

# CONVERSORES FOTOVOLTAICOS MULTIFUNCIONAIS – CLASSIFICAÇÃO E REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE COM A REDE E COM AS CARGAS

Lucas V. Bellinaso<sup>1</sup>, Leandro Michels<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil  
e-mail: lucas@gepoc.ufsm.br, michels@gepoc.ufsm.com

**Resumo** – Conversores fotovoltaicos multifuncionais, comercialmente conhecidos como inversores híbridos, podem fornecer energia à rede e apresentam armazenamento de energia em baterias para alimentar cargas na ausência de rede elétrica. Estes conversores reúnem as características de inversores conectados à rede convencionais e fontes ininterruptas de energia (UPS). Este trabalho propõe classificações desses conversores e requisitos relacionados à rede e cargas. Os conversores são classificados de acordo com configurações de UPS da IEC 62040-3 e de acordo com o intervalo de interrupção durante transferências. Logo a seguir, são listados requisitos gerais que podem ser aplicados a conversores fotovoltaicos multifuncionais. Com base nas regulamentações existentes como a NBR 16149, PRODIST e IEC 62040-3, foram definidos possíveis requisitos de compatibilidade com a rede e com as cargas. Alguns conflitos entre essas normas foram encontrados, sendo propostas algumas soluções para estes casos.

**Palavras-Chave** – Classificação, Fonte Ininterrupta de Energia, Microrrede, Requisitos Técnicos, Sistemas Fotovoltaicos.

## MULTIFUNCTIONAL PHOTOVOLTAIC CONVERTERS – CLASSIFICATION AND REQUIREMENTS FOR GRID AND LOAD COMPATIBILITY

**Abstract** – Multifunctional photovoltaic converters, commercially known as hybrid inverters, can feed energy to the grid and have energy storage to feed loads when the grid is absence. Thus, they unite features of grid-tie photovoltaic inverters and uninterruptible power supplies (UPS). This study proposes classifications for these converters and requirements related to the grid and loads. The converters are classified in accordance to UPS configurations of IEC 62040-3 and interruption time during transfers. In the following, general requirements that can be applied to multifunctional photovoltaic converters are listed. Possible grid and load compatibility requirements are analyzed in detail, considering standards NBR 16149, PRODIST and IEC 62040-3. Conflicts were found between these standards, and some solutions are proposed.

---

Artigo submetido em 15/01/2016. Primeira revisão em 08/03/2016. Aceito para publicação em 30/04/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

**Keywords** – Classification, Microgrids, Photovoltaic Inverter, Technical Requirements, Uninterruptible Power Supply.

## I. INTRODUÇÃO

Inversores fotovoltaicos são a interface entre geradores fotovoltaicos (FV) e as cargas ou rede de corrente alternada [1]. São normalmente classificados em dois tipos: autônomos [2]–[4] (*off-grid*) e conectados à rede (*grid-tie*) [5]. Inversores *off-grid* operam sem a presença da rede elétrica, fornecendo energia às cargas. Normalmente utilizam baterias para alimentar as cargas quando a energia fotovoltaica é escassa. Por outro lado, inversores *grid-tie* injetam a potência gerada pelo sistema fotovoltaico diretamente na rede elétrica. Este último deve desconectar em caso de condições não nominais de tensão e frequência, faltas ou ilhamento, de acordo com os critérios das normas NBR 16149 [6] e NBR IEC 62116 [7], além de apresentarem requisitos de segurança da série IEC 62109 [8], [9]. Observa-se que os inversores *grid-tie* não contemplam a alimentação de cargas diretamente pelo sistema em casos de falta de rede elétrica.

Recentemente, conversores fotovoltaicos multifuncionais que reúnem características de ambos os inversores *grid-tie* e *off-grid* têm sido estudados [10]–[16]. Esses conversores são denominados híbridos por apresentarem uma ou mais fontes de energia além da fotovoltaica [17]. Operam em três modos relacionados à conexão com a rede e alimentação de cargas [14]: i) modo *grid-tie*, em que fornece potência à rede elétrica como inversor conectado à rede convencional; ii) modo retificador, em que funciona conectado à rede como retificador para carregar baterias pela rede elétrica; e iii) modo *off-grid*, em que fornece tensão a cargas prioritárias na ausência da rede elétrica. Nesse modo de operação, baterias ou outra fonte ininterrupta é necessária caso a carga não tolere geração fotovoltaica intermitente. Devido a esses três modos, esses conversores podem ser mais bem caracterizados não como a união de inversores conectados à rede e autônomos, mas sim como a união de inversores conectados à rede e fontes ininterruptas de energia (UPS – *Uninterruptible Power Supply*), conhecidas popularmente no Brasil como *no-breaks*.

Por ser uma tecnologia recente, normas específicas definindo os requisitos técnicos necessários a esses conversores multifuncionais ainda não foram desenvolvidas. Entretanto, normas relativas a inversores conectados à rede e UPS podem ser consideradas. Atualmente, destacam-se as normas NBR 16149, NBR IEC 62116 e IEC 62109, relativas a inversores conectados à rede, e as normas NBR 15204 [18] e da série IEC 62040, relativas a UPS [19].

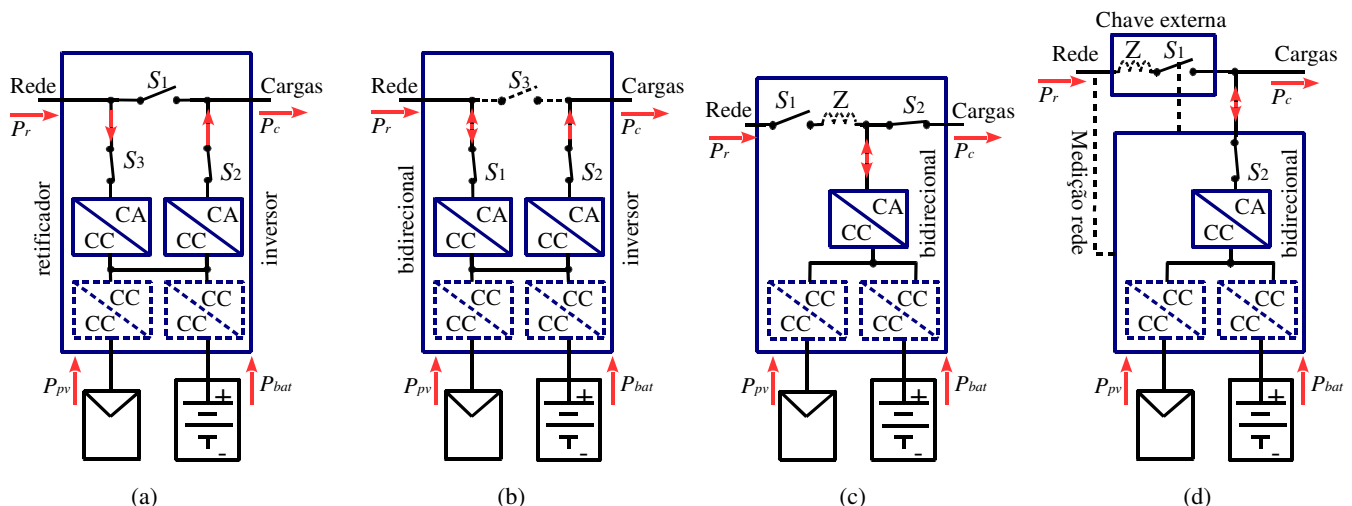


Fig. 1. Configurações de conversores fotovoltaicos multifuncionais com base na IEC 62040-3: (a) de espera passiva; (b) de dupla conversão com by-pass opcional; (c) interativa com a rede com chave de desconexão interna e impedância Z opcional; (d) interativa com a rede com chave de desconexão externa e impedância Z opcional.

A determinação dos requisitos técnicos a serem requeridos para conversores fotovoltaicos multifuncionais é necessária para projetar o equipamento, circuitos eletrônicos e os algoritmos de controle. Por esse motivo, o objetivo deste trabalho é revisar as normas e trabalhos correlatos, e assim propor e discutir requisitos técnicos aplicáveis a conversores fotovoltaicos multifuncionais. Os requisitos abordados neste trabalho são os relacionados à compatibilidade e suporte à rede, compatibilidade com as cargas e de segurança e proteção, que são os mais prioritários para projetistas de eletrônica de potência e controle.

A Seção II apresenta configurações de conversores fotovoltaicos multifuncionais baseando-se nas configurações de UPS. Na Seção III, os conversores multifuncionais são classificados de acordo com o intervalo de interrupção durante as transferências. Na Seção IV, são listados requisitos gerais aplicáveis a conversores multifuncionais. Na Seção V, requisitos de compatibilidade com a rede e cargas são propostos. Por fim, são apresentadas conclusões.

## II. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CONFIGURAÇÃO

Conversores fotovoltaicos multifuncionais podem ser classificados de uma forma similar às UPSs. A IEC 62040-3 classifica UPSs em três configurações: espera passiva (*passive stand-by*), dupla conversão (*double conversion*) e interativa com a rede (*line interactive*) [20]–[22]. A seguir são apresentadas as características de cada configuração.

### A. Espera Passiva

Nessa classe de UPS, as cargas são normalmente alimentadas pela rede e o inversor de saída (CC-CA) opera somente quando há falta da rede elétrica. A Figura 1(a) apresenta o diagrama de bloco desta classe. Na entrada, um retificador carrega as baterias com potência reduzida. Esse retificador pode ser tanto não controlado quanto controlado, sendo este último normalmente empregado para obter fator de potência elevado. Um conversor fotovoltaico multifuncional com essa configuração considera o inversor operando tanto em modo conectado à rede quanto em modo

autônomo. Durante o modo conectado à rede, a tensão e frequência da carga prioritária são impostas pela rede. Dessa forma, essa configuração é classificada como VFD (*voltage and frequency dependent*) pela IEC 62040-3.

### B. Dupla Conversão

Essa configuração de UPS apresenta dois estágios de conversão de energia, composto de um retificador conectado à rede conectado a um inversor que alimenta as cargas. Da mesma forma que na configuração de espera passiva, o retificador pode ser tanto controlado quanto não controlado. Entretanto, as cargas são alimentadas pelo inversor. Por isso, a tensão e frequência fornecida à carga são independentes da rede, e se pode garantir a qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia durante transferências entre as fontes de energia. Assim, essa configuração pertence à classe VFI da IEC 62040-3 (*voltage and frequency independent*).

Um conversor fotovoltaico multifuncional da configuração de dupla conversão é apresentado na Figura 1(b). Nesse caso, o retificador na entrada da rede também opera como inversor *grid-tie*. Por ser bidirecional, deve ser controlado para ao menos atender a normas de fornecimento de energia à rede. Uma desvantagem dessa configuração é o duplo processamento da energia que alimenta as cargas prioritárias, reduzindo a eficiência do sistema. Com o objetivo de reduzir as perdas de conversão e aumentar a confiabilidade diante de uma falha nos conversores, pode-se adicionar uma chave de by-pass ( $S_3$ ) entre entrada da rede e saída para as cargas, tal como empregado na UPS.

### C. Interativa com a Rede

Essa configuração apresenta um único conversor CC-CA bidirecional, que funciona como retificador e inversor. Conversores fotovoltaicos multifuncionais dessa configuração são apresentados na Figura 1(c) e 1(d). A tensão e a frequência das cargas são normalmente dependentes da rede (classe VFD). Porém, uma impedância Z pode ser opcionalmente adicionada em série com a chave de desconexão  $S_1$ , com até três objetivos: i) reduzir a distorção harmônica da corrente fornecida ou obtida da rede;

ii) limitar a corrente de curto circuito presumida; e iii) permitir a regulação da tensão nas cargas prioritárias, dentro de determinados limites, o que tornaria o conversor pertencente à classe VI (*voltage independent*) da IEC 62040-3.

Observa-se que duas configurações para esta classe de inversores podem ser empregadas: i) com chave de desconexão da rede ( $S_1$ ) interna, como mostrado na Figura 1(c); ou ii) com chave de desconexão da rede ( $S_1$ ) externa, como mostrado na Figura 1(d). Observa-se que para a configuração com chave de desconexão externa, é necessário que o monitoramento da rede seja realizado a montante da chave.

#### D. Análise Comparativa da Eficiência dos Conversores

Eficiência de conversores estáticos é bastante relevante para aplicações com energia fotovoltaica, pois perdas elevadas resultam em menor retorno financeiro do sistema. A eficiência das configurações de conversores fotovoltaicos multifuncionais apresentados na Figura 1 são aqui comparadas, considerando somente os conversores CC-CA.

Em modo *off-grid*, a eficiência de todas as configurações são iguais à eficiência do inversor que alimenta as cargas. Entretanto, em modo *grid-tie*, a eficiência do sistema não é diretamente obtida, sendo dependente do percentual da potência que é processada por cada conversor CC-CA.

Em modo *grid-tie*, a potência  $P_{cc}$  que o sistema fotovoltaico e baterias injetam no barramento CC é dada por:

$$P_{cc} = P_{pv}\eta_{cc,pv} + P_{bat}\eta_{cc,bat} \quad (1)$$

onde  $P_{pv}$  e  $P_{bat}$  são as potências fornecidas por essas fontes, respectivamente, e  $\eta_{cc,pv}$  e  $\eta_{cc,bat}$  são a eficiência dos respectivos conversores CC-CC. Destaca-se que estes conversores CC-CC são opcionais, sendo sua eficiência unitária estes não forem empregados.

Assim, a eficiência total do processamento de energia, considerando somente conversores CC-CA e desprezando perdas nas chaves  $S_1$  e  $S_2$ , é definida como:

$$\eta = \begin{cases} \frac{P_{cc} + P_r - P_{p,tot}}{P_{cc} + P_r} & , P_r > 0 \\ \frac{P_{cc} - P_{p,tot}}{P_{cc}} & , P_r \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

onde  $P_c$  é a potência consumida pelas cargas,  $P_r$  é potência obtida da rede, e  $P_{p,tot}$  são as perdas totais nos conversores CC-CA da configuração.

Os sentidos definidos para  $P_c$ ,  $P_r$ ,  $P_{pv}$  e  $P_{bat}$  para cada configuração são mostrados na Figura 1. Observa-se na Figura 1 que uma parcela da energia é fornecida diretamente às cargas quando  $P_r > 0$  nas configurações interativas com a rede, o que resulta nas condições distintas apresentadas em (2). Neste sentido, para o cálculo do rendimento empregando (2) é preciso particularizar o cálculo das perdas totais e da potência obtida da rede para cada configuração, como segue:

1) *Configuração espera passiva*: As perdas do conversor CC-CA são calculadas por:

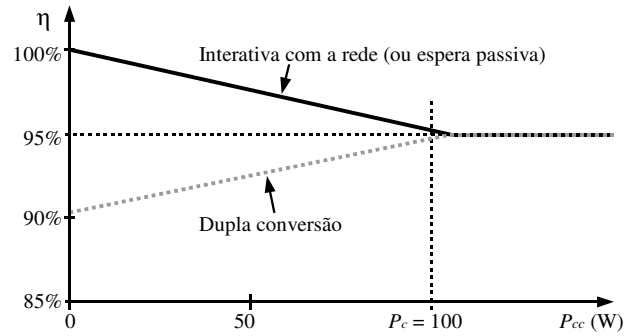


Fig. 2. Comparação da eficiência total do processamento de energia das configurações de conversores fotovoltaicos multifuncionais em função da potência injetada no barramento CC ( $P_{cc}$ ) durante operação conectada à rede.

$$P_{p,tot} = P_{cc} (1 - \eta_i) \quad (3)$$

A potência obtida ou fornecida da rede é definida por:

$$P_r = P_c - \frac{P_{cc}}{\eta_i} \quad (4)$$

2) *Configuração interativa com a rede*: Mesmas equações da configuração de espera passiva.

3) *Configuração dupla conversão*: Desconsiderando-se o uso de chave de by-pass, as perdas totais nos conversores CC-CA são dadas por:

$$P_{p,tot} = \begin{cases} \left( \frac{P_c - P_{cc}}{\eta_i} \right) \left( \frac{1 - \eta_{b,r}}{\eta_{b,r}} \right) + P_c \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} & , P_{cc} < \frac{P_c}{\eta_i} \\ \left( P_{cc} - \frac{P_c}{\eta_{b,i}} \right) (1 - \eta_{b,i}) + P_c \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} & , P_{cc} \geq \frac{P_c}{\eta_i} \end{cases} \quad (5)$$

onde  $\eta_{b,r}$  e  $\eta_{b,i}$  são as eficiência do CC-CA bidirecional operando como retificador e inversor, respectivamente.

A potência obtida ou fornecida da rede é calculada por:

$$P_r = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{b,r}} \left( \frac{P_c - P_{cc}}{\eta_i} \right) & , P_{cc} < \frac{P_c}{\eta_i} \\ \left( \frac{P_c - P_{cc}}{\eta_i} \right) \eta_{b,i} & , P_{cc} \geq \frac{P_c}{\eta_i} \end{cases} \quad (6)$$

Destaca-se que a análise apresentada é válida para conversores cuja eficiência é variável em função da potência processada, da tensão do barramento CC, entre outros, desde que seja feita a determinação correta do ponto de operação de cada conversor.

Para analisar comparativamente as configurações de conversores, é apresentado um exemplo da eficiência total do processamento de energia em função da potência injetada no barramento CC ( $P_{cc}$ ) para as configurações interativa com a rede e dupla conversão. Por simplicidade, assumiu-se que a potência consumida pelas cargas é constante ( $P_c = 100$  W),

assim como a eficiência dos conversores em função da potência ( $\eta_i = \eta_{b,r} = \eta_{b,i} = 95\%$ ). A Figura 2 apresenta o resultado obtido para as eficiência de conversão na forma de gráfico. Observa-se que a configuração interativa com a rede apresenta eficiência de 100% quando  $P_{cc} = 0$  W, pois toda a energia que alimenta as cargas provém diretamente da rede através chave  $S_1$ , cujas perdas foram desprezadas. Já a configuração de dupla conversão apresenta eficiência de  $0,95 \cdot 0,95 = 0,9025$  quando  $P_{cc} = 0$  W, pois toda a energia que alimenta as cargas é processada através de duas conversões. Entretanto, com o aumento de  $P_{cc}$  a eficiência da configuração interativa com a rede reduz-se, enquanto a de dupla conversão aumenta. Ambas tornam-se iguais à  $\eta_i$  quando  $P_{cc} \geq P_c/\eta_i$ .

Portanto, constata-se que para a análise da eficiência total da conversão de energia em conversores fotovoltaicos multifuncionais deve considerar também a curva de carga. Conclui-se que a eficiência da configuração de dupla conversão é menor em períodos noturnos, mas torna-se semelhante à eficiência da configuração interativa com a rede quando a potência fotovoltaica é elevada.

### III. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ÀS CARGAS

Este trabalho também propõe classificar conversores fotovoltaicos multifuncionais de acordo com a continuidade do fornecimento de energia às cargas durante transferências entre modos *grid-tie* e *off-grid*. A Figura 3 apresenta as classificações propostas.

#### A. Sem Interrupção

Na classe sem interrupção, o conversor apresenta elevada confiabilidade no suprimento de energia, de modo que as cargas não sejam desligadas durante a transferência entre os modos *grid-tie* e *off-grid* e vice-versa. Isso é necessário para aplicações que demandam elevada confiabilidade de fornecimento, onde qualquer interrupção no fornecimento provoca prejuízos. Cargas que atendem à norma IEC 61000-4-11 [23], com exceção da classe 1 dessa norma, suportam afundamento total da tensão durante 1 período da tensão da rede sem desligar-se, o que corresponde a 16,6 ms para frequência de 60 Hz.

As configurações de espera passiva e interativa com a rede podem apresentar interrupção de curta duração devido ao tempo não-nulo de abertura e de fechamento da chave de desconexão da rede ( $S_1$ ). Essa chave é normalmente mecânica [6] e apresenta tempos de abertura e fechamento superiores a um período da tensão da rede. Assim, para que essas configurações sejam classificadas como sem interrupção, a chave  $S_1$  deve ser rápida e um sistema de controle adequado deve ser empregado durante a transferência.

A configuração de dupla conversão sem by-pass não apresenta interrupção, pois a alimentação das cargas é independente da rede. Já quando se utiliza chave de by-pass (chave  $S_3$  da Figura 1(b)), essa chave deve ser rápida para que o período de interrupção seja desprezível. Para isso, pode-se utilizar, por exemplo, chave estática a tiristor ou chave mecânica rápida com sistema de controle adequado.

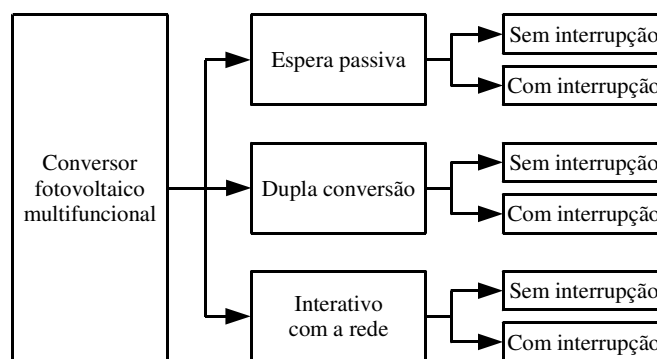


Fig. 3. Classificações de conversores fotovoltaicos multifuncionais.

Caso a chave de by-pass seja lenta, a interrupção pode tornar-se significativa, perdendo a vantagem da confiabilidade no suprimento da energia.

#### B. Com Interrupção

Na classe com interrupção, o fornecimento de tensão as cargas prioritárias é interrompido por um intervalo de tempo superior ao período no qual as cargas suportam sem desligar. De acordo com o PRODIST (módulo 8) [24], a interrupção é considerada momentânea quando inferior a 3 s, e temporária quando superior a 3 s e inferior a 3 min. Interrupções momentâneas são normalmente toleráveis em aplicações residenciais e comerciais convencionais, onde caso seja necessário a alimentação de cargas críticas são empregadas UPS de pequeno porte individuais.

Conversores fotovoltaicos multifuncionais podem apresentar interrupção momentânea do fornecimento caso a chave de desconexão da rede apresente tempos de abertura e fechamento significativos. Caso esta chave seja projetada para atender à norma NBR IEC 60957-6-1 [25], que trata de chaves de transferência entre múltiplas fontes, o período de interrupção deve ser superior a 50 ms. Caso contrário, um estudo detalhado deve ser realizado para garantir a segurança da transferência [25].

### IV. REQUISITOS APLICÁVEIS A CONVERSORES FOTOVOLTAICOS MULTIFUNCIONAL

Normas específicas aplicáveis a conversores fotovoltaicos multifuncionais ainda não foram desenvolvidas. Contudo, os requisitos de diversas normas podem ser adaptados a essa aplicação. Os principais requisitos que podem ser aplicados para conversores fotovoltaicos multifuncionais são aqui listados e descritos a seguir.

#### A. Requisitos de Desempenho

Dentre os requisitos de desempenho, pode-se destacar:

- 1) Eficiências de conversão [19], [26]–[29].
- 2) Eficiência e desempenho de algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência do sistema fotovoltaico [30], [31].
- 3) Qualidade da carga e descarga das baterias [32], [33].
- 4) Minimização de custos ou maximização de lucros: conversores fotovoltaicos multifuncionais permitem o planejamento da carga e descarga das baterias a fim de maximizar os objetivos de desempenho [34].



### B. Requisitos de Robustez e Confiabilidade

Em relação à robustez e confiabilidade do equipamento, podem-se destacar:

- 1) Vida útil [35].
- 2) Confiabilidade/disponibilidade da energia [36], [37].
- 3) Suporte a diferentes condições ambientais [19][8].
- 4) Imunidade eletromagnética [38], [39]

### C. Requisitos de Compatibilidade e Suporte à Rede

Os requisitos de compatibilidade com a rede são válidos para os modos *grid-tie* [40] e retificador, nos quais o conversor controla a corrente injetada ou obtida da rede. Os principais requisitos de compatibilidade com a rede são:

- 1) Distorção harmônica e limites de harmônicos da corrente [6], [41]–[43].
- 2) Limites de corrente contínua injetada na rede [6], [41], [42].
- 3) Limites de fator de potência e curva de fator de potência em função da tensão [6], [41], [42], [44], [45].
- 4) Cintilação (*flicker*) [6], [41], [42], [46].
- 5) Emissão eletromagnética [39], [47]–[49].

Em relação ao suporte à rede, incluem-se como requisitos de conversores multifuncionais:

- 1) Regulação da tensão da rede [50] e compensação de harmônicos.
- 2) Controle da potência ativa e reativa com objetivo de evitar instabilidades da rede elétrica, em função da tensão e frequência da rede [6], [44], [45], [51].
- 3) Controle externo para receber comandos de suporte à rede, o que demanda algum tipo de comunicação com o operador [6], [52].
- 4) Suportabilidade a subtenções decorrentes de faltas na rede (Low Voltage Ride Through – LVRT) [6], [44]

### D. Requisitos de Compatibilidade com as Cargas

Em relação à compatibilidade com a carga, os principais requisitos são:

- 1) Faixa nominal de frequência e amplitude da tensão [19], [24].
- 2) Nível contínuo máximo da tensão [19].
- 3) Limites de distorção harmônica e harmônicos da tensão [19], [24].
- 4) Emissão eletromagnética [39].
- 5) Quadrantes de operação do conversor [18].
- 6) Potência aparente nominal, corrente de pico e de sobrecarga [19].
- 7) Resposta a transitórios de carga e transferências entre modo conectado e desconectado da rede [19], [53], [54].
- 8) Continuidade de fornecimento durante transitórios, de acordo com a classificação apresentada na Seção III.

### E. Requisitos de Compatibilidade com Baterias

Os principais requisitos de compatibilidade com baterias são [55]:

- 1) Tensão de operação e limites de correntes compatíveis.
- 2) Qualidade e forma da corrente de carga e descarga [56].

- 3) Precisão e estratégia de controle de carga e descarga [57]
- 4) Necessidade ou não de comunicação com BMS (*Battery Management System*) [58], [59], se externo ao conversor multifuncional.

### F. Requisitos de Compatibilidade com o Sistema Fotovoltaico

Os principais requisitos para um inversor multifuncional ser compatível com o sistema fotovoltaico são:

- 1) Faixa de corrente e faixa de tensão nos diferentes modos de operação compatíveis com o sistema fotovoltaico.
- 2) Operação em modo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) [30], [31] e modo de limitação de potência (LPPT) [60].
- 3) Isolação galvânica da entrada fotovoltaica, ou métodos e topologias [61], [62] com redução de correntes parasitas [63], caso os módulos fotovoltaicos demandarem [64].

### H. Requisitos de Segurança e Proteção

Os requisitos relacionados à segurança e proteção são aqui divididos em: segurança da rede, proteção dos equipamentos, segurança do usuário e proteção contra falhas.

1) *Segurança da rede*: Os requisitos de segurança da rede são integrados com os de compatibilidade e suporte à rede. No Brasil, todos esses estão contemplados na NBR 16149. Os principais requisitos são listados a seguir:

- 1) Interrupção de fornecimento e desconexão da rede em caso de condições anormais de tensão ou frequência da rede [6], [41], [42].
- 2) Desconexão em caso de ilhamento [6], [7], [65].
- 3) Tempo mínimo de reconexão após retorno das condições normais da rede [6], [41].

2) *Proteção dos equipamentos*: Esses requisitos são válidos tanto para a proteção do equipamento do conversor fotovoltaico multifuncional, quanto para a proteção de outros equipamentos, como o sistema fotovoltaico, baterias e cargas.

- 1) Proteções contra sobretensão [8], [38].
- 2) Proteções contra sobrecarga e curto-circuito [19].
- 3) Proteções contra conexões indevidas.

3) *Segurança do usuário*: Os principais requisitos são:

- 1) Proteção contra choque elétrico [8], [9], [18], [19], [66].
- 2) Proteção contra temperaturas elevadas, fogo e outros perigos [8], [18], [19].

4) *Proteção contra falhas*: o equipamento deve apresentar proteção contra falhas para garantir a proteção da rede, segurança dos trabalhadores da rede, e segurança do usuário. Dessa forma, o requisito de proteção contra falhas é importante para garantir os outros requisitos de segurança e proteção. As normas IEC 62109-1 [8] e IEC 62109-2 [9] apresentam requisitos de proteção contra falha simples, ou seja, a segurança do equipamento deve ser garantida mesmo se ocorrer uma falha simples qualquer parte ou componente.

## V. PROPOSTA E DISCUSSÃO DE REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE COM REDE E CARGAS

A partir dos requisitos listados na Seção IV, aprofunda-se nesta Seção a análise nos requisitos de compatibilidade e suporte à rede, compatibilidade com as cargas, bem como alguns requisitos de segurança e proteção, que foram considerados os mais importantes para o projeto da eletrônica de potência e controle dos estágios da rede e cargas. Os requisitos foram propostos com base em normas brasileiras e, na ausência dessas, normas internacionais da IEC, da qual o Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações da ABNT é membro pleno, e cujas normas são adotadas como base para as nacionais.

Os requisitos apresentados são válidos não somente quando o conversor apresenta baterias, mas também quando puder operar nos modos conectado a rede e autônomo sem energia armazenada. Nesse caso, as cargas devem tolerar a energia fotovoltaica intermitente durante o modo autônomo, como sistemas de bombeamento de água e sistemas térmicos com elevada constante de tempo.

### A. Compatibilidade e Suporte à Rede em Modo Grid-tie

No modo *grid-tie*, o conversor deve fornecer corrente senoidal sincronizada com a tensão da rede. Nesse modo, os requisitos de um conversor multifuncional podem ser idênticos aos de um inversor fotovoltaico conectado à rede convencional, descritos na NBR 16149. Nessa norma, a regulação da tensão da rede e compensação de harmônicos não é permitida. Outros requisitos apresentados na Seção IV são obrigatórios na NBR 16149 em função da potência do inversor. Os principais requisitos dessa norma são:

- 1) Injeção de corrente contínua: não pode superar 0,5% da corrente eficaz nominal por período superior a 1 s.
- 2) Distorção harmônica da corrente injetada: inferior a 5% da corrente nominal.
- 3) Harmônicas de corrente: limites estabelecidos em tabela da NBR 16149.
- 4) Fator de potência: o mínimo, por padrão, é de 0,98 indutivo ou capacitivo. Porém, inversores de potência superior a 3 kW devem suportar a curva padrão do fator de potência apresentada na Figura 4(a). Essa curva é ativada caso a tensão da rede for superior a 104% da nominal. Inversores de 3 kW a 6 kW apresentam o limite mínimo de fator de potência de 0,95, enquanto os com potência superior a 6 kW o limite mínimo é 0,90.
- 5) Auxílio na estabilidade da rede: reduzir a potência ativa com o aumento da frequência, como ilustrado na Figura 4(b), com a finalidade de auxiliar na estabilidade da rede elétrica. A potência  $P_M$  é a potência quando o inversor ultrapassa 60,5 Hz.
- 6) Controle externo: inversores com potência superior a 6 kW devem possibilitar controle externo para desconexão da rede e controle da potência ativa e reativa.
- 7) Suporte a afundamento de tensão: inversores de potência superior a 6 kW devem suportar afundamentos momentâneos da tensão da rede (*fault ride through*) de acordo com gráfico apresentado na NBR 16149.
- 8) Desconexão por sub e sobre tensão e sub e sobre-

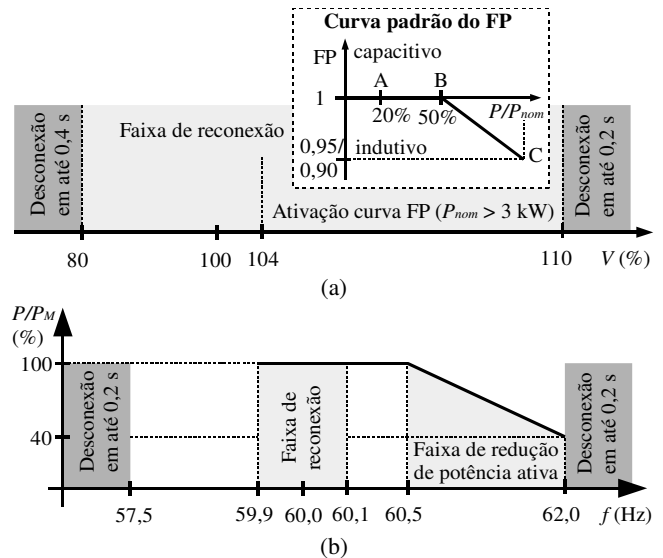


Fig. 4. Requisitos relacionados com a rede da NBR 16149: (a) em função da tensão eficaz da rede; (b) em função da frequência da rede.

frequência: apesar de serem requisitos de segurança, são também relacionados à compatibilidade com a rede. O inversor deve desconectar, ou seja, abrir as chaves  $S_1$  da Figura 1, de acordo com os requisitos da Figura 4.

- 9) Reconexão: após o retorno de condições normais da rede, de acordo com a Figura 4, o inversor deve fornecer energia à rede somente após um período de 30 s a 300 s. Esse período é especificado de acordo com as condições locais da rede.

Em relação à emissão eletromagnética, é importante que o conversor atenda à norma NBR IEC/CISPR [49] correspondente a sua aplicação, para evitar interferência em outros equipamentos do local de instalação. Porém, atualmente não existe exigência do INMETRO para aplicações relacionadas a conversores fotovoltaicos multifuncionais.

### B. Compatibilidade e Suporte à Rede em Modo Retificador

No modo retificador, o conversor multifuncional obtém energia da rede para carregar o banco de baterias. A corrente de entrada pode ser controlada para obter elevado fator de potência, ou não controlada em caso de retificador não controlado.

É importante que o inversor em modo retificador atenda às exigências da série IEC 61000-3 [43] em relação a limites de harmônicos, e apresente elevado fator de potência. Entretanto, atualmente não existem no Brasil requisitos para retificadores de uso geral. Portanto, não é necessário que o conversor atenda alguma norma específica de compatibilidade com a rede durante o modo retificador.

Os requisitos de desconexão e reconexão da NBR 16149 também não são obrigatórios para o modo retificador. Assim, algumas funções podem ser agregadas ao equipamento:

- 1) As configurações de espera passiva (Figura 1(a)) e dupla conversão (Figura 1(b)) podem operar em modo retificador mesmo quando a rede opera fora das condições padrão, fornecendo tensão nominal à carga. Isso não é permitido na configuração interativa com a

rede (Figura 1(c) e Figura 1(d)), pois a chave de desconexão da rede ( $S_1$ ) deve permanecer aberta enquanto a rede está fora das condições padrão.

- 2) A configuração interativa com a rede pode reconectar à rede em modo retificador após o retorno das condições normais de operação. Durante o período de reconexão (30 s a 300 s), pode-se ativar o modo retificador, pois a NBR 16149 não proíbe a obtenção de energia da rede durante esse período.

### C. Compatibilidade com a Carga

Durante operação autônoma, o conversor deve fornecer tensão às cargas com uma qualidade de energia mínima. Como conversores fotovoltaicos multifuncionais podem ser empregados para uso geral (iluminação, motores elétricos, cargas eletrônicas), é importante que forneça tensão senoidal com as mesmas características da tensão da rede elétrica. Os requisitos para a carga são aqui divididos em: i) qualidade da energia; ii) faixa de tensão e frequência; e iii) resposta transitória a degraus de carga e transferências.

1) *Qualidade da energia:* A IEC 62040-3 apresenta requisitos de distorção harmônica fornecida por UPSs. No Brasil, essas especificações para modo off-grid podem ser obtidas do PRODIST sem conflito com normas vigentes no Brasil. Essas especificações são dadas por:

- Distorção harmônica total da tensão: 10%
- Limites de harmônicas individuais: tabeladas no PRODIST até a 25ª harmônica.

Os limites de distorção harmônica e harmônicas individuais podem ser medidos para diferentes cargas: sem carga, com carga resistiva, carga indutiva, carga capacitiva e carga não linear [18].

O nível de tensão CC é outro requisito importante para que transformadores e máquinas elétricas funcionem adequadamente. Pode-se considerar o limite de nível de tensão CC da IEC 62040-3, que é de 0,1% da tensão eficaz nominal. Uma tensão CC superior a esse limite é admitida durante um período máximo de 10 s.

Em relação à emissão eletromagnética durante modo autônomo, não há exigência atual no Brasil. Contudo, podem-se adotar os limites das normas NBR IEC/CISPR [49] caso necessário.

2) *Faixa de tensão e frequência:* A frequência e tensão nominal que alimenta as cargas em modo *off-grid* deve ser igual à do modo *grid-tie*. Contudo, deve-se adotar uma faixa de tensão e frequência que o conversor pode operar em torno da nominal em modo *off-grid*. Limites dessas faixas podem ser obtidos no PRODIST:

- Faixa de tensão adequada: 92% a 105% da nominal.
- Faixa de frequência ideal: 59,9 Hz a 60,1 Hz. Porém, pode-se operar de 59,5 Hz a 60,5 Hz sem limite de tempo.

É importante destacar que as faixas do PRODIST são conflitantes com a NBR 16149. Os valores para desconexão da rede da NBR 16149, como ilustrados na Figura 4, são dados por:

- Faixa de tensão: 80% a 110% da nominal, que são considerados críticos no PRODIST.

- Faixa de frequência: 57,5 Hz a 62,0 Hz, em que no PRODIST é permitida a operação por um período máximo de 10 s.

A faixa de frequências da NBR 16149 pode permitir o emprego de controle *droop* para controlar a potência ativa de diversos inversores operando em paralelo em uma microrede [16]. Isso já é comercialmente empregado em conversores fotovoltaicos multifuncionais [67]. A faixa de frequências da NBR 16149 pode ser tolerada por grande parte das cargas sem danos. Portanto, a faixa de frequências da NBR 16149 pode ser adotada como padrão, permitindo o uso de *droop*.

Contudo, a larga faixa de tensão da NBR 16149 pode ocasionar queimas de cargas sensíveis conectadas às configurações de espera passiva (Figura 1(a)) e interativa com a rede sem controle de tensão (Figura 1(c) e Figura 1(d)). Consequentemente, caso sejam empregadas essas configurações de conversores multifuncionais, é necessário que as cargas prioritárias: a) sejam tolerantes à faixa de tensão da NBR 16149 sem sofrerem dano; b) sejam desligadas caso a tensão estiver fora dos limites do PRODIST; ou c) sejam alimentadas por estabilizador de tensão. Deve-se destacar que a configuração de dupla conversão (Figura 1(b)) não apresenta esses problemas, pois a tensão e frequência fornecida à carga são independentes da rede.

Para adequar o conversor à NBR 16149, propõe-se como requisitos de faixa de tensão e frequência para conversores multifuncionais:

- Operar dentro da faixa de frequências da NBR 16149, permitindo o controle *droop* de frequência. Essa faixa deve permitir o controle de potência ativa de uma microrede através de *droop* de frequência [16].
- Operar dentro da faixa de tensão adequada do PRODIST (92% a 105% da nominal) durante operação em modo off-grid em regime permanente. Essa faixa deve permitir o controle de potência reativa de inversores em paralelo operando em uma microrede através controle *droop* de tensão [16].

Em relação a transferências de modos, propõe-se:

- Para configurações de espera passiva e interativa com a rede: operar dentro dos limites de 80% a 110% somente momentaneamente durante as transferências entre modos *grid-tie* e *off-grid*.
- Para configuração de dupla conversão: operar somente dentro dos limites de tensão do PRODIST (92% a 105% da nominal).

3) *Resposta transitória a degraus de carga e transferências:* É importante que o conversor fotovoltaico multifuncional apresente resposta transitória satisfatória para evitar distúrbios de tensão prejudiciais às cargas. Transitórios podem ocorrer após degraus de carga ou transferência entre os modos conectado à rede e autônomo.

Sobretensões excessivas durante os transitórios podem causar danos às cargas, por isso devem ser sempre evitadas. Entretanto, a rejeição a subtensões ou afundamentos momentâneos de tensão é necessária somente se o conversor fotovoltaico multifuncional for da classe sem interrupção de fornecimento de tensão (Seção III-A). Se for da classe com

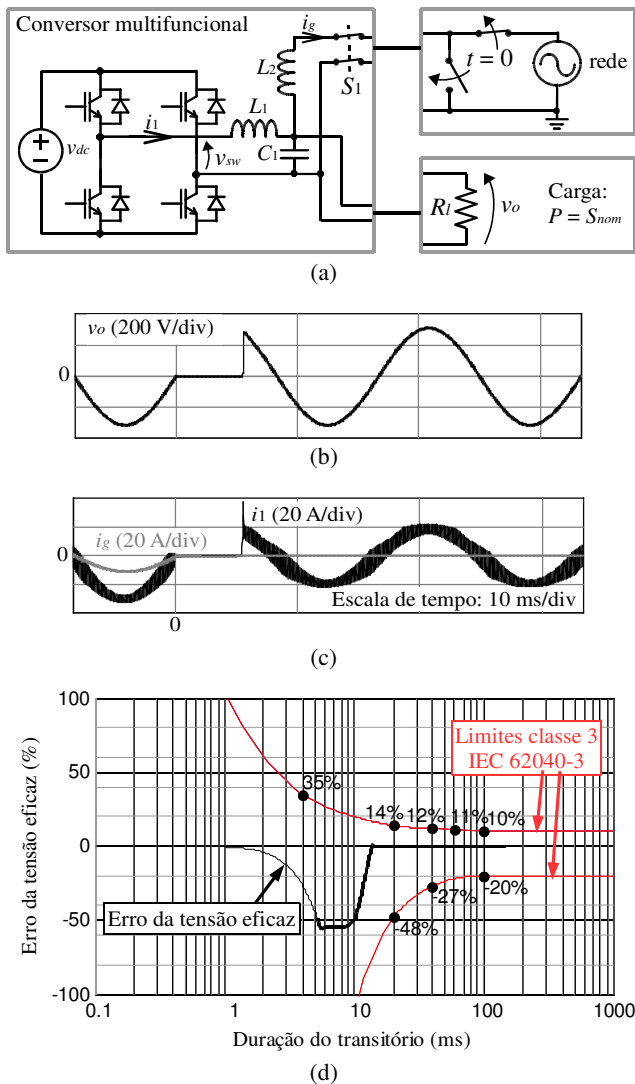


Fig. 5. Desligamento da rede no início da onda senoidal devido a falta da rede: (a) conversor e circuito empregado na simulação (b) tensão de saída; (c) corrente do indutor e da rede; (d) erro da tensão eficaz em comparação com classe 3.

interrupção (Seção III-B), afundamentos momentâneos são tolerados.

Limites de sobretensão e subtensão para respostas transitórias podem ser obtidos da IEC 62040-3 [19]. O erro da tensão eficaz medida é comparado com os limites das classes apresentados nesta norma para as condições de ensaio específicas. Mesmo sendo a menos rigorosa, a classe 3 é compatível com cargas que atendem à IEC 61000-4-11 [23], por isso pode ser adotada sem prejudicar a continuidade de alimentação das cargas.

Para comparar com os limites da norma, a tensão eficaz após o início transitório deve ser amostrada com frequência mínima de 10 kHz [68] em uma janela de meio-ciclo da rede [69]. O erro da tensão eficaz é comparado com os limites das classes de resposta transitória da IEC 62040-3.

Para demonstrar o cálculo do erro da tensão eficaz em transitórios, simulou-se o conversor multifuncional com inversor de saída em inversor de ponte completa, mostrado na Figura 5(a). As simulações foram realizadas em duas situações: sob falta na rede (Figura 5) e sob degraus de carga (Figura 6).

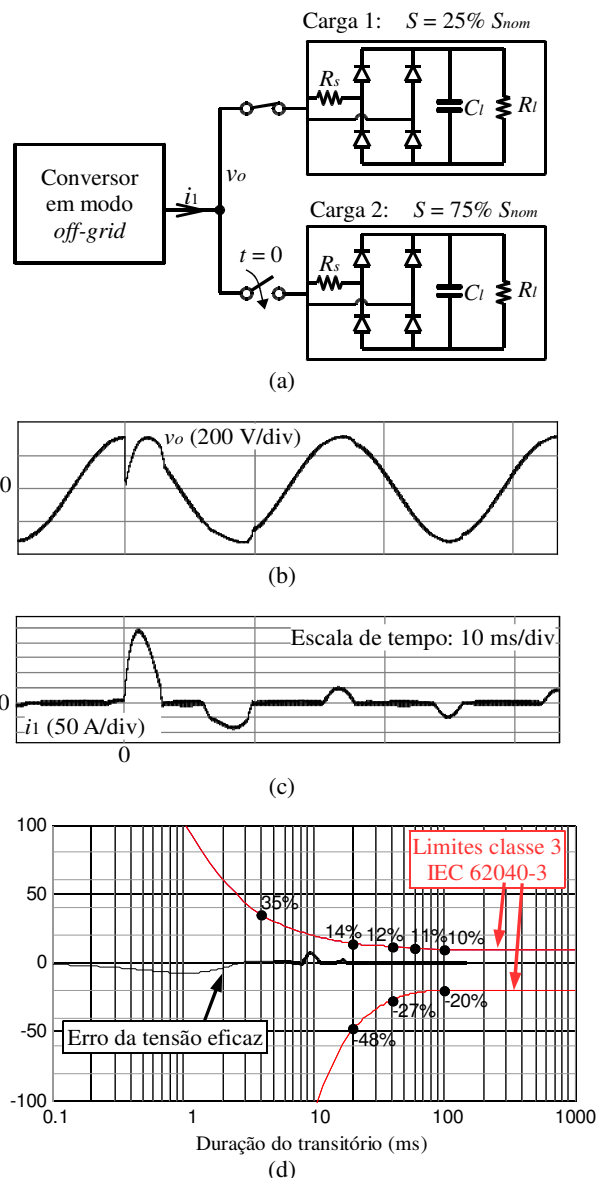


Fig. 6. Transitório de carga não-linear, de 25% para 100% da carga. Potência aparente em carga plena: 3490 VA, fator de potência 0,63. Ensaio de acordo com IEC 62040: (a) circuito de testes empregado na simulação; (b) tensão de saída; (c) corrente do indutor; (d) erro da tensão eficaz em comparação com classe 3.

Na Figura 5(a), o inversor de ponte completa opera inicialmente em modo conectado à rede, e uma falta da rede ocorre no instante  $t = 0$ . A tensão das cargas (Figura 5(b)) torna-se igual a zero. O sistema detecta a falta da rede, sai do modo *grid-tie*, anula a corrente  $i_g$  fornecida à rede (Figura 5(c)), e envia um sinal para o relé de desconexão ( $S_1$ ). Durante o tempo de 5 ms de desconexão do relé, o erro eficaz da tensão (Figura 5(d)) torna-se inferior a -50%. Após a abertura completa do relé, o inversor inicia operação em modo *off-grid* e o erro da tensão eficaz torna-se novamente próximo de zero.

A Figura 6(a) apresenta outro exemplo para um transitório de carga não-linear [18] em modo *off-grid*, com degrau de potência aparente de 25% para 100% da nominal no instante  $t = 0$ . Esse degrau é empregado para conversores com potência aparente nominal de até 4 kVA [19]. Observa-se na Figura 6(b) que, no instante  $t = 0$ , a tensão fornecida às



cargas sofre um afundamento momentâneo, pois o conversor deve fornecer uma elevada corrente de pico (Figura 6(c)) para que a capacitância do barramento CC da carga 2 seja carregada. Entretanto, como se observa na Figura 6(d), o erro da tensão eficaz reduz-se para apenas cerca de -10%. Portanto, o conversor simulado atende à IEC 62040-3 para resposta transitória a degrau de carga.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise dos conversores fotovoltaicos multifuncionais, cujo comportamento pode ser caracterizado como a união de inversores conectados à rede e fontes ininterruptas de energia. Com base nesta premissa, foram propostas configurações de conversores fotovoltaicos multifuncionais baseando-se nas já classicamente definidas para as UPS. Adicionalmente, estes conversores foram classificados de acordo com a interrupção de fornecimento de energia às cargas durante transferências entre modos conectado e isolado da rede.

Os requisitos gerais necessários para a adequada operação deste conversor foram listados, sendo a base para a proposição de requisitos relacionados à rede e às cargas. A partir desses requisitos, verificou-se que a configuração de dupla conversão oferece maior qualidade de energia às cargas do que as outras configurações. Nessa configuração, tem-se que: a) a tensão e frequência das cargas é independente da rede; b) as cargas podem ser alimentadas considerando a faixa de tensão do PRODIST, enquanto as outras configurações podem sofrer limites maiores de tensão devido aos requisitos da NBR 16149; c) é mais adequada para a classe sem interrupção de tensão, pois independe da velocidade da chave de desconexão da rede.

A eficiência total do processamento de energia para as três configurações propostas foi analisada, demonstrando que a configuração interativa com a rede e a de espera passiva apresentam eficiência superior à da configuração de dupla conversão quando a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é inferior à consumida pelas cargas. Por este motivo, acredita-se que a configuração interativa com a rede possa tornar-se a mais empregada quando as cargas tolerarem interrupções momentâneas de fornecimento de energia, uma vez que esta configuração tende a ter custo mais reduzido e maior eficiência que os da configuração de dupla conversão. Por outro lado, nas aplicações onde se deseja elevada confiabilidade e qualidade de fornecimento de energia, acredita-se a configuração de dupla conversão mostra-se a mais adequada.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (308812/2015-8).

## REFERÊNCIAS

[1] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules," *IEEE Transactions on Industrial*

*Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Setembro 2005.

- [2] H. Wang, D. Zhang, "The Stand-alone PV Generation System with Parallel Battery Charger," in *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, pp. 4450–4453, 2010.
- [3] C. D. Schwertner, L. V. Bellinaso, H. L. Hey, L. Michels, "Supervisory control for stand-alone photovoltaic systems," in *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 582–588, 2013.
- [4] L. A. de Souza Ribeiro, O. R. Saavedra, S. L. de Lima, J. G. de Matos, "Isolated Micro-Grids With Renewable Hybrid Generation: The Case of Lençóis Island," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, Setembro 2010.
- [5] B. Burger, R. Rütther, "Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature," *Solar Energy*, vol. 80, pp. 32–45, Janeiro 2006.
- [6] *Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão coma rede de distribuição*, ABNT NBR 16149. 2013.
- [7] *Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*, ABNT NBR IEC 62116, 2012.
- [8] *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 1 - General Requirements*, IEC 62109-1, 2010.
- [9] *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 2 - Particular requirements for inverters*, IEC 62109-2, 2011.
- [10] D. Heredero-Peris, C. Chillón-Anton, M. Pages-Gimenez, G. Gross, D. Montesinos-Miracle, "Implementation of grid-connected to/from off-grid transference for micro-grid inverters," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 840–845, 2013.
- [11] J.-H. Jung, E.-C. Nho, I.-D. Kim, H.-G. Kim, T.-W. Chun, N.-S. Choi, "Seamless control mode transfer of a PCS for islanding mode operation," in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, pp. 2658–2662, 2011.
- [12] C. L. Chen, Y. Wang, J. S. Lai, Y. S. Lee, D. Martin, "Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 1, pp. 6–15, Janeiro 2010.
- [13] J. M. Guerrero, "A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 10, pp. 3032–3045, Outubro 2011.
- [14] H. C. Chiang, T. T. Ma, Y. H. Cheng, J. M. Chang, W. N. Chang, "Design and implementation of a hybrid regenerative power system combining grid-tie and uninterruptible power supply functions," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 1, p. 85, Janeiro 2010.
- [15] Y. Yang, F. Blaabjerg, H. Wang, M. Simoes, "Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters," *IET Renewable Power*

- Generation, pp. 505-513, Abril 2016.
- [16] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, A. Luna, P. Rodríguez, R. Teodorescu, "Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4088–4096, Outubro 2009.
- [17] *Sistemas fotovoltaicos - classificação*, ABNT NBR 11704, 2008.
- [18] *Conversor a semiconductor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta com saída em corrente alternada (nobreak) - Segurança e desempenho*, ABNT NBR 15204, 2005.
- [19] *Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3 - Method of specifying the performance and test requirements*, IEC 62040-3, 1999.
- [20] S. Karve, "Three of a kind," *IEEE Review*, pp. 27–32, Março 2000.
- [21] S. B. Bekiarov, A. Emadi, "Uninterruptible power supplies: classification, operation, dynamics, and control," in *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 597–604, 2002.
- [22] *Conversor a semiconductor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada ( nobreak ) - Terminologia*, ABNT NBR 15014, pp. 1–5, 2004.
- [23] *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-11: Testing and measurement techniques, voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*, IEC 61000-4-11, 2004.
- [24] *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica*, ANEEL PRODIST - rev. 7, 2015.
- [25] *Dispositivos de manobra e controle de baixa tensão. Parte 6.1 - Equipamentos com funções múltiplas - Equipamentos de comutação de transferência*, ABNT NBR IEC 60947-6-1, 2015.
- [26] *Photovoltaic systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency*, IEC 61683, 1999.
- [27] Photon Laboratory, "PHOTON inverter test", 2015. [Online]. Disponível: [http://www.photon.info/upload/Inverter\\_TestInfo\\_EN\\_971.pdf](http://www.photon.info/upload/Inverter_TestInfo_EN_971.pdf).
- [28] B. Bletterie, R. Bründlinger, H. Haberlin, F. P. Baumgartner, H. Schmidt, B. Burger, G. Klein, M. Alonso-Abella, "Redefinition of the European Efficiency - Finding the Compromise Between Simpliity and Accuracy," in *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 2735–2742, 2008.
- [29] W. Bower, C. Whitaker, W. Erdman, M. Behnke, M. Fitzgerald, "Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected photovoltaic systems.", 2004. [Online]. Disponível: [http://www.energy.ca.gov/renewables/02-REN-1038/documents/2004-12-01\\_INVERTER\\_TEST.PDF](http://www.energy.ca.gov/renewables/02-REN-1038/documents/2004-12-01_INVERTER_TEST.PDF)
- [30] T. ESRAM, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Junho 2007.
- [31] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, Julho 2006.
- [32] *Secondary cells and batteries for renewable energy storage - General requirements and methos of test - Part 2 - On-grid Applications*, IEC 61427-2, 2015.
- [33] T. Kerekes, E. Koutroulis, D. Séra, R. Teodorescu, M. Katsanevakis, "An optimization method for designing large PV Plants," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 2, pp. 814–822, Abril 2013.
- [34] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 3, p. 258, Maio 2011.
- [35] E. Koutroulis, F. Blaabjerg, "Design optimization of transformerless grid-connected PV inverters including reliability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 325–335, Janeiro 2013.
- [36] A. Karpati, G. Zsigmond, M. Voros, M. Lendvay, "Uninterruptible Power Supplies (UPS) for data center," in *2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, pp. 351–355, 2012.
- [37] Z. Moradi-Shahrbabak, A. Tabesh, G. R. Yousefi, "Economical design of utility-scale photovoltaic power plants with optimum availability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3399–3406, Julho 2014.
- [38] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-1: Testing and measurement techniques - Overview of immunity tests (IEC 61000-4 series)*, IEC 61000-4-1, 2006.
- [39] *Uninterruptible power systems (UPS) - Part 2 - Electromagnetic compatibility (EMC) requirements*, IEC 62040-2, 1999.
- [40] H. H. Figueira, H. L. Hey, L. Schuch, C. Rech, L. Michels, "Brazilian grid-connected photovoltaic inverters standards: A comparison with IEC and IEEE," in *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1104–1109, 2015.
- [41] *Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface*, IEC 61727, 2004.
- [42] *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE 1547, 2003.
- [43] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, IEC 61000-3-2, 2014.
- [44] *Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica*, CEI 0-21, 2013.
- [45] *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, DIN VDE-AR-N 4105:2011-08, 2011.
- [46] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-3:*

- Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection*, IEC 61000-3-3, 2013.
- [47] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-3 - Generic standards – Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments*, IEC 61000-6-3, 2006.
- [48] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-4 - Generic standards – Emission standard for industrial environments*, IEC 61000-6-4, 2006.
- [49] *Equipamento de tecnologia da informação — Características de radioperturbação — Limites e métodos de medição*, ABNT NBR IEC/CISPR 22, 2013.
- [50] D. I. Brandao, F. P. Marafao, M. G. Simoes, J. A. Pomilio, “Considerations on the modeling and control scheme of grid connected inverter with voltage support capability,” in *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 968–973, 2013.
- [51] Sunspec Alliance, “SunSpec Specifications & Information Models”, 2016. [Online]. Disponível: <http://sunspec.org/download-sunspec-specifications/>.
- [52] California Energy Commission, California Public Utilities Commission, “Recommendations for Utility Communications with Distributed Energy Resources (DER) Systems with Smart Inverters”, 2015. [Online]. Disponível: [http://www.energy.ca.gov/electricity\\_analysis/rule21/documents/SIWG\\_Phase\\_2\\_Communications\\_Recommendations\\_for\\_CPUC.pdf](http://www.energy.ca.gov/electricity_analysis/rule21/documents/SIWG_Phase_2_Communications_Recommendations_for_CPUC.pdf)
- [53] K. Kim, D. Shin, J. Lee, J. Lee, D. Yoo, H. Kim, “A Seamless Transfer Algorithm Based on Frequency Detection with Feedforward Control Method in Distributed Generation System,” *Journal of Power Electronics*, vol. 15, no. 4, pp. 1066–1073, Julho 2015.
- [54] Z. Liu, J. Liu, Y. Zhao, “A unified control strategy for three-phase inverter in distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1176–1191, Março 2014.
- [55] *Battery charge controllers for photovoltaic systems - Performance and functioning*, IEC 62509, 2010.
- [56] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, “Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, no. 2, p. 191, Março 2004.
- [57] A. Jossen, J. Garche, D. U. Sauer, “Operation conditions of batteries in PV applications,” *Solar Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 759–769, Janeiro 2004.
- [58] S. Duryea, S. Islam, W. Lawrance, “A battery management system for stand alone photovoltaic energy systems,” in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference*, pp. 2649–2654, 1999.
- [59] J. Cao, N. Schofield, A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review,” in *IEEE Vehicle Power Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–6, 2008.
- [60] A. Urtasun, P. Sanchis, L. Marroyo, “Adaptive Voltage Control of the DC/DC Boost Stage in PV Converters With Small Input Capacitor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5038–5048, Novembro 2013.
- [61] B. Gu, J. Dominic, J. S. Lai, C. L. Chen, T. Labela, B. Chen, “High reliability and efficiency single-phase transformerless inverter for grid-connected photovoltaic systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2235–2245, Maio 2013.
- [62] S. V. Araújo, P. Zacharias, B. Sahan, “Novel grid-connected non-isolated converters for photovoltaic systems with grounded generator,” in *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 58–65, 2008.
- [63] T. Kerekes, D. Sera, L. Mathe, “Leakage current measurement in transformerless PV inverters,” in *Proceedings International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, pp. 887–892, 2012.
- [64] Advanced Energy Industries, “Understanding Potential Induced Degradation”, 2013. [Online]. Disponível: [http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White\\_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf](http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf)
- [65] M. Laour, A. Mahrane, F. Akel, D. Bendib, “Implementation of Active Anti-Islanding Methods Protection Devices for Grid Connected Photovoltaic Systems,” *International Journal of Electrical Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 89–93, Junho 2014.
- [66] *Electrical installations of buildings – Part 7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems*, IEC 60364-7-712, 2002.
- [67] SMA Solar Technology AG, “Sunny Island Generator - White Paper”, 2014. [Online]. Disponível: <http://files.sma.de/dl/7910/SIGEN-13FE0914.pdf>
- [68] *Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade*, ABNT NBR 16150, 2013.
- [69] F. Botteron, H. Pinheiro, “A three-phase UPS that complies with the standard IEC 62040-3,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2120–2136, Agosto 2007.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Lucas Vizzotto Bellinaso.** Possui graduação (2012) e mestrado em Engenharia Elétrica (2014), ambos pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde atua como professor desde 2015 no campus de Cachoeira do Sul. Foi sócio fundador da empresa Sonnen Energia em 2012. Sua principal linha de pesquisa atual está relacionada a sistemas fotovoltaicos.

**Leandro Michels.** Possui graduação (2001) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007), ambos pela UFSM. Desde 2009 atua como professor e pesquisador na UFSM, onde atua como membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Em 2011 foi Coordenador Geral do V Seminário de Eletrônica de Potência e Controle, realizado em Santa Maria, e em 2013 foi Coordenador Técnico

Adjunto do 12º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência. É Bolsista de Produtividade DT1 do CNP, já publicou mais de 70 artigos científicos, e é autor de duas patentes depositadas junto ao INPI. Atualmente é gerente técnico do Laboratório de Ensaio de Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle da UFSM. A sua principal linha de pesquisa atual está relacionada a sistemas fotovoltaicos, incluindo a análise sistêmica, os sistemas monitoramento, o desenvolvimento de topologias para conversores estáticos, e o controle digital destes conversores.