

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE INVERSORES PARA SFCR COM O USO DE SIMULADORES DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LABSOL-UFRGS

Resumo. Neste trabalho são descritos os equipamentos e a metodologia utilizados no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL-UFRGS) para ensaios de determinação de eficiência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição (SFCRs). São apresentados os resultados dos ensaios de eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência, eficiência de conversão e eficiência total de dois inversores comerciais, determinados conforme os procedimentos experimentais e métodos de cálculo propostos na norma europeia EN50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters. Esta norma estabelece que os ensaios sejam feitos com um simulador de arranjos fotovoltaicos. O equipamento e a metodologia utilizados mostraram-se plenamente adequados para a caracterização de inversores para SFCRs.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Inversor, Eficiência

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é a forma de produção de eletricidade que mais cresce no mundo. A potência instalada mundial, até o final do ano de 2011, era de cerca de 65 GW_p. Embora a capacidade instalada no Brasil seja irrisória quando comparada com outros países, espera-se para um futuro próximo uma radical mudança de cenário a partir das políticas públicas de incentivo recentemente implantadas. O inversor é o elemento central dos sistemas fotovoltaicos. Além de executar a conversão da energia elétrica em corrente contínua para corrente alternada, ele também é responsável pelo gerenciamento da energia entregue à rede e pelo seguimento do ponto de máxima potência. Assim sendo, a correta caracterização dos componentes utilizados em instalações de geração fotovoltaica, especialmente do inversor, torna-se essencial para a estimativa do desempenho destes sistemas, tanto do ponto de vista técnico como econômico. A norma europeia EN50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters estabeleceu os procedimentos para a determinação das eficiências de conversão, de seguimento do ponto de máxima potência e total de inversores para conexão à rede.

2. EFICIÊNCIA DE INVERSORES

2.1 Eficiência de conversão η_{CONV}

A eficiência de um sistema qualquer de conversão de energia é definida como a razão entre a potência de saída e a potência de entrada. No caso do inversor, a eficiência de conversão pode ser descrita por:

$$\eta_{CONV} = \frac{\int_0^{T_M} p_{CA}(t) dt}{\int_0^{T_M} p_{CC}(t) dt} \quad (1)$$

onde p_{CA} é a potência em corrente alternada entregue à rede, p_{CC} é a potência em corrente contínua na entrada inversor e T_M é o período de integração considerado.

A eficiência de conversão dos inversores, entretanto, não tem um valor constante, apresentando uma dependência em relação ao carregamento, o qual varia continuamente conforme as variações momentâneas, diárias e sazonais das condições de irradiância e temperatura às quais o gerador fotovoltaico está submetido. Além do carregamento, a eficiência também é influenciada, em menor grau, pela tensão de entrada do inversor. As Figs. 1, 2 e 3 mostram exemplos da variação da eficiência com a tensão de entrada do inversor.

O gráfico da Fig. 1 refere-se a um inversor cuja eficiência de conversão se deteriora com o aumento da tensão de entrada. Outros inversores apresentam um comportamento oposto, aumentando a eficiência com a tensão, tal como o SMA SB3300TL HC, mostrado na Fig. 2. Já o inversor Fronius IG30 (Fig. 3) oferece o máximo desempenho na tensão de 280 V_{CC}, diminuindo a eficiência de conversão para tensões acima e abaixo desta.

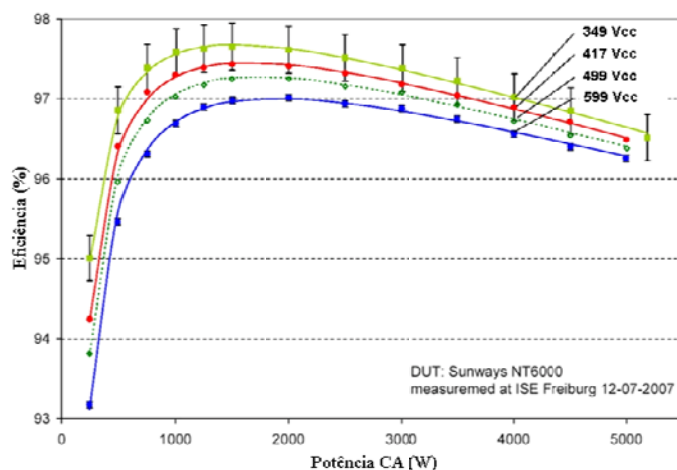


Figura 1 – Efeito da tensão de entrada sobre a eficiência de conversão do inversor Solarmax modelo SM6000C (Baumgartner, 2005).

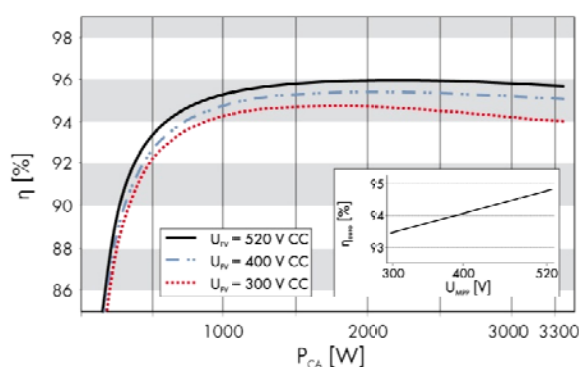


Figura 2 – Efeito da tensão de entrada sobre a eficiência de conversão do inversor SMA SB3300TL HC (SMA, 2009).

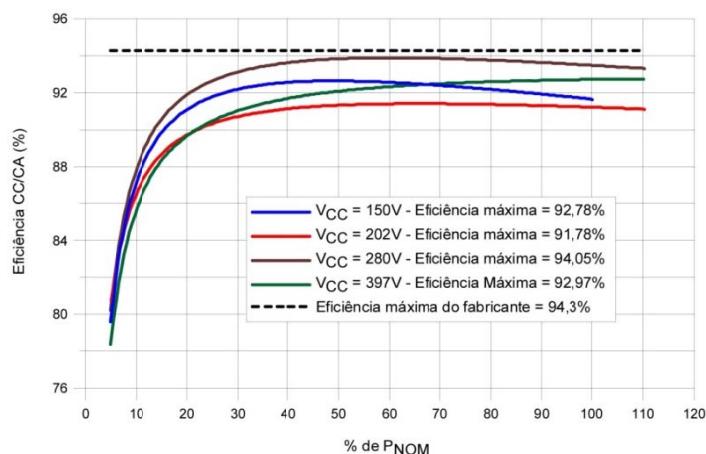


Figura 3 – Efeito da tensão de entrada sobre a eficiência de conversão do inversor Fronius modelo IG30 (adaptado de Photon International, 2007 por Rampinelli, 2010).

A correta informação sobre a influência da tensão de entrada na eficiência de conversão do inversor é um dado de grande importância (e muitas vezes desprezado) para o projetista no momento de definir o número de módulos em série em uma dada instalação. Um sistema com um inversor com uma excelente eficiência máxima de conversão trabalhando em uma faixa de tensões inapropriada poderá ter uma produtividade inferior à que teria se empregasse um inversor de especificações mais modestas, porém bem adaptado à tensão do gerador fotovoltaico (Baumgartner et al., 2007).

2.2 Eficiência de seguimento do ponto de máxima potência η_{MPPT}

O seguimento do ponto de máxima potência é um processo de controle executado, de forma contínua ou intermitente, pelos circuitos de comando do inversor para forçar a polarização do arranjo fotovoltaico na tensão

correspondente à sua tensão de máxima potência, de forma a maximizar a transferência de potência do gerador para o inversor.

Quantitativamente, a eficiência de seguimento de máxima potência pode ser definida pela Eq. 2:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{CC}(t) dt}{\int_0^{T_M} p_{MP}(t) dt} \quad (2)$$

onde p_{CC} é a potência efetivamente entregue pelo arranjo fotovoltaico à entrada do inversor, p_{MP} é a potência máxima que o arranjo fotovoltaico é capaz de fornecer para uma dada condição de irradiância e temperatura, e T_M é o período de integração considerado.

A eficiência do seguimento de máxima potência pode ser definida separadamente para condições de irradiância em regime permanente ou transiente. No primeiro caso, é chamada eficiência de MPPT estática, correspondendo a dias de céu limpo, nos quais a variação de irradiância é muito lenta. Para a determinação da eficiência dinâmica de MPPT há que se definir perfis de variação de irradiância ao longo do tempo, simulando as diversas condições de dias nublados e parcialmente nublados, com nuvens intermitentes. Algumas propostas para estes padrões foram apresentadas por Bower et al., 2004 e Haeberlin et al., 2006. Haeberlin et al., 2009, propuseram perfis trapezoidais para teste de eficiência dinâmica considerando transições de baixa/média/baixa e média/alta/média irradiância, os quais foram incorporados, com algumas modificações, à norma *EN 50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters*.

A eficiência do seguimento do ponto de máxima potência é um índice que indica o grau de precisão, tanto em termos de rapidez como de magnitude, com que o seguidor do ponto de máxima potência atinge o seu objetivo. Haeberlin et al. (2005) destacaram que, como a determinação experimental da eficiência do seguimento de máxima potência é difícil e requer equipamentos sofisticados, é comum por parte de fabricantes, projetistas e programas de simulação presumir que o inversor esteja sempre polarizando o gerador fotovoltaico no seu ponto de máxima potência. Esta suposição pode levar a um erro de alguns pontos percentuais entre a energia prevista e a efetivamente gerada por um sistema de geração fotovoltaica, já que, dependendo do algoritmo utilizado pelo MPPT, podem ocorrer desvios do ponto de máxima potência real.

A determinação experimental da eficiência do seguimento de máxima potência é uma tarefa complexa, pois envolve medições de dois dispositivos (o gerador fotovoltaico e o inversor) e a interação entre ambos. A potência P_{CC} efetivamente entregue pelo gerador fotovoltaico ao inversor pode ser facilmente determinada, inclusive de forma continuada, sem alterar o funcionamento do inversor. O mesmo não ocorre com relação à determinação do valor de máxima potência P_{MP} , cujo valor é dependente das condições instantâneas de irradiância e temperatura a que o gerador fotovoltaico está submetido. Embora a determinação de P_{MP} seja possível através de alguns artifícios, ela não pode ser feita concomitantemente à medida de P_{CC} .

2.3 Eficiência total de inversores η_i

Muitos fabricantes de inversores têm, historicamente, fornecido especificações insuficientes sobre seus produtos (Haeberlin, 2005). Durante muito tempo, a única informação sobre eficiência fornecida pelos fabricantes de inversores era eficiência de conversão máxima. Sobre a eficiência de seguimento de máxima potência, via de regra, nada era informado.

Um valor de eficiência correspondente a um único ponto de operação específico é um dado de pouca utilidade, dada a dependência da eficiência com o carregamento e com tensão de entrada. Entretanto, o conceito de uma figura de mérito que quantifique em uma única cifra o comportamento do inversor sob condições diversas de operação pode ser um elemento facilitador para o consumidor no momento de decidir por um ou outro modelo de inversor.

Assim, no início da década de 90, com o intuito de incorporar a influência do carregamento parcial sobre o desempenho dos inversores, foram criadas a eficiência *européia* e, posteriormente, a eficiência *CEC* (*California Energy Commission*). Estas eficiências ponderadas levam em conta a estatística dos dados de irradiação locais (no caso, do noroeste da Alemanha e do estado norte-americano da Califórnia) e são descritas em função da eficiência a determinados níveis percentuais da potência nominal em corrente alternada.

$$\eta_{EU} = 0,03 \eta_{5\%} + 0,06 \eta_{10\%} + 0,13 \eta_{20\%} + 0,10 \eta_{30\%} + 0,48 \eta_{50\%} + 0,20 \eta_{100\%} \quad (3)$$

$$\eta_{CEC} = 0,04 \eta_{10\%} + 0,05 \eta_{20\%} + 0,12 \eta_{30\%} + 0,21 \eta_{50\%} + 0,53 \eta_{75\%} + 0,05 \eta_{100\%} \quad (4)$$

onde $\eta_{x\%}$ é a eficiência correspondente ao carregamento a $x\%$ da potência nominal do inversor (Rampinelli, 2010).

Apesar de mais realista com relação ao carregamento parcial e tendo, provavelmente, contribuído para melhorar de forma significativa o desempenho dos inversores desde que foi introduzida (Bletterie et al., 2008), a eficiência européia (e, por extensão, a californiana) apresenta algumas restrições relacionadas aos diferentes histogramas de irradiação associados ao local da instalação, a dependência da eficiência de conversão com a tensão de entrada e a influência do seguidor do ponto de máxima potência.

A partir da metade da década passada, diversos autores (Baumgartner, 2005, Baumgartner, 2007 e Bletterie et al., 2008, entre outros), abordaram com mais profundidade a dependência da eficiência de conversão dos inversores com a tensão de entrada e a influência do seguimento de máxima potência. Em 2005 foi proposta a eficiência total η_t (Haeberlin et al., 2005), posteriormente incluída na norma europeia *EN 50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters*.

$$\eta_t = \eta_{CONV} \cdot \eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{CA}(t) dt}{\int_0^{T_M} p_{MP}(t) dt} \quad (5)$$

A eficiência total considera que o seguidor do ponto de máxima potência é que determina o valor da tensão de entrada do conversor CC/CA, tensão esta que exerce influência sobre a própria eficiência de conversão. Assim, para a caracterização completa do inversor é necessário que sejam determinadas, de preferência simultaneamente, as eficiências dos dois processos para vários carregamentos e, a partir do seu produto, calculada a eficiência total. A norma estabeleceu que a eficiência total fosse determinada para oito níveis de carregamento e três tensões de máxima potência de entrada (mínima, nominal e máxima), definidas pelo fabricante do inversor.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS EFICIÊNCIAS DE MPPT, CONVERSÃO E TOTAL

Para a execução dos testes foi montada uma bancada de ensaios para a determinação de eficiência de inversores para conexão à rede, cujo esquema está representado na Fig. 4. A bancada é composta por um simulador de arranjos fotovoltaicos, o qual alimenta o inversor sob teste, e um analisador de energia, responsável pelas medidas de corrente e tensão alternadas para o cálculo da eficiência de conversão. A energia convertida pelo inversor é injetada na rede elétrica através do quadro de distribuição elétrica do Laboratório.



Figura 4 - Bancada de testes para o ensaio dos inversores.

3.1 O simulador de arranjos fotovoltaicos Regatron TopCon Quadro

A peça central desta bancada é uma fonte programável de potência da marca Regatron modelo TopCon Quadro TC.P.16.600.400.S, de fabricação suíça. A potência máxima de saída da fonte é de 16 kW. Embora capaz de realizar outras tarefas típicas de fontes de alimentação programáveis, a sua principal aplicação é simular geradores fotovoltaicos. Para isso, através de um *software* externo atuando sobre o gerador de funções arbitrárias embutido no seu *firmware*, os pares $I-V$ de uma curva característica medida ou calculada são carregados no circuito de controle da fonte, cuja seção de potência passa a emular o comportamento de um gerador fotovoltaico, fornecendo em sua saída apenas valores de corrente e tensão correspondentes aos pares $I-V$ da curva característica programada. Os valores máximos de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, para este modelo de fonte, são de 600 V e 32 A, respectivamente. O programa SASControl, desenvolvido pela Regatron, é um aplicativo específico para programar e controlar uma ou mais fontes TopCon Quadro. A comunicação entre a fonte e o computador é feita através do protocolo de comunicação RS-232. O *software* é executado no ambiente Windows e sua interface com o usuário é constituída por diversas janelas, acessáveis através de abas. A memória interna da fonte tem capacidade para armazenar até 1000 curvas características, as quais podem ser manipuladas através do programa em função de condições simuladas de irradiância e temperatura de célula. Assim, além da simulação de curvas características em condições estáticas, perfis dinâmicos de irradiância e temperatura de célula podem ser programados, possibilitando a avaliação de inversores sob regime dinâmico em tempo real (por exemplo, ao longo de um dia) como se ele estivesse sendo alimentado por um gerador fotovoltaico verdadeiro. O uso de uma fonte deste tipo permite que as mais diversas condições de operação dos inversores, inclusive situações de campo peculiares, possam ser reproduzidas em laboratório com repetibilidade e precisão. A exatidão da fonte,

segundo o fabricante, é de 0,1 % FDE (fundo de escala) em modo corrente ou modo tensão e a estabilidade (após 8 horas de funcionamento) de 0,05 % FDE. A resolução de programação e leitura de corrente e tensão é 0,025 % FDE e da potência de 0,1 % FDE.

3.2 Determinação experimental da eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência

De acordo com a norma *EN 50530:2010*, a determinação da eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência é feita submetendo o inversor sob teste a oito pontos de carregamento (5, 10, 20, 25, 30, 50, 75 e 100 % da potência nominal CC do inversor) para três tensões de entrada diferentes (nominal e limites superior e inferior da atuação do MPPT) e duas tecnologias de célula: silício cristalino (c-Si) e filmes finos (FF). Assim, seis curvas *I-V* devem ser programadas no simulador, totalizando 48 pontos de operação.

Para a programação da sequência de testes são necessários os seguintes dados do inversor, a serem fornecidos pelo fabricante:

- tensão máxima admissível na entrada do inversor sob teste ($V_{CCmáx}$);
- tensão mínima de entrada para que o inversor entregue energia à rede ($V_{CCmín}$);
- tensão nominal de entrada (V_{CCnom}). Caso não seja fornecida, $V_{CCnom} = (V_{MPmín} + V_{MPmáx})/2$;
- tensão máxima de seguimento de máxima potência do inversor ($V_{MPmáx}$). Se $V_{MPmáx}$ for superior a $0,8 V_{CCmáx}$ (c-Si) ou $0,7 V_{CCmáx}$ (FF), então $V_{MPmáx} = 0,8 V_{CCmáx}$ (c-Si) ou $0,7 V_{CCmáx}$ (FF);
- tensão mínima de seguimento de máxima potência do inversor ($V_{MPmín}$);

A programação da fonte TopCon Quadro é feita através de uma série de comandos e funções embutidas no *firmware*, os quais são acionados através um roteiro SASScript, semelhante ao JavaScript. A documentação do SASControl inclui *scripts* demonstrativos para a determinação das eficiências estática e dinâmica de MPPT, os quais devem ser adaptados ao ensaio requerido. Os dados de P_{CCnom} , $V_{MPmín}$, $V_{MPmáx}$ e V_{CCnom} relativos ao inversor sob teste são introduzidos no *script*, bem como o número de referência da curva a ser utilizada no teste específico.

Para a determinação da eficiência estática de MPPT, o *script* correspondente deve ser executado seis vezes, cada vez com uma das seis curvas criadas anteriormente. Cada um dos oito pontos de operação de cada curva deve ser medido durante um período de 10 minutos, com um período prévio de estabilização de pelo menos 5 minutos. O sistema de aquisição de dados registra as grandezas previamente selecionadas à taxa de uma varredura por segundo. Ao final de cada execução são criados oito arquivos contendo, cada um deles, uma tabela com os dados instantâneos de corrente, tensão e potência correspondentes àquele ponto de operação. O programa computa as médias e apresenta os resultados em um arquivo separado.

A eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência para cada ponto de operação é calculada a partir da expressão:

$$\eta_{MPPTestat} = \frac{1}{P_{MPsim} \cdot T_M} \sum_i V_{CC,i} \cdot I_{CC,i} \cdot \Delta T \quad (6)$$

onde $V_{CC,i}$ é a tensão medida na entrada do inversor, $I_{CC,i}$ é a corrente medida na entrada do inversor, T_M é o período total da medida e ΔT é o intervalo entre duas medidas subsequentes.

Os 48 valores de eficiência de seguimento estático de MPPT, calculados conforme a Eq. 6, são reunidos em uma tabela com o formato apresentado na Tab. 1.

Tabela 1 – Modelo de tabela para apresentação dos resultados dos testes de eficiência.

V_{MPsim} da curva característica simulada	Tecnologia de célula	Potência normalizada (P_{MPsim}/P_{CCnom})							
		0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,50	0,75	1,00
$V_{MPmáx}$ ou $0,8 \cdot V_{CCmáx}$ ^a	c-Si								
V_{CCnom}	c-Si								
$V_{MPmín}$	c-Si								
$V_{MPmáx}$ ou $0,7 \cdot V_{CCmáx}$ ^a	FF								
V_{CCnom}	FF								
$V_{MPmín}$	FF								

^a O menor valor entre os dois.

3.3 Determinação experimental da eficiência de conversão

A determinação da eficiência de conversão é feita concomitantemente ao ensaio de determinação da eficiência estática de MPPT, a cada ponto de operação. Como visto anteriormente, a eficiência de conversão pode ser calculada pela Eq. (1). Neste caso, p_{CA} é a potência ativa entregue pelo inversor à rede durante o intervalo T_M e p_{CC} é a potência absorvida pelo inversor no mesmo intervalo.

Como o sistema de aquisição de dados integrado à fonte Regatron não tem entradas externas, ficando restrito apenas às grandezas em corrente contínua, para a medida da potência em corrente alternada na saída do inversor foi utilizado um analisador de energia Fluke, modelo 434. A tensão da rede foi medida diretamente na saída do inversor, enquanto que a corrente foi medida através de uma pinça de corrente Fluke i400. De acordo com o fabricante, as entradas diretas de tensão e corrente do analisador Fluke 434 apresentam uma imprecisão de leitura de $\pm 0,5\%$. A pinça i400 possui fundo de escala selecionável entre 40 e 400 A, sendo utilizada na posição de 40 A. Como as correntes a serem medidas durante os experimentos não ultrapassavam 20 A, optou-se por fazer o cabo passar duas vezes pelo sensor, dobrando a sensibilidade da pinça. A imprecisão anunciada pelo fabricante da pinça na sua leitura de corrente é de 2 %, valor superior aos limites determinados pela norma.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da medida de corrente, foi feita uma calibração por comparação com um *shunt* de corrente da marca Agilent, modelo 34330A (imprecisão de $\pm 0,3\%$, segundo o fabricante), com seu sinal lido por um multímetro Agilent modelo 34401A, de $6\frac{1}{2}$ dígitos. Foram acionadas cargas resistivas alimentadas em tensão alternada, com correntes de 0,5, 5 e 10 A medidas simultaneamente pelos conjuntos Fluke 434/i400 e Agilent 34401A/34330A. A medição da corrente de cada carga medida foi repetida cinco vezes. Uma análise estatística dos resultados indicou uma discordância entre os valores de corrente medidos com os conjuntos Fluke e Agilent menor do que 0,3 %. Como essa diferença é inferior à própria precisão do *shunt* utilizado como referência, para os cálculos de eficiência de conversão optou-se pela utilização dos valores de corrente tais como fornecidos pelo conjunto Fluke 434/i400, sem correção adicional.

Os 48 valores de eficiência de conversão, calculados conforme a Eq. 1, são reunidos em uma tabela com o formato apresentado na Tab. 1.

3.4 Cálculo da eficiência total

A eficiência total do inversor η_t é calculada pelo produto da eficiência estática de MPPT pela eficiência de conversão em cada ponto de operação, conforme a Eq. 5.

Os 48 valores de eficiência total, correspondentes a cada ponto de operação, são reunidos em uma tabela com o formato apresentado na Tab. 1.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho são apresentados os resultados dos ensaios de eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência, eficiência de conversão e eficiência total de dois inversores comerciais, o SMA SB3800, com potência nominal de saída de 3800 W, fabricado pela SMA Solar Technologies AG, da Alemanha e o FRONIUS IG20, com potência nominal de saída de 1800 W, fabricado por Fronius International GmbH, da Áustria. A Tab. 2 apresenta um resumo das características elétricas dos dois inversores, tais como fornecidas por seus fabricantes.

Tabela 2 – Características elétricas dos inversores ensaiados.

	SMA SB3800	FRONIUS IG20
P_{CAnom} (W)	3800	1800
P_{CCnom} (W)	4040	1940
V_{CCnom} (V)	300	280
V_{CCmax} (V)	500	500
V_{MPmin} (V)	200	150
V_{MPmax} (V)	400	400

Os valores de eficiência encontrados serão apresentados a seguir, por limitação de espaço, apenas na forma gráfica. A Fig. 5 mostra os resultados dos ensaios de determinação da eficiência estática de seguimento de máxima potência, eficiência de conversão e eficiência total do inversor SMA SB3800 alimentado pelo simulador de arranjos fotovoltaicos programado para simular três curvas correspondentes à tecnologia silício cristalino, com três tensões de máxima potência (215, 300 e 400 V). Foi utilizado o valor de 215 V para V_{MPmin} porque o inversor não funcionou com o valor de catálogo (200 V). A Fig. 6 mostra os resultados equivalentes para a tecnologia de filmes finos. Neste caso, o valor de V_{MPmax} foi limitado em 350 V ($0,7 V_{CCmax}$).

Os resultados de eficiência do SMA SB3800 alimentado com curvas de silício cristalino e de filmes finos são muito semelhantes entre si. Observa-se que a eficiência de conversão decresce com o aumento da tensão, atingindo seu valor máximo ($\sim 95\%$) com carregamentos ao redor de 25 %. As eficiências europeia e californiana foram, respectivamente, de 95,3 e 95,5 %. Como a eficiência estática de seguimento de máxima potência atinge valores bem próximos à unidade na maior parte das situações (exceto para baixos carregamentos com a curva $I-V$ de maior tensão), o peso da eficiência de conversão torna-se preponderante no cálculo da eficiência total.

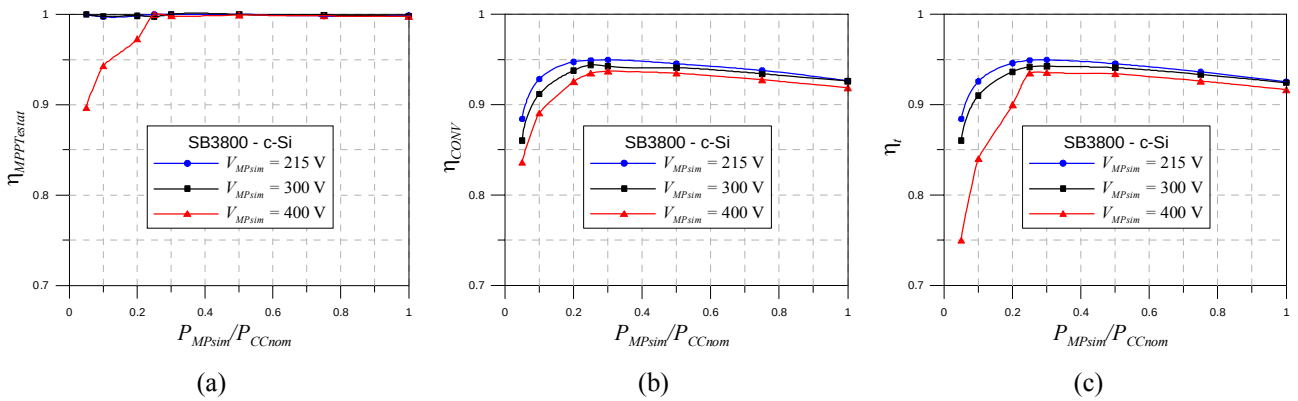


Figura 5 - Eficiências estática de seguimento do ponto de máxima potência (a), de conversão (b) e total (c) do inversor SMA SB3800 com $P_{CCnom} = 4040$ W e $V_{MPsim} = 215, 300$ e 400 V, tecnologia silício cristalino.

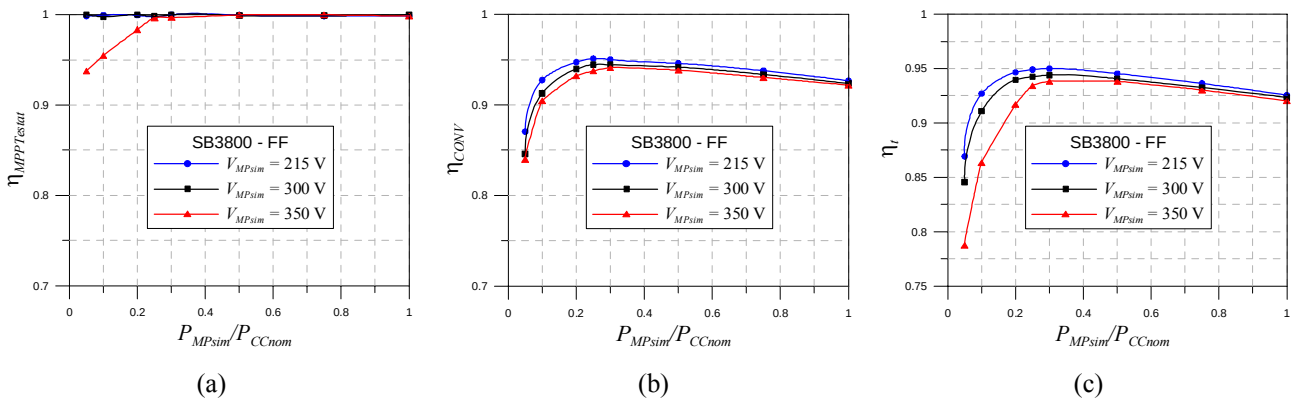


Figura 6 - Eficiências estática de seguimento do ponto de máxima potência (a), de conversão (b) e total (c) do inversor SMA SB3800 com $P_{CCnom} = 4040$ W e $V_{MPsim} = 215, 300$ e 350 V, tecnologia filmes finos.

A Fig. 7 mostra os resultados dos ensaios de determinação da eficiência estática de seguimento de máxima potência, eficiência de conversão e eficiência total do inversor FRONIUS IG20 alimentado pelo simulador de arranjos fotovoltaicos programado para simular três curvas correspondentes à tecnologia silício cristalino, com três tensões de máxima potência (150, 280 e 400 V). A Fig. 8 mostra os resultados correspondentes para a tecnologia de filmes finos. Neste caso, o valor de $V_{MPm\acute{a}x}$ foi novamente limitado a 350 V.

Os resultados de eficiência do FRONIUS IG20 alimentado com curvas de silício cristalino e de filmes finos apresentaram algumas diferenças entre si. As curvas de eficiência de conversão com diferentes tensões apresentaram cruzamentos (mais marcadamente no caso de curvas com tecnologia filmes finos), mostrando que a influência da tensão sobre a eficiência não é linear. O valor máximo de eficiência ($\sim 93\%$) ocorre com carregamentos entre 50 e 75 %. As eficiências europeia e californiana foram, respectivamente, de 91,3 e 92,5 %. Novamente a eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência atinge valores bem próximos à unidade na maior parte das situações (exceto para baixos carregamentos), fazendo com que a eficiência de conversão torne-se preponderante no cálculo da eficiência total.

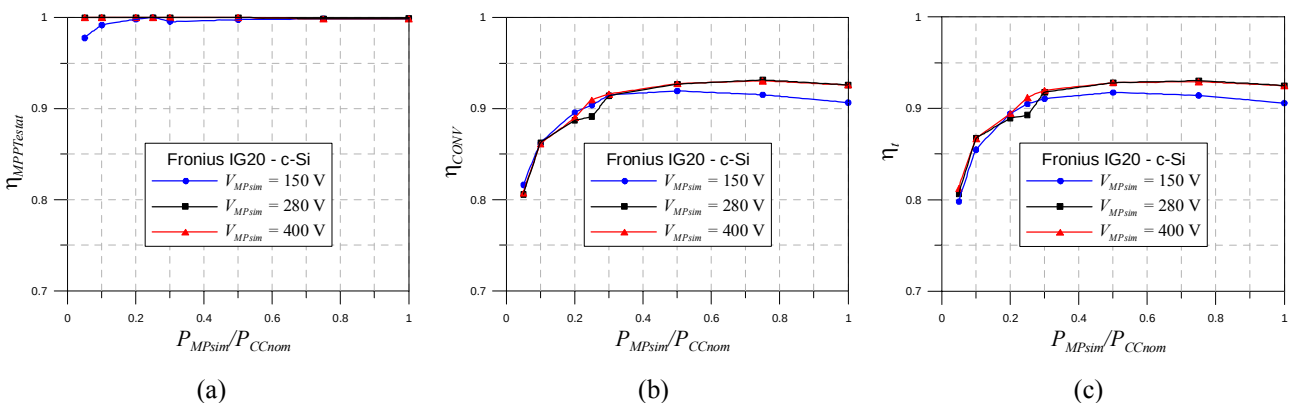


Figura 7 - Eficiências estática de seguimento do ponto de máxima potência (a), de conversão (b) e total (c) do inversor FRONIUS IG20 com $P_{CCnom} = 1940$ W e $V_{MPsim} = 150, 280$ e 400 V, tecnologia silício cristalino.

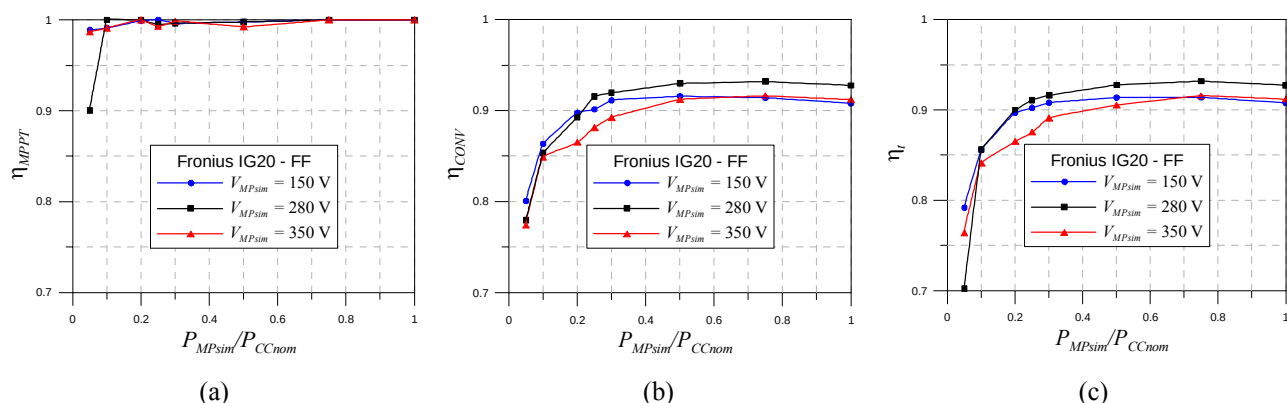


Figura 8 - Eficiências estática de seguimento do ponto de máxima potência (a), de conversão (b) e total (c) do inversor FRONIUS IG20 com $P_{CCnom} = 1940$ W e $V_{MPsim} = 150, 280$ e 350 V, tecnologia filmes finos.

5. CONCLUSÕES

Foi montada uma bancada para ensaios de eficiência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, tendo como elemento central um simulador de arranjos fotovoltaicos. Foi feita uma breve descrição do equipamento de medida das grandezas elétricas envolvidas. Com a bancada desenvolvida, foram determinadas experimentalmente as eficiências estática de seguimento de máxima potência, de conversão e total de dois inversores comerciais, utilizando os procedimentos experimentais e métodos de cálculo estabelecidos pela norma *EN 50530:2010*. O equipamento e a metodologia utilizados mostraram-se plenamente adequados para a caracterização de inversores para SFCRs.

Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio financeiro do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia – CNPq.

REFERÊNCIAS

- Baumgartner, F.P. Euro Realo Inverter Efficiency: DC-Voltage Dependency, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, v. CD-ROM, Barcelona, Espanha, 2005.
- Baumgartner, F. P.; Schmidt, H.; Burger, B.; Bründlinger, R.; Häberlin, H.; Zehner M. Status and Relevance of the DC Voltage Dependency of the Inverter Efficiency, 22nd EPVSEC, v. CD-ROM, Milão, Itália, 2007.
- Bletterie, B.; Bründlinger, R.; Häberlin, H.; Baumgartner, F.P.; Schmidt, H.; Burger, B.; Klein, G.; Alonso-Abella, M. Redefinition of the European Efficiency, 23rd EPVSEC, v. CD-ROM, Valência, Espanha, 2008.
- Bower, B.; Whitaker, C.; Erdman, W.; Behnke, M.; Fitzgerald, M. Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems, Sandia Laboratories, 2004.
- Haeberlin, H., Schaerf, P. New Procedure for Measuring Dynamic MPP-Tracking Efficiency at Grid-Connected PV Inverters, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburgo, Alemanha, 2009.
- Haeberlin, H.; Borgna, L.; Kaempfer, M.; Zwahlen, U. Total Efficiency η_{TOT} - A New Quantity for Better Characterization of Grid-connected PV Inverters, 20th EPVSEC, v. CD-ROM, Barcelona, Espanha, 2005.
- Haeberlin, H.; Borgna, L.; Kämpfer, M.; Zwahlen, U. Measurement of Dynamic MPP Tracking Efficiency at Grid-Connected PV Inverters, 21st EPVSEC, v. CD-ROM, Dresden, Alemanha, 2006.
- Rampinelli, G.A. Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- SMA Sunny Family 2009/2010, p.27, SMA, Alemanha, 2009.

MEASUREMENT OF THE EFFICIENCY OF GRID-CONNECTED INVERTERS WITH PV ARRAY SIMULATORS

Abstract. This work describes the equipment and methodology used at the Solar Energy Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (LABSOL-UFRGS) for the experimental determination of the efficiency of grid-connected inverters. The results for static maximum power point tracking efficiency, conversion efficiency and total efficiency of two commercial inverters, determined with experimental procedures and calculation methods according to the standard *EN50530: 2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters*, are also presented. This standard establishes that the tests shall be done with a photovoltaic arrays simulator. The equipment and methodology used was proven to be fully adequate for the characterization of grid-connected inverters.

Keywords: PV Solar Energy, Inverter, Efficiency