

Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos

Description and Analysis of Inverters Used in Photovoltaic Systems

Giuliano Arns Rampinelli

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Araranguá, SC

giuliano.rampinelli@ufsc.br

Arno Krenzinger

Laboratório de Energia Solar

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS

arno.krenzinger@ufrgs.br

Faustino Chenlo Romero

Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid

faustino.chenlo@ciemat.es

Resumo: Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede convertem diretamente a energia solar em energia elétrica entregando à rede elétrica de distribuição uma energia limpa e renovável. Esses sistemas são formados, basicamente, por um conjunto de módulos fotovoltaicos e inversores que são responsáveis por converterem energia elétrica em corrente contínua em energia elétrica em corrente alternada. Este trabalho apresenta um estudo de características elétricas de inversores utilizados em sistemas conectados à rede a partir de uma análise teórica e experimental. Os ensaios de inversores foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) onde foi utilizado um sistema fotovoltaico de $4,8 \text{ kW}_p$ e dez modelos de inversores de diferentes fabricantes. As características elétricas de inversores, que foram medidas e analisadas, são eficiência de conversão de corrente contínua em corrente alternada. O trabalho apresenta as curvas de eficiência dos inversores e médias ponderadas de eficiência são utilizadas como parâmetro

Recebido em 11/07/2013 - Aceito em 03/02/2014.

RECEN 15(1) p. 25-50 jan/jun 2013 DOI: 10.5935/RECEN.2013.01.02

de comparação. A análise dos resultados do comportamento de inversores amplia o conhecimento sobre o funcionamento desses equipamentos e a sua interação dinâmica com os demais componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; sistema fotovoltaico conectado à rede; inversores.

Abstract: Grid-connected photovoltaic systems directly convert solar energy into electrical energy delivering to the distribution grid a clean and renewable energy. These systems are basically formed by an array of photovoltaic modules and inverters. The inverters are responsible for converting direct current to alternating current. This paper presents a study of electrical characteristics of inverters used in grid-connected photovoltaic systems from a theoretical and experimental analysis. The inverters tests were performed at Solar Energy Laboratory at Federal University of Rio Grande do Sul where it was used a $4,8 \text{ KW}_p$ grid-connected photovoltaic system and ten inverters of different manufacturers. The inverters electrical characteristics measured and analyzed were direct current to alternating current conversion efficiency. The paper shows the efficiency curves of the inverters and average performance index are used for rating. The analysis of the behavior of the inverters improves the understanding of the operating of such equipment and their dynamic interaction with other grid-connected photovoltaic system components.

Key words: photovoltaic solar energy; grid-connected photovoltaic system; inverters.

1 Introdução

A capacidade instalada da matriz de energia elétrica brasileira é da ordem de 132 GW_p , sendo que a energia hidráulica é predominante e representa aproximadamente 65% dessa capacidade [1]. Entretanto, o Brasil possui uma extensa área não contemplada pela rede elétrica pública onde residem mais de 10 milhões de pessoas. O sistema energético convencional não tem condições estruturais para atender

essa demanda, mas o país tem diversos programas de eletrificação rural através de pequenos sistemas autônomos, nos quais predomina a tecnologia fotovoltaica [2]. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser projetados como sistemas para serem integrados a edificações suprimindo a demanda energética da mesma e entregando à rede o excesso de energia convertida [3] ou como grandes centrais que entregam à rede toda a energia convertida [4]. A análise do comportamento de instalações fotovoltaicas conectadas à rede é necessária para conhecimento e aprendizado desses sistemas a fim de desenvolver a tecnologia e torná-la uma alternativa viável no âmbito do sistema energético do país.

Este trabalho apresenta um estudo de características elétricas de inversores utilizados em sistemas conectados à rede a partir de uma análise teórica e experimental. Os ensaios de inversores foram realizados no LABSOL da UFRGS onde foi utilizado um sistema fotovoltaico de $4,8 \text{ kW}_p$ e dez modelos de inversores de diferentes fabricantes. As características elétricas de inversores, que foram medidas e analisadas, são eficiência de conversão de corrente contínua em corrente alternada. O trabalho apresenta as curvas de eficiência dos inversores e as médias ponderadas de eficiência. O principal objetivo do trabalho é ampliar o conhecimento sobre o funcionamento desses equipamentos e a sua interação dinâmica com os demais componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

2 O inversor

O inversor c.c./c.a. converte a potência em corrente contínua, proveniente do arranjo fotovoltaico em potência, em corrente alternada que, em condições normais (qualidade aceitável), será injetada na rede elétrica de distribuição de energia. O desenvolvimento da tecnologia eletrônica de potência permitiu considerável incremento na eficiência de conversão c.c./c.a., conjuntamente com um aumento de confiabilidade e redução de custos. Os inversores utilizados, atualmente, em SFCR incorporam funções de controle que influenciam no funcionamento do sistema, tais como: seguidor do ponto de máxima potência, conexão ou desconexão da rede em função das condições da mesma e da irradiância incidente sobre o arranjo, medida

de energia entre outras. Os inversores estáticos utilizam dispositivos semicondutores para efetuar a comutação e funcionam unicamente de dois modos: modo corte (*off*) e modo saturação (*on*). Por isso, o sinal alternado de saída obtido é quadrado. Um sinal quadrado pode ser convertido em um sinal senoidal mediante filtros de potência. O processo para filtrar os harmônicos mais próximos da fundamental requer grandes capacitores e bobinas que reduzem a eficiência do sistema.

O objetivo ao desenvolver inversores é obter sinais de saída com baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência, sendo que isso é possível aumentando a frequência de comutação dos semicondutores e filtrando adequadamente o sinal de saída. Uma das funções que qualquer inversor deve cumprir é a de regular o valor de saída. Essa regulação é obtida basicamente de três formas diferentes: regulando a tensão antes do inversor (conversores CC/CC), regulando a tensão no próprio inversor mediante seu sistema de controle ou regulando o sinal do inversor mediante um autotransformador [5].

2.1 Tipos e características dos dispositivos semicondutores de potência

Existem vários tipos de dispositivos semicondutores de potência capazes de realizar a conversão de potência contínua em potência alternada. Basicamente, os inversores podem ser classificados em dois tipos segundo seus elementos de chaveamento: os tirístores ou os transístores. Os tirístores são aqueles componentes semicondutores com dois estados estáveis cujo funcionamento está baseado na realimentação regenerativa de uma junção PNPN. Existem vários tipos de tirístores, sendo que os mais utilizados são: o retificador controlado de silício (SCR) e o tiristor com bloqueio por porta GTO (*Gate Turn-Off Switch*). Os transístores são dispositivos semicondutores baseados na junção PNP ou NPN, com capacidade para trabalhar em três zonas: corte, saturação e ativa. Existem diversos tipos de transístores dependendo da classe de semicondutor empregado em sua fabricação, da técnica de fabricação e do desenho construtivo [5].

2.2 Modo de comutação de inversores

Os inversores utilizados atualmente em aplicações fotovoltaicas, quanto ao modo

comutação, podem ser divididos em duas categorias: autocomutados e comutados pela rede. Os inversores autocomutados podem funcionar como fonte de tensão e fonte de corrente enquanto que os inversores comutados pela rede somente como fonte de corrente. Os inversores autocomutados podem ser utilizados em aplicações fotovoltaicas isoladas da rede ou conectados à rede, enquanto que os inversores comutados pela rede somente podem ser utilizados em aplicações conectadas à rede [5]. A figura 1 apresenta a classificação de inversores por princípio de operação.



Figura 1. Classificação de inversores por princípio de operação [6].

Nos inversores autocomutados, os elementos de chaveamento são semicondutores que podem ser postos em condução ou em corte em qualquer instante do ciclo por meio de um terminal de controle. Os inversores autocomutados podem operar independentemente, sendo ativados unicamente por uma fonte de potência na entrada. Esse tipo de inversor pode ser conectado à rede já que é capaz de sincronizar sua tensão alternada de saída com a tensão da rede elétrica. Esses dispositivos operam em PWM (*Pulse Width Modulation* ou modulação por largura de pulso) e normalmente comutam em alta frequência sendo que o sinal de saída é senoidal, de baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência. Os inversores comutados pela rede são pontes retificadoras baseados em tirístores e só podem funcionar quando a tensão alternada da rede está presente. Esses inversores operam normalmente com baixo fator de potência e apresentam um alto nível de distorção harmônica em seu sinal de saída. A partir do surgimento de novos dispositivos de chaveamento, a utilização de

inversores a tiristor foi sendo reduzida e hoje é restrita a unidades de potência muito alta (acima de 100 kW) [7].

2.3 Configuração dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Quanto à configuração, existem quatro tipos de ligação de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede [8, 9].

2.3.1 Inversor central

Os inversores centrais são comumente utilizados em sistemas fotovoltaicos com potências entre 20 e 400 kW. O inversor é conectado a um conjunto de painéis fotovoltaicos associados em paralelo, ou seja, a conversão é centralizada em um único inversor. A principal vantagem dessa configuração é a redução de custos enquanto a desvantagem está na confiabilidade, onde no caso de falhas do mesmo, toda a instalação fica comprometida. Essa configuração também não permite que o sistema de busca do PMP (ponto de máxima potência) seja independente para cada série de módulos. A figura 2 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor central, onde é representado o conjunto de módulos fotovoltaicos, os diodos de bloqueio de cada string, o inversor e a rede elétrica.

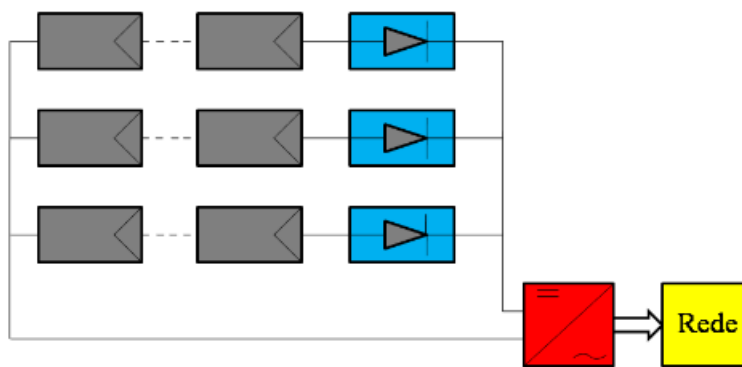


Figura 2. Configuração de um SFCR com inversor central.

2.3.2 Inversor *string*

Os inversores *strings* são conectados diretamente a painéis fotovoltaicos, ou seja, cada fileira de módulos fotovoltaicos é conectada a um inversor. A figura 3 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversores *string*, onde estão representados módulos fotovoltaicos, inversores e a rede elétrica.

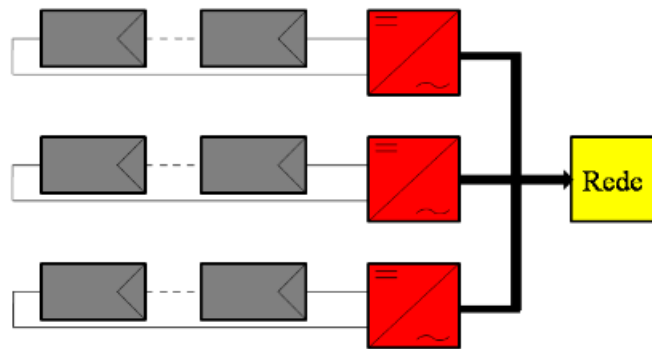


Figura 3. Configuração de um SFCR com inversores *string*.

Essa configuração reduz acoplamentos defeituosos, diminui as perdas ocasionadas por sombreamento e evita as perdas nos diodos de bloqueio. Essas vantagens implicam aumento da eficiência energética e da confiabilidade do sistema. A desvantagem é o aumento dos custos, uma vez que é necessário um maior número de inversores de menor potência.

2.3.3 Inversor *multi-string*

Os inversores *multi-string* são indicados para sistemas que têm vários painéis ou arranjos com diferentes orientações e, conseqüentemente, submetidos a diferentes condições de irradiância e temperatura. Cada painel ou arranjo está ligado a um conversor c.c./c.c. que tem a finalidade de polarizar o painel ou arranjo em seu ponto de máxima potência (PMP). Essa função é realizada pelo seguidor do ponto de máxima potência (SPMP).

Um inversor c.c./c.a. centralizado que é capaz de suportar cargas assimétricas é responsável por fazer a conversão da corrente contínua em corrente alternada. A

figura 4 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor *multi-string*.

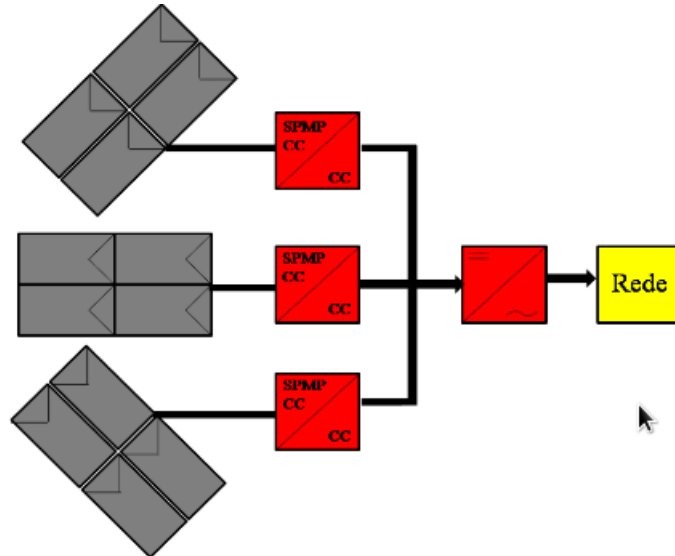


Figura 4. Configuração de um SFCR com inversor *multi-string*.

2.3.4 Inversor com módulo integrado ou módulo c.a.

Os inversores com módulos integrados apresentam um único módulo conectado à sua entrada. Essa configuração não produz nenhum tipo de perda por associação de módulos e foi empregada em sistemas de baixas potências nos anos 90. Entretanto, a eficiência de conversão daqueles inversores era menor, os custos de instalação eram elevados e a confiabilidade e vida útil eram menores em comparação aos inversores de maiores potências. Além disso, quando a potência das instalações fotovoltaicas tornou-se cada vez maior, esses inversores praticamente desapareceram do mercado.

Uma nova geração de microinversores que apresenta maiores eficiências, confiabilidade e vida útil ressurgem no mercado, entretanto ainda é prematuro afirmar que essa nova geração conquistará uma parcela importante do mercado [10]. A figura 5 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor com módulo integrado. Cada módulo fotovoltaico tem integrado um inversor c.c./c.a. que é responsável por polarizar o módulo em seu ponto de máxima potên-

cia, dadas as condições de irradiância e temperatura do módulo, e converter corrente contínua em corrente alternada para que esta seja injetada na rede elétrica.

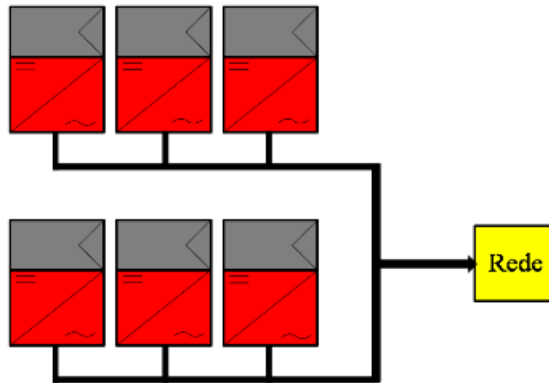


Figura 5. Configuração de um SFCR com inversor integrado ao módulo.

2.4 Inversores monofásicos e trifásicos

Historicamente, os sistemas fotovoltaicos, isolados da rede ou conectados à rede, de pequenas potências utilizam inversores monofásicos. Entretanto, em aplicações conectadas à rede, os inversores monofásicos, por injetarem corrente em uma única fase da rede, produzem desequilíbrio entre as fases. Por motivo de estabilidade é possível conectar uma potência máxima de 4,6 kW, com 10% de tolerância, em uma fase para evitar maior assimetria entre as fases da rede elétrica [11].

Para potências maiores que 5 kW, são necessários vários inversores monofásicos para garantir uma distribuição simétrica entre as três fases da rede [11]. Para plantas fotovoltaicas de potências superiores a 5 kW, é conveniente a utilização de inversores trifásicos, uma vez que o número de inversores da instalação e, conseqüentemente, os custos podem ser reduzidos. A utilização de inversores monofásicos ou bifásicos no sistema trifásico é simples, mas requer cuidados especiais quanto ao balanceamento entre as fases. Alguns fabricantes de inversores defendem que a utilização de várias combinações arranjo-inversor descentralizadas para a conexão à rede é mais simples que combinar um único arranjo de módulos fotovoltaicos conectado a um inversor central.

2.5 Inversores com ou sem transformador

Os inversores utilizados em SFCR apresentam diferentes circuitos de conversão de energia e opções de transformadores, sendo que, comercialmente, existem inversores com transformador de alta ou baixa frequência e inversores sem transformador. Cada topologia possui características próprias, implicando vantagens e desvantagens umas em relação às outras [12-14]. Por medida de segurança, os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede eram projetados para trabalharem em baixas tensões e, portanto, transformadores na saída de inversores eram necessários. No entanto, os transformadores além de pesados e caros, sempre foram um obstáculo para os fabricantes conseguirem aumentar a eficiência de seus equipamentos.

Atualmente, as plantas fotovoltaicas trabalham com tensões maiores e os inversores sem transformador conquistaram espaço no mercado, apresentando eficiências maiores que os inversores com transformador. Desde 2007, o laboratório da *Photon* realiza regularmente ensaios elétricos de inversores de diferentes fabricantes e modelos e as maiores eficiências foram obtidas por inversores que trabalham sem transformador [11]. A utilização de inversores sem transformador depende da regulamentação vigente no país onde se projeta instalar a planta fotovoltaica. Essa regulamentação pode exigir separação galvânica entre o lado de corrente contínua e alternada. Além disso, determinados módulos cristalinos, como os módulos de alto rendimento, necessitam de uma ligação à terra, do gerador fotovoltaico com elevada resistência e, sem separação galvânica, seria produzido um curto circuito. Em módulos de filmes finos, em muitos casos, são necessários inversores com transformador, uma vez que, sem separação galvânica, surge um potencial capaz de provocar, nesses módulos, uma corrosão elétrica, danificando suas células [11]. Os fabricantes já estão buscando soluções para adequar os inversores sem transformador a estes módulos [15].

2.6 Eficiência de conversão de corrente contínua em corrente alternada

A eficiência de conversão c.c./c.a. do inversor (Equação 1) é definida como a razão entre a energia elétrica na saída do inversor e a energia na entrada do inversor [16].

$$inv = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{P_{CA} \cdot dt}{P_{CC} \cdot dt} = \frac{P_{CA} \cdot dt}{P_{CC} \cdot dt + P_p \cdot dt} \quad (1)$$

em que: ECA é a energia elétrica em corrente alternada entregue à rede; ECC é a energia elétrica em corrente contínua na entrada do inversor; PCA é a potência elétrica entregue à rede; PCC é a potência elétrica na entrada do inversor; PP representa a perda no processo de conversão.

A eficiência c.c./c.a. de inversores não tem um valor constante, apresentando uma dependência em relação ao nível de carregamento, o qual varia continuamente conforme as variações de irradiância e temperatura às quais o gerador fotovoltaico está submetido. A eficiência também é influenciada pela tensão CC de entrada [17]. As perdas em inversores podem ser divididas em duas categorias principais: perdas por chaveamento e perdas por condução. Ambas são dependentes das características dos dispositivos semicondutores utilizados pelos inversores como elementos de chaveamento e, também, da topologia do conversor, da frequência de operação e do tipo de carga [6]. O desenvolvimento de dispositivos semicondutores com novos materiais e novas tecnologias de fabricação é um caminho promissor para a diminuição de perdas e aumento da eficiência dos inversores. Os catálogos de inversores produzidos na Europa para conexão à rede comumente apresentam a eficiência máxima e a eficiência europeia que é definida a partir de uma ponderação da eficiência do inversor para diferentes potências (Equação 2). De maneira similar o programa de energia solar da Comissão Californiana de Energia (*California Energy Commission*) também tem definida uma eficiência ponderada denominada de eficiência californiana (Equação 3), mas com diferentes ponderações.

$$EU = (0,03 \cdot 5\%) + (0,06 \cdot 10\%) + (0,13 \cdot 20\%) + (0,1 \cdot 30\%) + (0,48 \cdot 50\%) + (0,2 \cdot 100\%) \quad (2)$$

$$CA = (0,04 \cdot 10\%) + (0,05 \cdot 20\%) + (0,12 \cdot 30\%) + (0,21 \cdot 50\%) + (0,53 \cdot 75\%) + (0,05 \cdot 100\%) \quad (3)$$

em que: 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% são os valores de eficiência de

conversão, respectivamente a 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal do inversor.

2.7 Compatibilidade entre arranjo e inversor

A potência do inversor e a potência do arranjo fotovoltaico devem apresentar compatibilidade a fim de evitar o sobre dimensionamento ou sub dimensionamento do sistema, que implicam perdas energéticas. O dimensionamento da potência do inversor inferior à potência do arranjo fotovoltaico, usualmente, conduz a um melhor funcionamento do sistema, principalmente em climas com pouca irradiação, nas quais a duração dos valores de pico da radiação solar é curta e, dessa forma, o limite máximo do inversor é pouco utilizado [18, 19]. A eficiência, fator de potência, e os níveis de distorção harmônica de corrente do inversor variam de acordo com a carga e são tipicamente menos adequados quando operam abaixo de 50% da potência nominal.

A diferença entre a potência nominal do arranjo fotovoltaico e a potência do mesmo em condição de operação que, frequentemente, distanciam-se da condição padrão (1000 W/m², 25 °C e AM 1,5), torna-se argumento para o aumento da potência do arranjo fotovoltaico com relação a potência do inversor [20]. A relação entre a potência do arranjo e a potência do inversor é denominada de Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI). A otimização do FDI, para uma dada localidade, tem sido tema de diversos trabalhos. O Fator de Dimensionamento do Inversor é definido como a razão entre a potência nominal em corrente alternada do inversor e a potência do arranjo fotovoltaico na condição padrão, como mostra a Equação 4.

$$FDI = \frac{P_{NCA}}{P_{STD}} \quad (4)$$

em que: FDI é o fator de dimensionamento de inversor; P_{NCA} é a potência nominal em corrente alternada do inversor; P_{STD} é a potência do arranjo fotovoltaico na condição padrão.

A localização onde será instalado o sistema fotovoltaico conectado à rede determina o FDI mais adequado para a instalação. Para localidades do norte, centro e sul

da Europa, tem-se proposto, respectivamente, os seguintes índices de FDI: (0,65-0,8), (0,75-0,9) e (0,85-1) [20]. Resultados experimentais para Portugal e Holanda indicam que o inversor pode ser sub dimensionado em, pelo menos 67% e 65% da potência nominal do arranjo fotovoltaico, respectivamente, sem qualquer perda de energia significativa [21]. A otimização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, obtém-se com índices de FDI inferiores a 0,9 para a região sul e sudeste [22, 23] e com índices de FDI entre 0,9 e 1 para regiões de baixas latitudes. O fator de dimensionamento do inversor é tema de estudo de muitos trabalhos científicos [24-26].

2.8 Estado atual dos inversores

Atualmente, a maioria dos inversores utilizados em plantas fotovoltaicas instaladas na União Europeia são inversores de baixa potência PWM com alta frequência de comutação, tanto para aplicações autônomas como para aplicações conectadas à rede [5]. Esses inversores apresentam alto fator de potência e baixa distorção harmônica. Para sistemas de médias e altas potências estão sendo utilizados inversores PWM capazes de comutar a frequências de 1 kHz [5].

Os inversores utilizados em aplicações conectadas à rede incorporam eficientes seguidores do ponto de máxima potência, detectores de operação em ilhamento, operam com eficiência de conversão acima de 94% sincronizando-se com a rede de forma automática e apresentando baixo nível de harmônicos e fator de potência próximo da unidade. Em resumo, para altas potências, os inversores mais utilizados são de baixa frequência de comutação, baseados em tirístores enquanto que para médias baixas potências os inversores mais utilizados são baseados em transístores admitindo frequências de comutação mais altas [5]. Quanto à segurança, é importante que os inversores desconectem-se da rede elétrica quando esta for desligada a fim de evitar acidentes. O fenômeno denominado ilhamento (formação de ilhas) pode oferecer riscos aos operadores da rede, uma vez que a mesma poderá permanecer energizada. Por essa razão, exige-se isolamento galvânico, obtido com o uso de transformadores na saída dos inversores. Os vários regulamentos dos países da União Europeia não permitem que sejam conectados inversores à rede sem algum tipo de isolamento galvânico [5].

Para prevenção de operação ilhada devem ser utilizados diferentes métodos de monitoramento de parâmetros como: tensão, frequência e impedância da rede, harmônicos e variações de potência. Além disso, é importante considerar outras questões relativas à segurança como: isolamento e aterramento do sistema, instalação de para-raios, fusíveis, disjuntores entre outros. Quando a concessionária local exigir o isolamento galvânico entre as partes CC e CA, haverá necessidade de utilização de um transformador externo. Entretanto, se o SFCR utiliza inversores com transformador de isolamento interno, o transformador externo somente será necessário se a tensão CA da rede elétrica local for incompatível com a saída CA do inversor. Inúmeros trabalhos alertam para a necessidade de prevenção de operação ilhada e propõem algum tipo de método ou algoritmo para evitar a formação de ilhas [27-29].

Quanto à qualidade, o sistema deve injetar uma energia de qualidade na rede elétrica. Um problema de qualidade de energia pode ser definido como qualquer problema de ordem elétrica que se manifesta em perturbações de tensão, corrente ou frequência ocasionando danos ou operação incorreta do equipamento do usuário. A qualidade da energia é avaliada a partir de certos parâmetros que devem apresentar níveis que são estipulados pela concessionária. Esses parâmetros são baixo conteúdo de harmônicos, forma de onda senoidal com frequência de 60 Hz, no caso brasileiro, e alto fator de potência. A falha ou defeito na rede não deve resultar em danos ao sistema fotovoltaico conectado à rede, sendo que os equipamentos devem garantir uma desconexão segura do sistema. De maneira similar, uma falha ou defeito no sistema deve ser identificado pelo equipamento de proteção e não deve afetar outros consumidores do sistema elétrico. O impacto e a qualidade da energia elétrica injetada na rede elétrica de distribuição é tema de diversos trabalhos que abordam, principalmente, as características elétricas dos inversores utilizados em SFCR de distorção harmônica e fator de potência [30, 31].

Também se destacam iniciativas como a resolução normativa 482/2012, da ANEEL, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração (potências menores ou iguais a 100 kW) e minigeração (potências maiores que 100 kW e menores ou iguais a 1 MW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Diversas distribuidoras de energia elétrica, recentemente, disponibilizaram manuais de procedimentos

estabelecendo a regulamentação e requisitos necessários para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico das empresas. Outro marco importante que deve ser destacado é o programa brasileiro de etiquetagem de módulos fotovoltaicos e inversores do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). A Portaria nº 004, de 4 de janeiro de 2011, aprovou a revisão dos requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica.

3 Metodologia experimental

Os principais parâmetros elétricos de inversores para conexão à rede são: eficiência de conversão c.c./c.a., eficiência do SPMP, fator de potência e distorção harmônica [32]. Este trabalho adota o modelo matemático de Jantsch et al[33]., para descrição da eficiência de conversão c.c./c.a. (Equação 5) de inversores, que considera a eficiência como função da potência relativa.

$$inv = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + (K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 (\frac{P_{CA}}{P_{NOM}})^2)} \quad (5)$$

em que: K_0, K_1 e K_2 são parâmetros do modelo matemático; P_{NOM} é a potência nominal do inversor; P_{CA} é a potência na saída do inversor.

Os ensaios de inversores foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para os ensaios de inversores, foram utilizados dez modelos diferentes de inversores, sendo cinco de tecnologia SMA, três de tecnologia Fronius e dois de tecnologia Mastervolt e foi montada uma bancada de testes, composta por um analisador de potência (Fluke 434) e um computador para a aquisição de dados. O equipamento Fluke 434 é um analisador de qualidade de energia trifásica. O equipamento está em conformidade com a diretiva de compatibilidade eletromagnética 89/336/EEC, diretiva de baixa tensão 2006/95/EC, IEC/EN61010-1-2001 e IEC/EN61326-2002, que são normas sobre requisitos de segurança para equipamentos elétricos destinados a medição, controle e uso em laboratório [34].

A figura 6 apresenta o diagrama esquemático das conexões de entrada do dispo-

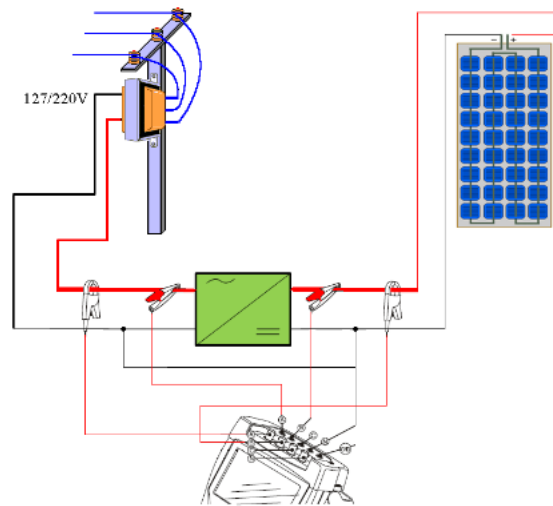


Figura 6. Diagrama esquemático das conexões de entrada do Fluke 434.

Tabela 1. Características técnicas dos inversores que foram ensaiados no LAB-SOL/UFRGS [35].

Fabricante	Modelo	P_{CC} (kW)	P_{CA} (kW)	V_{CC} Máx.	Topologia (Transformador)
SMA	SB 700U	0,780	0,700	250	Baixa frequência
SMA	SB 1100E	1,100	1,000	400	Baixa frequência
SMA	SB 2100	2,000	1,900	600	Baixa frequência
SMA	SB 2500	2,480	2,300	600	Baixa frequência
SMA	SB 3800U	4,040	3,800	500	Baixa frequência
Fronius	IG 15	1,400	1,300	500	Alta frequência
Fronius	IG 20	1,940	1,800	500	Alta frequência
Fronius	IG 30	2,690	2,500	500	Alta frequência
Mastervolt	QS 2000	1,700	1,600	450	Alta frequência
Mastervolt	QS 3200	2,750	2,600	450	Alta frequência

sitivo. O equipamento de medição é conectado na entrada do inversor, onde são medidos dados de corrente contínua, e na saída do inversor, onde são medidos dados de corrente alternada. A irradiância e a temperatura do conjunto de módulos e a temperatura ambiente também são monitorados.

A tabela 1 apresenta as principais características técnicas dos inversores utilizados nos ensaios desenvolvidos no LABSOL/UFRGS [35].

4 Ensaios elétricos de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos

A eficiência de conversão c.c./c.a. é dependente principalmente do nível de carregamento do inversor, ou seja, da potência que está operando o inversor em um dado instante. A tensão CC de entrada também afeta a eficiência de conversão c.c./c.a. do inversor, embora essa seja uma dependência muitas vezes desconsiderada. Inicialmente, a eficiência de conversão c.c./c.a. também poderia ter uma dependência com a temperatura, embora seja recomendável desconsiderar essa dependência. Testes de laboratórios realizados nos laboratórios da Sandia (*Sandia National Laboratories*) mostram que a eficiência de conversão c.c./c.a. não tem dependência considerável com a temperatura [36]. Um modelo matemático para o comportamento da eficiência c.c./c.a. de inversores que considera a influência do nível de carregamento e da tensão CC de entrada é apresentado em Rampinelli[17].

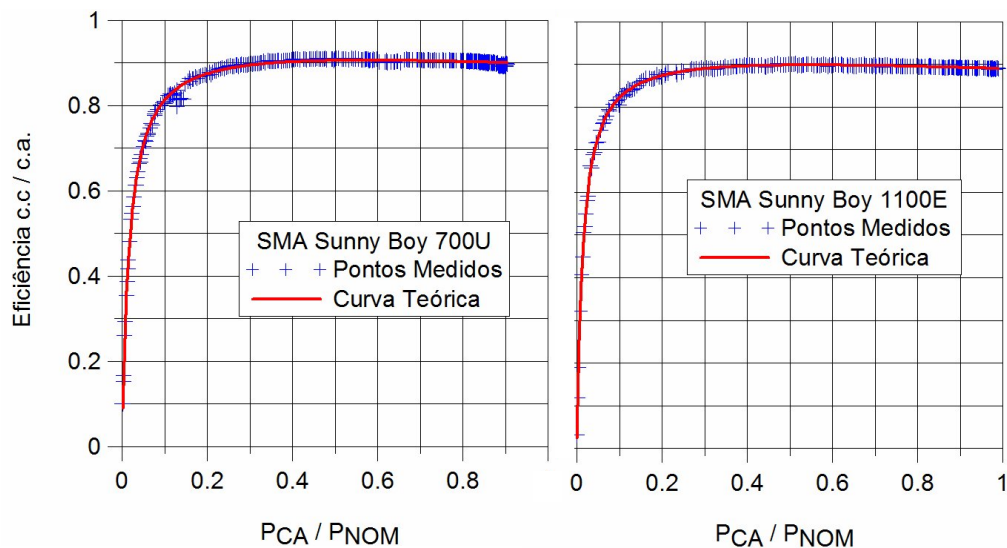


Figura 7. Curva de eficiência de conversão c.c./c.a. dos inversores SMA Sunny Boy 700U e SMA Sunny Boy 1100E..

A eficiência é medida em toda faixa de potência admissível pelo inversor resultando em uma curva de eficiência em função da potência relativa. A figura 7 apresenta a curva de eficiência de conversão c.c./c.a. medida dos inversores SMA Sunny

Boy 700U e *SMA Sunny Boy 1100E* e o ajuste da curva descrita pelo modelo matemático teórico e a figura 8 apresenta a curva de eficiência de conversão c.c./c.a. obtida a partir dos pontos medidos dos inversores *SMA Sunny Boy 2100* e *SMA Sunny Boy 2500* e a curva teórica.

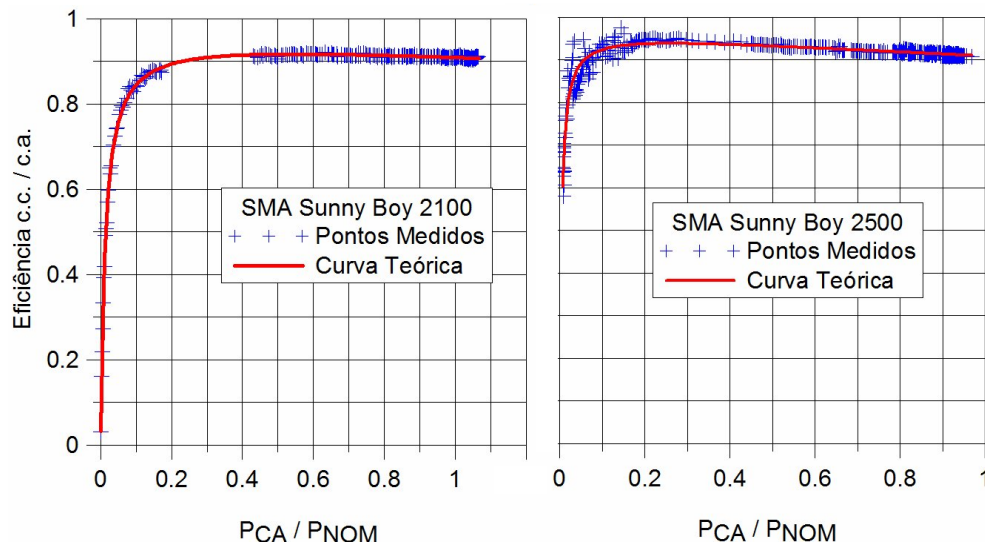


Figura 8. Curva de eficiência de conversão c.c./c.a. dos inversores *SMA Sunny Boy 2100* e *SMA Sunny Boy 2500*.

A figura 9 apresenta a curva de eficiência de conversão c.c./c.a. obtida a partir dos pontos medidos e a curva teórica dos inversores *SMA Sunny Boy 3800U* e *Fronius IG 30* e a figura 10 apresenta as mesmas curvas dos inversores *Fronius IG 15* e *Fronius IG 20*.

Finalmente, a figura 11 apresenta as curvas de eficiência medida e teórica dos inversores *Mastervolt Sunmaster QS 2000* e *Mastervolt Sunmaster QS 3200*.

Em geral, a partir de 30% da potência nominal, a eficiência de conversão c.c./c.a. já é da ordem de 90% e os máximos valores de eficiência são obtidos em potências relativas entre 0,5 e 0,8, com exceção do inversor *SMA Sunny Boy 2500* que apresenta sua máxima eficiência em níveis de carregamento da ordem de 30%. A eficiência diminui para potências menores, pois todos os equipamentos têm um consumo elétrico mínimo, cuja proporção com a potência convertida aumenta para baixas potências.

A tabela 2 apresenta a eficiência dos inversores ensaiados para cada valor de po-

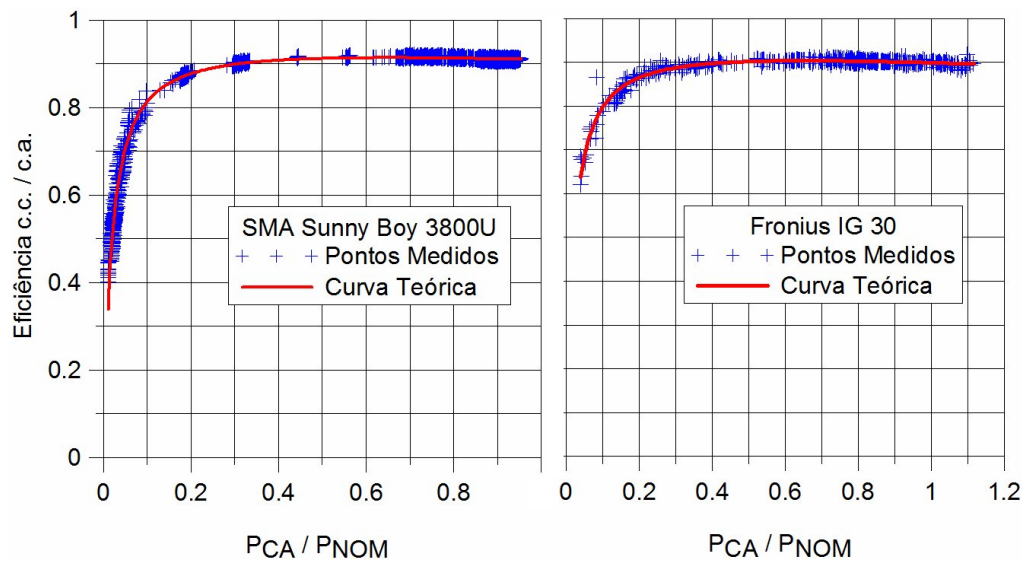


Figura 9. Curva de eficiência de conversão c.c./c.a. dos inversores SMA Sunny Boy 3800U e Fronius IG 30.

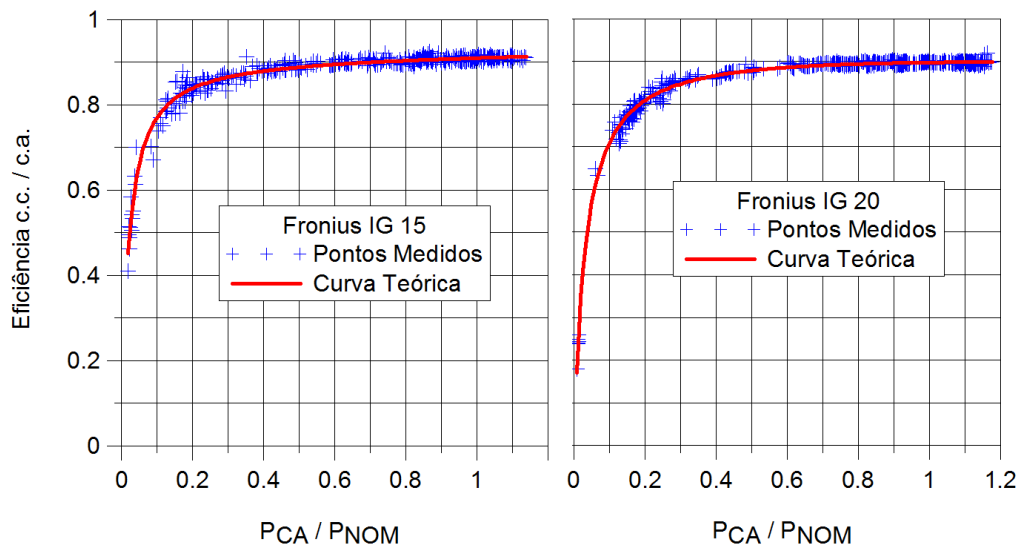


Figura 10. Curva de eficiência de conversão c.c./c.a. dos inversores Fronius IG 15 e Fronius IG 20.

tência, definido na eficiência europeia e na eficiência californiana.

A eficiência europeia e a eficiência californiana diferem nos valores de potência considerados e nos respectivos fatores multiplicadores e, comumente, são adotadas

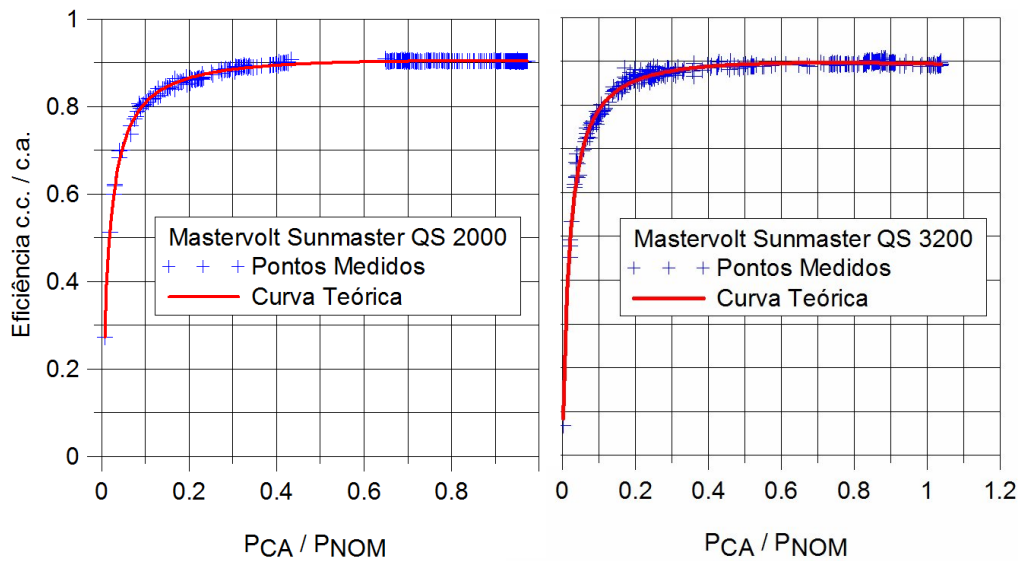


Figura 11. Curva de eficiência de conversão c.c./c.a. dos inversores Mastervolt Sunmaster QS 2000 e Mastervolt Sunmaster QS 3200.

Tabela 2. Eficiência dos inversores ensaiados para cada valor de potência definido na eficiência europeia e na eficiência californiana.

Modelo	5%	10%	20%	30%	50%	75%	100%
SB 700U	70,8	81,3	87,4	89,4	90,5	90,4	89,7
SB 1100E	73,1	82,2	87,4	89,0	89,8	89,6	89,0
SB 2100	75,7	84,5	89,4	90,9	91,6	91,4	90,9
SB 2500	89,2	92,5	93,7	93,8	93,2	92,0	90,8
SB 3800U	70,7	81,4	87,7	89,9	91,2	91,3	90,9
IG 15	66,3	77,0	83,9	86,5	88,8	90,1	90,9
IG 20	56,9	71,0	80,9	84,7	87,8	89,2	89,7
IG 30	68,6	79,7	86,5	88,7	90,1	90,3	89,9
QS 2000	71,5	80,9	86,5	88,4	89,8	90,3	90,4
QS 3200	68,2	79,0	85,5	87,8	89,3	89,6	89,5

como médias representativas para níveis de irradiância média e alta, respectivamente. Os inversores que apresentam eficiências máximas a partir de 50% da potência nominal têm eficiência californiana maior que eficiência europeia, enquanto que os inversores que atingem suas eficiências máximas em níveis de carregamento da ordem de 30 – 40% apresentam eficiência europeia maior que eficiência californiana.

A tabela 3 apresenta a eficiência europeia e a eficiência californiana dos inversores ensaiados no LABSOL/UFRGS.

Tabela 3. Eficiência europeia e californiana dos inversores ensaiados.

Fabricante	Modelo	<i>EU</i>	<i>CAL</i>
SMA	SB 700U	88,7	89,2
SMA	SB 1100E	88,3	88,3
SMA	SB 2100	90,2	90,4
SMA	SB 2500	92,7	92,0
SMA	SB 3800U	89,3	90,0
Fronius	IG 15	86,9	87,4
Fronius	IG 20	85,1	86,5
Fronius	IG 30	88,2	88,8
Mastervolt	QS 2000	88,3	88,5
Mastervolt	QS 3200	87,4	87,9

5 Conclusões

Este trabalho apresentou os resultados de ensaios de eficiência c.c./c.a. de diferentes inversores utilizados em SFCR, a partir de uma abordagem teórica e experimental. A análise permitiu resultados que auxiliaram na compreensão do processo de interação entre o arranjo fotovoltaico e o inversor e entre o inversor e a rede elétrica de distribuição.

Os ensaios elétricos de eficiência de conversão c.c./c.a. foram realizados com diferentes modelos de inversores e comprovam que a eficiência é dependente da potência relativa. Os inversores medidos apresentaram eficiências maiores que 90% para potências relativas maiores que 10 – 20% e as eficiências máximas podem ser atingidas em potências relativas entre 30 – 70%, dependendo do fabricante. A eficiência diminui para potências relativas menores, pois todos os equipamentos têm um consumo elétrico mínimo, cuja proporção com a potência convertida aumenta para baixas potências. Essas características alertam para a importância do dimensionamento adequado dos inversores, uma vez que o dimensionamento incorreto pode implicar perdas energéticas que devem ser quantificadas e comparadas com as opções de dimensionamento disponíveis. Para comparação entre o desempenho dos inversores,

foram utilizados índices ponderados que consideram a eficiência em função do nível de carregamento dos inversores.

A análise do comportamento de inversores de SFSCR permitiu importante contribuição no entendimento do desempenho desse equipamento e sua interação com os demais componentes de um sistema fotovoltaico. Os resultados apresentados neste trabalho alertam para a importância do dimensionamento adequado e correto de inversores, permitindo que os mesmos ofereçam seu máximo desempenho, e indicam a necessidade do desenvolvimento de normativas que possam garantir eficiência e qualidade da energia elétrica que sistemas fotovoltaicos injetam na rede elétrica, criando um panorama de confiança para que a energia solar fotovoltaica possa contribuir na diversificação da matriz energética brasileira.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Referências

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Banco de informação de geração: matriz de energia elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em Jan/2013
- [2] TOLMASQUIM, M. T. Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro, Interciência: Cenergia, 2003.
- [3] SALAMONI, I.; RÜTHER, R.; KNOB, P.; ZOMER, C.; DINIZ, A. S. C. O potencial dos sistemas fotovoltaicos integrados à edificação e interligados à rede elétrica em centros urbanos do Brasil: dois estudos de caso. *Proceedings of 1st Conferência Latinoamericana de Construção Sustentável e 10th Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. São Paulo, Brasil. 2004.

- [4] VALERA, P.; ENRILE, J.; OSUNA, R.; ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F. Sevilla PV 1,2 MW – Central fotovoltaica de conexión a red con doble concentración y seguimiento solar en dos ejes. *Proceedings of 12th Congreso Ibérico y 7th Congreso Iberoamericano de Energía Solar*. p. 979-984, Vigo, Espanha. 2004.
- [5] CRUZ, I. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica – Inversores conectados a red y autónomos. v. 1. cap. 11. 2009.
- [6] PRIEB, C. W. M. Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2011.
- [7] GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. Photovoltaic solar energy generation. Springer, Alemanha, 2005.
- [8] CALAIS, M.; MYRZIK, J.; SPOONER, T.; AGELIDIS, V. G. Inverters for single-phase grid-connected photovoltaic systems – An overview. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*, p. 1995-2000. 2002.
- [9] ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F. Choosing the right inverter for grid-connected PV systems. *Renew Energ World*. v. 7. p. 132-147. 2004.
- [10] Photon – La Revista de Fotovoltaica. Investigación y Tecnología: Microinversores. Outubro, p. 134–143. 2009.
- [11] Photon – La Revista de Fotovoltaica. Investigación y Tecnología: Inversores. Março, p. 72–81. 2010.
- [12] URBANETZ, J. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Tese de Doutorado, PPGEC/UFSC. Florianópolis, 2010.
- [13] GONZÁLEZ, R.; LÓPEZ, J.; SANCHIS, P.; MARROYO, L. Transformerless

- inverter for single-phase photovoltaic system. *Ieee T Power Electr*, v. 22, n. 2, p. 693-697. 2007.
- [14] KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; FELLOW, F. B. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *Ieee T Ind Appl*, v. 41, n. 5, p. 1292-1306. 2005.
- [15] SMA Solar Technology AG. Tecnologia de módulos – Funcionamento perfeito de geradores fotovoltaicos das novas tecnologias. Informação técnica do fabricante. 2009.
- [16] International Electrotechnical Commission (IEC 61683). Photovoltaic systems – Power conditioners – Procedure for measuring efficiency. 2008.
- [17] RAMPINELLI, G. A. Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Tese de Doutorado, PRO-MEC/UFRGS. Porto Alegre, 2010.
- [18] KELLER, L.; AFFOLTER, P. Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverters – Practical results. *Sol Energy*, v.55, n.1, p.1-7. 1995.
- [19] SCHALKWIJK, M. V.; KIL, A. J.; WEIDEN, T. C. J.; PAES, P. S. Undersizing of inverters: Modeling and monitoring results of 15/PV Inverter units in Portugal and Netherlands. *Proceedings of 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, p.2229-2232. 1997.
- [20] CAAMAÑO-MARTÍN E. Edificios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Caracterización y análisis. Doctoral Thesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Spain, 1998.
- [21] KIL, A. J.; WEIDEN, T. C. J. V. D. Performance of modular grid-connected PV systems with undersized inverters in Portugal and the Netherlands. *Proceedings of 1st WCPEC-IEE*. Hawaii. 1994.

- [22] MACÊDO, W. N. Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Tese de Doutorado, PIPGE/USP. São Paulo, 2006.
- [23] DIAS, J. B. Instalação fotovoltaica conectada à rede: Estudo experimental para otimização do fator de dimensionamento. Tese de Doutorado, PRO-MEC/UFRGS. Porto Alegre, 2006.
- [24] BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Sol Energy*, v. 80, p. 32-45. 2006.
- [25] VELASCO, G.; GUINJOAN, F.; PIQUÉ, R.; NEGRONI, J. J. Sizing factor considerations for grid-connected PV systems based on a central inverter configuration. *Proceedings of 32th ICON*. Paris, France. 2006.
- [26] MACÊDO, W. N.; ZILLES, R. Operational results of grid-connected photovoltaic system with different inverter's sizing factors (ISF). *Prog in Photovolt: Res Appl*, v. 15, p. 337-352. 2007.
- [27] HAEBERLIN, H.; GRAF, J. Islanding of grid-connected PV inverters: Tests circuits and some tests results. *Proceedings of 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Vienna, Austria. 1998.
- [28] ROPP, M. E.; BEGOVIC, M.; ROHATGI, A. Prevention of islanding in grid-connected photovoltaic system. *Prog in Photovolt: Res Appl*, v. 7, p. 39-59. 1999.
- [29] WOYTE, A.; BELMANS, R.; NIJS, J. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters. *Ieee T Energy Conver*, v. 18, n.1, p. 157-162. 2003.
- [30] INFELD, D. G.; ONIONS, P.; SIMMONS, A. D.; SMITH, G. A. Power quality from multiple grid-connected single phase inverter. *Ieee T Power Deliver*, v. 19, n. 4, p. 1983-1989. 2004.
- [31] CAAMAÑO-MARIN, E.; LAUKAMP, H.; JANTSCH, M.; ERGE, T.; THORNYCROFT, J.; DE MOOR, H.; COBBEN, S.; SUNA, D.; GAID-

- DON, B. Interaction between photovoltaic distributed generation and electricity networks. *Prog in Photovolt: Res Appl*, v. 16, p. 629-643. 2008.
- [32] GIRBAU, Z.; CHENLO, F.; CAAMAÑO-MARTIN, E. Comparación de dos sistemas FVS distintos conectados a rede en la misma localidad. *Proceedings of 12th Congresso Ibérico y 7th Congresso Iberoamericano de Energia Solar*. Vigo, Espanha, p. 1031-1036. 2004.
- [33] JANTSCH, M.; SCHIMIDT, H.; SCHMID, J. Results of the Concerted action on power conditioning and control. *Proceedings of 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Montreux, Suíça. p. 1589-1593. 1992.
- [34] Fluke Corporation. Fluke 434/435 three phase power quality analyzer. Guia do usuário. 2007.
- [35] KREUTZMANN, A.; WELTER, P. market survey on inverters for grid-tied PV systems. *PHOTON International – The Photovoltaic Magazine*, v.4. 2005.
- [36] KING, D. L.; GONZALEZ, S.; GALBRAITH, G. M.; BOYSON, W. E. Performance model for grid-connected photovoltaic inverter. Sandia National Laboratories, Sandia Report. 2007.