconexão depende das condições locais da rede.

A norma NBR 16149 afirma que esse atraso de 20 s a 300 s é para iniciar o fornecimento de energia à rede. Portanto, para um inversor híbrido, não é proibido obter energia da rede para recarregar as baterias durante esse período. Essa funcionalidade pode ser importante para aumentar a autonomia das baterias durante a noite, e pode ser implementada em qualquer topologia de inversor híbrido. Outra funcionalidade importante que não é proibida pela NBR 16149 é fechar a chave  $S_1$  das topologias da Fig. 1(c) e Fig. 1(d) para alimentar as cargas pela rede, sem que o inversor forneça energia à rede. Essa funcionalidade aumenta a autonomia das baterias durante períodos noturnos ou de baixa produção de energia fotovoltaica.

Para a topologia de dupla conversão (Fig. 1(b)), a reconexão é mais simples do que as outras duas. O conversor CC-CA conectado à rede (da esquerda) opera apenas em modo corrente, e a tensão fornecida à carga pode ser totalmente independente da rede. Assim, o inversor híbrido pode reconectar e operar como carregador de baterias ou, após o tempo de atraso, iniciar o fornecimento de energia à rede.

Para as topologias com único conversor CC-CA, a tensão fornecida à carga deve estar sincronizada com a rede antes de o inversor reconectar. Durante essa reconexão, a tensão fornecida à carga não pode apresentar degraus abruptos de fase, e a frequência da tensão deve apresentar variação limitada, a fim de evitar sobrecorrentes e esforços mecânicos em cargas como motores. A Fig. 5 apresenta um exemplo de reconexão em que, passado o tempo mínimo de reconexão, a chave  $S_1$  é fechada e a saída do inversor passa do modo tensão para o modo corrente. A Fig. 5(a) apresenta o circuito exemplificado, composto pela rede, um inversor híbrido com conversor CC-CA único, e uma carga não linear, que apresenta um retificador não controlado.

A Fig. 5(b) e a Fig. 5(e) apresentam as formas de onda do circuito simulado. Inicialmente, a rede está desligada, e o inversor opera em modo tensão, fornecendo tensão senoidal em 60 Hz para a carga. A corrente de saída do inversor é pulsada (não senoidal) devido ao retificador a diodo da carga. No instante  $t_1$ , a rede retorna dentro dos limites normais de tensão e frequência, com frequência próxima de 60,1 Hz. Contudo, apresenta fase  $180^\circ$  em relação à tensão fornecida pelo inversor. Caso o inversor reconectasse à rede nesse instante, haveria um curto-circuito entre tensão do inversor e tensão da rede, que deve ser limitado pelo controle do inversor. Monitorando da tensão da rede, a método de sincronismo do inversor (ex.: PLL) resincroniza a fase e frequência da tensão do inversor com a da rede. Logo antes do instante  $t_2$ , o tempo mínimo de fornecimento de energia à rede é atingido e a fase e frequência da rede e do inversor estão sincronizadas. No instante  $t_2$ , a chave  $S_1$  é fechada. O inversor passa a atuar em modo corrente, fornecendo à rede corrente senoidal, e a corrente pulsada da carga é fornecida pela rede. Destaca-se que não é necessário que o processo de reconexão seja realizado sempre dessa maneira. Entretanto, deve-se respeitar o atraso para fornecimento de corrente

à rede, o inversor deve operar conectado à rede apenas em modo corrente, e a variação de fase e frequência devem respeitar os limites da carga.

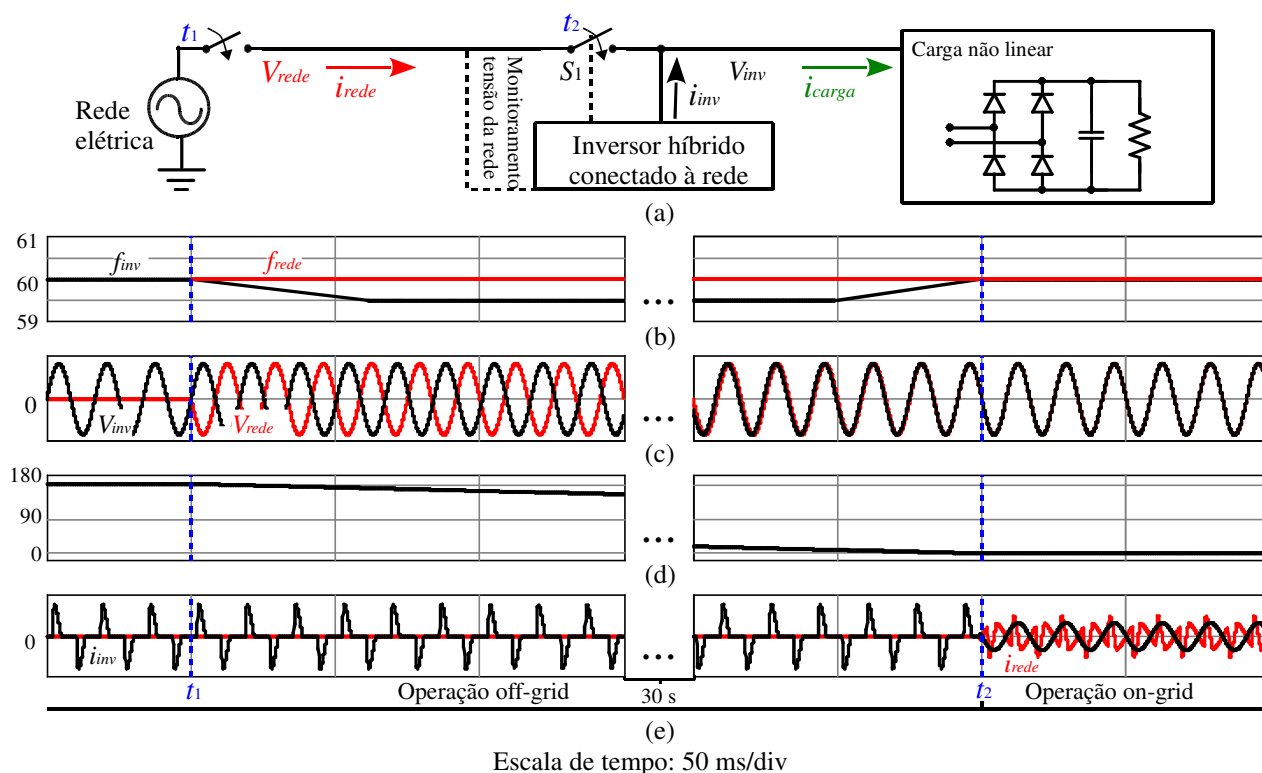


Figura 5 – Processo de reconexão à rede sem interrupção de fornecimento para carga não-linear: (a) circuito com inversor híbrido monofásico; (b) frequência do inversor (preto) e da rede (vermelho), em Hz; (c) Tensão do inversor (preto) e da rede (vermelho), sem escala; (d) fase da tensão do inversor em relação à da rede, em graus; (e) corrente do inversor (preto) e da rede (vermelho) para alimentação de carga retificada, sem escala.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs classificações e revisou modos de operação e princípios de funcionamento de inversores fotovoltaicos híbridos, que funcionam conectados à rede e apresentam armazenamento de energia. As classificações propostas consideraram as já consolidadas para UPS, pois inversores híbridos também funcionam como UPS. Os modos de operação dos conversores estáticos e seus critérios de seleção foram apresentados e discutidos. Os princípios de funcionamento dos modos conectado e desconectado da rede foram explicados, além das transições entre esses modos.

As análises realizadas propõem possíveis requisitos de inversores híbridos. A norma NBR 16149 contempla operação conectada à rede, com exceção de operação do conversor cc-ca como carregador de baterias. Já a norma de UPS IEC 62040 e limites do PRODIST podem ser empregados para operação off-grid. Entretanto, os transitórios de desconexão à rede não são contemplados nessas normas. Como exemplo, não está contemplado em norma que o inversor pode operar como carga antes do tempo mínimo para iniciar seu fornecimento de energia.

Em função das análises realizadas, conclui-se que requisitos relevantes para inversores híbridos ainda não são contemplados em normas. Por isso, é importante contemplar esses requisitos em normas específicas de inversores fotovoltaicos híbridos. Dessa forma, pode-se ter maior segurança legal para fabricantes de inversores, integradores de energia fotovoltaica e usuários para que tenham seus projetos aprovados pelas empresas distribuidoras de energia, e que os usuários tenham suas necessidades atendidas.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. NBR 5410 - Instalações Elétricas Em Baixa Tensão.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. NBR IEC 62116 - Procedimento de Ensaio de Anti-Ilhamento Para Inversores de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. NBR 16149:2013 – Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características Da Interface de Conexão Coma Rede de Distribuição.
- Azevedo, Gustavo M S, Marcelo C Cavalcanti, Francisco A S Neves, Leonardo R Limongi, Fabricio Bradaschia. 2013. A Control of Microgrid Power Converter with Smooth Transient Response during the Change of Connection

- Mode. 2013 Brazilian Power Electronics Conference, 1008–15. IEEE. doi:10.1109/COBEP.2013.6785238.
- Bekiarov, S.B., and A. Emadi, 2002. Uninterruptible Power Supplies: Classification, Operation, dynamics, and Control. APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335) 1 (c): 597–604.
- Bellinaso, Lucas Vizzotto, Leandro Michels, 2014. Metodologias de Comparação E Projeto de Inversores Para Redução Do Custo Da Energia Fotovoltaica. Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS). Recife, PE.
- Candido, Diogo B., Leandro Michels, Helio L. Hey, 2010. Integrated Control of a Stand-Alone Photovoltaic System Based on Decentralized DC-DC Converters. In 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 0:213–18. IEEE. doi:10.1109/ISIE.2010.5637580.
- Chen, C., S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, 2011. Smart Energy Management System for Optimal Microgrid Economic Operation. IET Renewable Power Generation 5 (3): 258. doi:10.1049/iet-rpg.2010.0052.
- Chiang, H.C., T.T. Ma, Y.H. Cheng, J.M. Chang, W.N. Chang, 2010. Design and Implementation of a Hybrid Regenerative Power System Combining Grid-tie and Uninterruptible Power Supply Functions. IET Renewable Power Generation 4 (1): 85. doi:10.1049/iet-rpg.2009.0033.
- Deng, Heng Deng Heng, R. Oruganti, D. Srinivasan, 2005. Modeling and Control of Single-Phase UPS Inverters: A Survey. 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems 2: 848–53. doi:10.1109/PEDS.2005.1619806.
- Duryea, S., S. Islam, W. Lawrance, 1999. A Battery Management System for Stand Alone Photovoltaic Energy Systems. Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), 4:2649–54. IEEE. doi:10.1109/IAS.1999.799211.
- Freijedo, Francisco D., Jesus Doval-Gandoy, Oscar Lopez, Carlos Martinez-Penalver, Alejandro G. Yepes, Pablo Fernandez-Comesana, Jano Malvar, Andres Nogueiras, Jorge Marcos, Alfonso Lago, 2009. Grid-Synchronization Methods for Power Converters. 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 522–29. IEEE. doi:10.1109/IECON.2009.5414976.
- Herederer-Peris, Daniel, Cristian Chillon-Anton, Marc Pages-Gimenez, Gabriel Gross, Daniel Montesinos-Miracle, 2013. Implementation of Grid-Connected To/from off-Grid Transference for Micro-Grid Inverters. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 840–45. IEEE. doi:10.1109/IECON.2013.6699243.
- International Electrotechnical Commission, 1999. Uninterruptible Power Systems (UPS) - Part 3 - Method of Specifying the Performance and Test Requirements. CEI IEC 62040-3. <http://cdsweb.cern.ch/record/1227824>.
- International Electrotechnical Commission, 2010. IEC 62109 - Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems.
- Karpati, A., Gy Zsigmond, M. Voros, M Lendvay, 2012. Uninterruptible Power Supplies (UPS) for Data Center. 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, 351–55. IEEE. doi:10.1109/SISY.2012.6339543.
- Karve, Shri. 2000. Three of a Kind. IEEE Review, no. March: 27–32. doi:10.1049/ir:20000204.
- Kjaer, S.B., J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, 2005. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Industry Applications 41 (5): 1292–1306. doi:10.1109/TIA.2005.853371.
- Koutroulis, E, K Kalaitzakis. 2004. Novel Battery Charging Regulation System for Photovoltaic Applications. IEE Proceedings - Electric Power Applications 151 (2): 191. doi:10.1049/ip-epa:20040219.
- Riffonneau, Y, S Bacha, F Barruel, S Ploix. 2011. Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV Systems With Batteries. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2 (3): 309–20. doi:10.1109/TSTE.2011.2114901.
- Schwertner, Christoffer Daniel, Lucas Vizzotto Bellinaso, Helio Leaes Hey, Leandro Michels, 2013. “Supervisory Control for Stand-Alone Photovoltaic Systems.” 2013 Brazilian Power Electronics Conference, October. Ieee, 582–88. doi:10.1109/COBEP.2013.6785174.

## **HYBRID GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTERS WITH BATTERY ENERGY STORAGE – CLASSIFICATION, OPERATION MODES AND WORKING PRINCIPLES**

**Abstract.** Hybrid photovoltaic (PV) inverters operate connected to the grid and present battery energy storage to feed priority loads in the absence of grid. Thus, they have features of conventional grid-connected PV inverters and Uninterruptible Power Supplies (UPS). The objective of this study is to present classification, operation modes and operating principles of hybrid inverters through literature review and discussion. The hybrid inverter classification were obtained based on the UPS classes described in standard IEC 62040. The operation modes are dependent on the internal static converters of the considered class. Generic criteria to select the operation modes are presented and discussed. Finally, operation principles of hybrid inverters are reviewed considering UPS and PV inverter standards. On and off-grid operations are discussed, as well as grid disconnection and reconnection procedures. The analysis shows that hybrid inverters can work as a load before finishing the minimum reconnection time describe in standard NBR 16149, so increasing battery autonomy. Also, it is highlighted that the transfer between on-grid and off-grid modes shall be soft to avoid unnecessary mechanical stress and overcurrent.

**Key words:** Solar Fotovoltaica, Otimização, Cabo CC