

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DINÂMICA DE SEGUIMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE INVERSORES PARA SFCR

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 dinâmica de seguimento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição (SFCRs). São apresentados os resultados dos ensaios de eficiência dinâmica de MPPT para seis 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 de MPPT

1. INTRODUÇÃO

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.

Em um trabalho anterior (Prieb e Krenzinger, 2012) foi descrita a metodologia utilizada pelo LABSOL-UFRGS para a determinação da eficiência de conversão, da eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência e da eficiência total. O presente trabalho descreve a metodologia para a determinação da eficiência dinâmica de seguimento do ponto de máxima potência

2. EFICIÊNCIA DE INVERSORES

2.1 Eficiência de conversão η_{CONV} , eficiência estática de seguimento do ponto de máxima potência $\eta_{MPPT\text{estát}}$ e eficiência total η_t de inversores

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 pela Eq. (1):

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

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 irradiação 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.

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 de 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. Haeblerlin 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.

Em função das condições de irradiância a que o gerador fotovoltaico está submetido, a eficiência de seguimento do ponto de máxima potência de um inversor pode ser definida separadamente para condições de regime permanente ou transiente. No primeiro caso, para a chamada eficiência estática de seguimento ($\eta_{MPPTestát}$) a irradiância é considerada como constante ao longo do tempo. Já na eficiência dinâmica de seguimento ($\eta_{MPPTdin}$) são consideradas as variações de irradiância em função da nebulosidade, por exemplo. 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} em condições estáticas seja possível através de alguns artifícios, ela não pode ser feita concomitantemente à medida de P_{CC} .

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 (Haeblerlin et al., 2005), posteriormente incluída na norma europeia *EN 50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters*. A eficiência total pode ser calculada pela Eq. (3):

$$\eta_t = \eta_{CONV} \cdot \eta_{MPPTestát} = \frac{\int_0^{T_M} p_{CA}(t) dt}{\int_0^{T_M} p_{MP}(t) dt} \quad (3)$$

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.

2.2 Determinação da eficiência dinâmica de seguimento do ponto de máxima potência

A determinação da eficiência estática de MPPT é feita sob condições de regime permanente, em níveis discretos de irradiância, portanto sem considerar os efeitos que variações instantâneas da irradiância incidente no gerador fotovoltaico poderiam produzir no funcionamento do inversor. Como as variações de irradiância em dias com nuvens são aleatórias, 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. Algumas propostas para estes padrões foram apresentadas por Bower et al., 2004 e Haeblerlin et al., 2006. Haeblerlin et al., 2009, sugeriram 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 referida norma estabeleceu perfis de irradiância a serem programados no simulador de arranjos fotovoltaicos, os quais consistem em sequências de formato trapezoidal, com diferentes intensidades e taxas de variação, simulando distintas situações de irradiância variável ao longo do tempo.

Nos testes em regime dinâmico o inversor sob teste é submetido a dois ensaios simulando transições entre diferentes níveis de irradiância: entre baixa e média irradiância (100 e 500 W/m²) e entre média e alta irradiância (300 e 1000 W/m²) conforme os padrões mostrados na Fig. 1. O valor de irradiância de 1000 W/m² (G_{STC}) está associado à potência nominal de entrada do inversor. O simulador de arranjos fotovoltaicos é controlado com *scripts* específicos, utilizando curvas $I-V$ calculadas. Os testes dinâmicos são realizados apenas na tensão nominal do inversor e iniciam-se com um período de estabilização de cinco minutos (o qual não é computado nos resultados), seguido por sequências de rampas de irradiância ascendentes e descendentes, intercaladas por um novo período de estabilização a cada nova taxa de variação de irradiância. Os resultados são apresentados na forma de tabelas (como as Tabs. 1 e 2) contendo a taxa de variação de irradiância, o número de repetições e o valor de eficiência encontrado para cada uma das sequências.

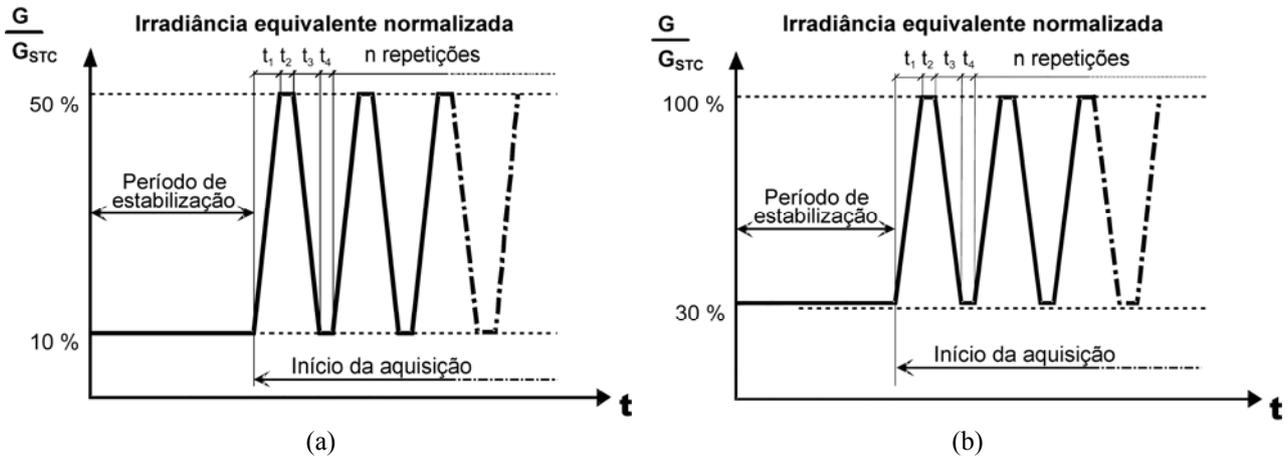


Figura 1 - Sequência de irradiâncias recomendada pela norma EN 50530:2010 para (a) transições entre baixa e média irradiância e (b) para transições entre média e alta irradiância (adaptado de CENELEC, 2010).

Tabela 1 – Modelo de tabela com as sequências de variação de irradiância e resultados do teste dinâmico de eficiência de MPPT: variações de irradiância entre 10 e 50% de G_{STC} (adaptado de CENELEC, 2010).

	De/para (W/m ²)	ΔG (W/m ²)					Período de estabilização (s)	
	100-500	400					300	
Índice i da sequência	Número de repetições	Taxa de variação (W/m ² /s)	Tempo de subida (t_1) (s)	Tempo de parada (t_2) (s)	Tempo de descida (t_3) (s)	Tempo de parada (t_4) (s)	Duração (s)	$\eta_{MPPTdin,i}$
1	2	0,5	800	10	800	10	3450	$\eta_{MPPTdin,1}$
2	2	1	400	10	400	10	1940	$\eta_{MPPTdin,2}$
3	3	2	200	10	200	10	1560	$\eta_{MPPTdin,3}$
4	4	3	133	10	133	10	1447	$\eta_{MPPTdin,4}$
5	6	5	80	10	80	10	1380	$\eta_{MPPTdin,5}$
6	8	7	57	10	57	10	1374	$\eta_{MPPTdin,6}$
7	10	10	40	10	40	10	1300	$\eta_{MPPTdin,7}$
8	10	14	29	10	29	10	1071	$\eta_{MPPTdin,8}$
9	10	20	20	10	20	10	900	$\eta_{MPPTdin,9}$
10	10	30	13	10	13	10	767	$\eta_{MPPTdin,10}$
11	10	50	8	10	8	10	660	$\eta_{MPPTdin,11}$
							Total	15939
								~4h30min

A eficiência dinâmica de seguimento do ponto de máxima potência pode ser calculada pela Eq. (4):

$$\eta_{MPPTdin} = \frac{\sum_i V_{CC,i} \cdot I_{CC,i} \cdot \Delta T}{\sum_i P_{MPsimi} \cdot \Delta T} \quad (4)$$

onde ΔT é o intervalo entre duas medidas subsequentes.

Tabela 2 – Modelo de tabela com as sequências de variação de irradiância e resultados do teste dinâmico de eficiência de MPPT: variações de irradiância entre 30 e 100 % de G_{STC} (adaptado de CENELEC, 2010).

	De/para (W/m ²)	ΔG (W/m ²)					Período de estabilização (s)	
	300-1000	700					300	
Índice <i>i</i> da sequência	Número de repetições	Taxa de variação (W/m ² /s)	Tempo de subida (<i>t</i> ₁) (s)	Tempo de parada (<i>t</i> ₂) (s)	Tempo de descida (<i>t</i> ₃) (s)	Tempo de parada (<i>t</i> ₄) (s)	Duração (s)	$\eta_{MPPTdin,i}$
1	10	10	70	10	70	10	1900	$\eta_{MPPTdin,1}$
2	10	14	50	10	50	10	1500	$\eta_{MPPTdin,2}$
3	10	20	35	10	35	10	1200	$\eta_{MPPTdin,3}$
4	10	30	23	10	23	10	967	$\eta_{MPPTdin,4}$
5	10	50	14	10	14	10	780	$\eta_{MPPTdin,5}$
6	10	100	7	10	7	10	640	$\eta_{MPPTdin,6}$
							Total	6787
								~2h

A média das eficiências dinâmicas de MPPT encontradas com os testes referidos nas Tabs. 1 e 2 é calculada pela Eq. (5):

$$\eta_{MPPTdin,med} = \frac{1}{N} \sum_i^N a_i \cdot \eta_{MPPTdin,i} \quad (5)$$

onde $\eta_{MPPTdin,i}$ é eficiência dinâmica de MPPT para cada sequência de testes

N é o número de sequências de testes

a_i é um fator de ponderação o qual, a menos que seja definido outro valor, é assumido como unitário.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DINÂMICA DE MPPT

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. 2. 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 (as quais não são consideradas neste trabalho, já que o cálculo das eficiências estática e dinâmica de MPPT envolve apenas grandezas em corrente contínua. A energia convertida pelo inversor é injetada na rede elétrica através do quadro de distribuição elétrica do Laboratório.

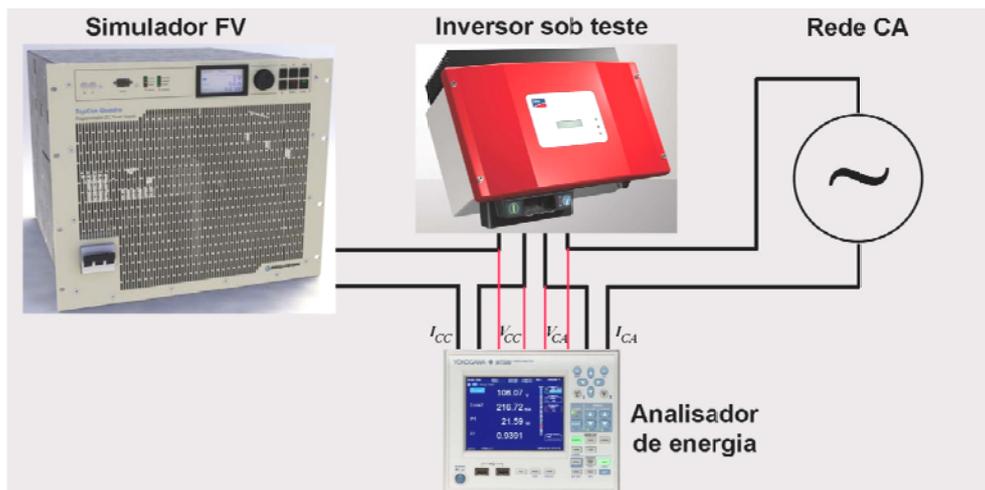


Figura 2 – Esquema da bancada de testes para o ensaio dos inversores.

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 (*SASControl*) 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. Maiores informações sobre a fonte Regatron TopCon Quadro e o seu *software* de controle, foram apresentadas em Prieb e Krenzinger, 2012.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho foram determinadas experimentalmente as eficiências dinâmicas de seguimento do ponto de máxima potência de seis inversores comerciais: SMA SB1100, SB1200, SB3800 e SB5000 (potências nominais de saída de 1000 W, 1200 W, 3800 W e 4600 W, fabricados pela SMA Solar Technologies AG (Alemanha); FRONIUS IG20, com potência nominal de saída de 1800 W, fabricado por Fronius International GmbH (Áustria) e MASTERVOLT QS2000, com potência nominal de saída de 1600 W, fabricado por Mastervolt International BV (Holanda). A Tab. 3 apresenta um resumo das características elétricas dos dois inversores, tais como fornecidas por seus fabricantes.

Tabela 3 – Características elétricas dos inversores ensaiados.

	SMA SB1100	SMA SB1200	SMA SB3800	SMA SB5000	FRONIUS IG20	MASTERVOLT QS2000
P_{CAnom} (W)	1000	1200	3800	4600	1800	1600
P_{CCnom} (W)	1100	1300	4040	4800	1940	1750
V_{CCnom} (V)	139	120	300	400	280	240
$V_{CCmáx}$ (V)	400	400	500	750	500	450
V_{MPmin} (V)	139	100	200	175	150	100
$V_{MPmáx}$ (V)	400	320	400	500	400	380

A seguir serão apresentados os resultados dos testes de eficiência dinâmica de seguimento de máxima potência dos inversores ensaiados. O simulador de arranjos fotovoltaicos foi programado para curvas características com fator de forma referente à tecnologia de silício cristalino, e com P_{MP} e V_{MP} correspondendo às respectivas potências e tensões nominais de entrada dos inversores. Os resultados dos ensaios considerando simulações de curvas características com células de filme fino não serão apresentados por serem muito semelhantes aos obtidos com células de silício cristalino.

As Tabs. 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de determinação da eficiência dinâmica de MPPT com variações entre baixa e média irradiância (100 e 500 W/m²) e entre média e alta irradiância (300 e 1000 W/m²) para módulos de silício cristalino, calculados conforme o procedimento descrito anteriormente. A última linha de cada tabela contém a média das eficiências encontradas para as diferentes taxas de variação de irradiância calculada conforme a Eq. (5).

Tabela 4 – Resultados de eficiência dinâmica de MPPT (variações de irradiância entre 10 a 50% G_{STC}) dos inversores SMA SB1100, SMA SB1200, SMA SB3800, SMA SB5000, FRONIUS IG20 e MASTERVOLT QS2000.

Índice i da sequência	dG/dt (W/m ² /s)	$\eta_{MPPTdin,i}$ (100-500 W/m ²)					
		SMA SB1100	SMA SB1200	SMA SB3800	SMA SB5000	FRONIUS IG20	MASTERVOLT QS2000
1	0,5	0,988	0,999	0,973	0,998	0,995	0,999
2	1	0,995	0,999	0,963	0,998	0,963	0,999
3	2	0,994	0,998	0,943	0,998	0,947	0,995
4	3	0,994	0,998	0,975	0,998	0,900	0,995
5	5	0,995	0,996	0,960	0,997	0,908	0,994
6	7	0,985	0,996	0,978	0,994	0,961	0,994
7	10	0,977	0,995	0,951	0,995	0,957	0,995
8	14	0,926	0,994	0,952	0,992	0,943	0,995
9	20	0,932	0,992	0,973	0,989	0,976	0,994
10	30	0,910	0,986	0,945	0,989	0,987	0,994
11	50	0,933	0,983	0,960	0,987	0,983	0,993
$\eta_{MPPTdin,med}$		0,966	0,994	0,961	0,994	0,956	0,995

Tabela 5 – Resultados de eficiência dinâmica de MPPT (variações de irradiância entre 30 a 1000% G_{STC}) dos inversores SMA SB1100, SMA SB1200, SMA SB3800, SMA SB5000, FRONIUS IG20 e MASTERVOLT QS2000.

Índice i da sequência	dG/dt (W/m ² /s)	$\eta_{MPPTdin,i}$ (300-1000 W/m ²)					
		SMA SB1100	SMA SB1200	SMA SB3800	SMA SB5000	FRONIUS IG20	MASTERVOLT QS2000
1	10	0,948	0,998	0,997	0,998	0,981	0,997
2	14	0,990	0,997	0,996	0,998	0,992	0,997
3	20	0,990	0,997	0,997	0,997	0,989	0,997
4	30	0,990	0,997	0,996	0,997	0,985	0,544
5	50	0,990	0,995	0,997	0,997	0,986	0,998
6	100	0,990	0,994	0,992	0,996	0,992	0,998
$\eta_{MPPTdin,med}$		0,983	0,996	0,996	0,997	0,988	0,922

As Figs. 10 e 11 apresentam graficamente os resultados das Tabs. 4 e 5, mostrando mais claramente a influência da taxa de variação de irradiância dG/dt sobre a eficiência dinâmica de MPPT. Na Fig. 10, em que são consideradas as variações entre 100 e 500 W/m², pode-se observar uma diversidade de comportamentos. Os inversores SMA SB1200 e SB5000 e o MASTERVOLT QS2000 apresentaram ótimo desempenho da eficiência dinâmica, com valores muito próximos da unidade para variações lentas de irradiância, com apenas uma leve degradação para variações mais rápidas. A eficiência dinâmica de MPPT do inversor SMA SB1100 apresentou valores elevados para variações lentas, mas com uma sensível degradação para taxas de variação de irradiância superiores a 5 W/m²/s. Os inversores SMA SB3800 e FRONIUS IG20 apresentaram comportamentos erráticos, evidenciando sérias deficiências em seus algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência. Os ensaios foram repetidos para estes dois inversores e os resultados foram praticamente idênticos.

Todos os inversores apresentaram melhor desempenho nos ensaios com variações de irradiância entre 300 e 1000 W/m² (Fig. 11), com destaque para o SMA SB1200, SMA SB3800 e SMA SB5000, os quais apresentaram eficiências dinâmicas de MPPT muito próximas à unidade. A eficiência de seguimento do SMA SB1100 manteve-se em 99 % para taxas de variação de irradiância acima de 10 W/m²/s. O inversor MASTERVOLT QS2000 também teve um excelente comportamento para todas as taxas de variação de irradiância testadas, exceto 30 W/m²/s, quando a eficiência chegou a 54 %. Este inversor foi ensaiado mais uma vez, com resultados semelhantes, o que sugere um algoritmo de seguimento com um grave problema localizado.

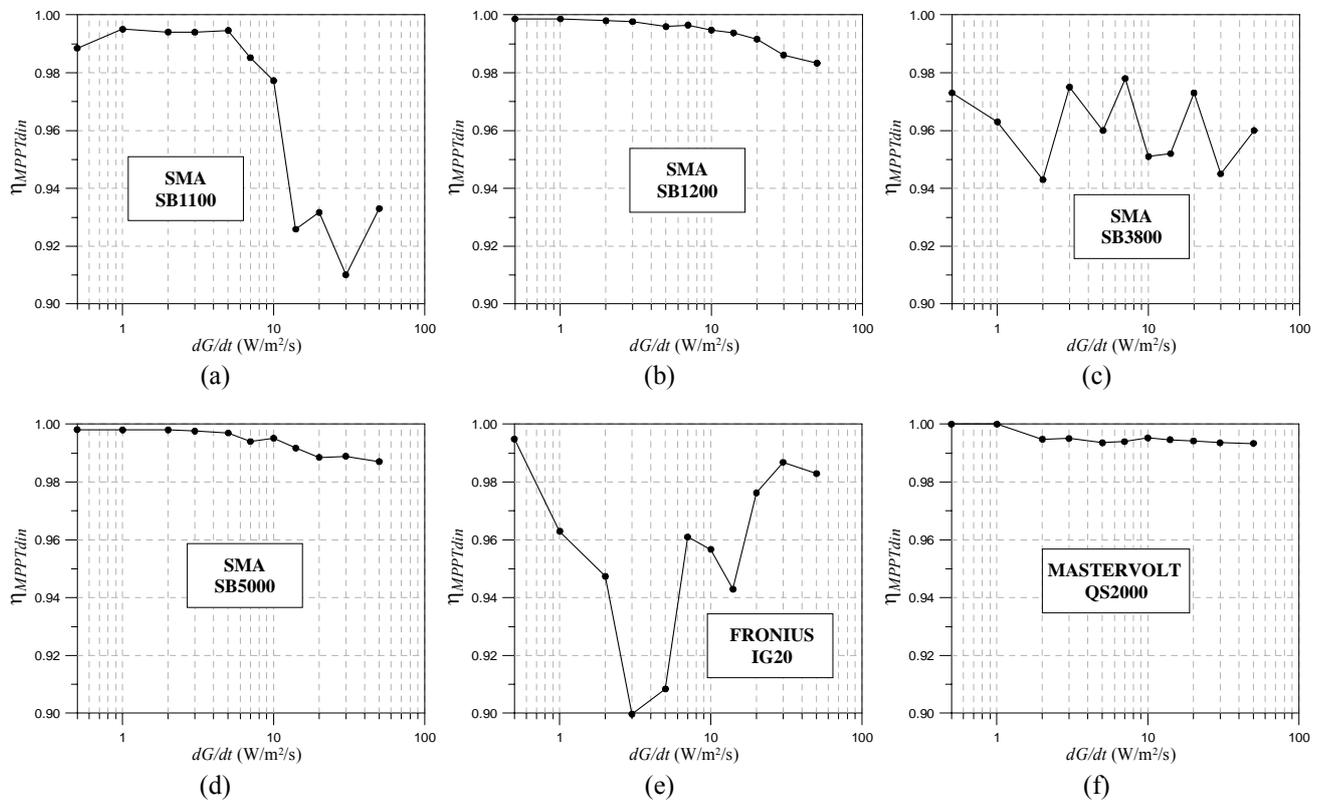


Figura 10 – Variação da eficiência dinâmica de MPPT com as taxas de variação de irradiância das sequências da Tab. 4, relativas aos inversores SMA SB1100 (a), SMA SB1200 (b), SMA SB3800 (c), SMA SB5000 (d), FRONIUS IG20 (e) e MASTERVOLT QS2000 (f), com variações de irradiância entre 100 e 500 W/m².

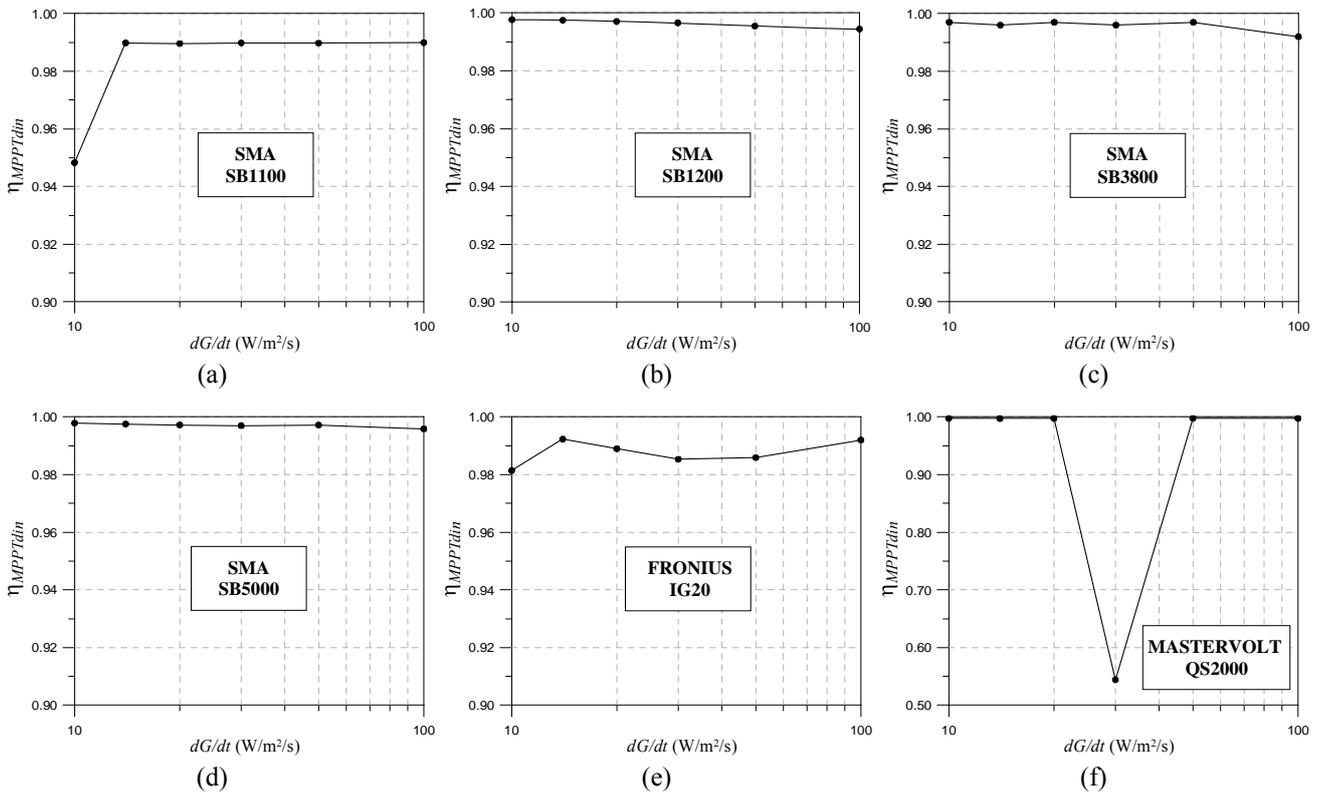


Figura 11 – Variação da eficiência dinâmica de MPPT com as taxas de variação de irradiância das seqüências da Tab. 5, relativas aos inversores SMA SB1100 (a), SMA SB1200 (b), SMA SB3800 (c), SMA SB5000 (d), FRONIUS IG20 (e) e MASTERVOLT QS2000 (f), com variações de irradiância entre 300 e 1000 W/m².

Cabe salientar que apenas os inversores SMA SB1200 e SB5000, fabricados em 2013, são posteriores à publicação da norma *EN 50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters* (os demais foram fabricados entre 2005 e 2007). Pela comparação dos resultados dos inversores SMA SB1100 e do seu sucessor SB1200 (praticamente com o mesmo *hardware* do SB1100), percebe-se uma notável evolução em termos de eficiência de seguimento do ponto de máxima potência. É razoável supor que essa evolução seja, pelo menos parte, fruto da busca por parte do fabricante em adequar o seu produto à nova norma.

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 dinâmicas de seguimento de máxima potência seis 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.

A aplicação das seqüências de irradiância propostas pela referida norma para a determinação da eficiência dinâmica do seguimento de máxima potência mostrou-se uma ferramenta muito útil na detecção de eventuais deficiências no comportamento do seguidor do ponto de máxima potência de inversores. A análise dos resultados dos ensaios realizados sugere que o desafio aos projetistas envolvidos na programação de algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência é desenvolver um algoritmo capaz de alcançar um bom desempenho nas três condições de teste: ensaios com irradiância constante (eficiência estática de MPPT), ensaios de eficiência dinâmica de MPPT com variações entre média e baixa irradiância e ensaios de eficiência dinâmica de MPPT com variações entre média e alta irradiância.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

Baumgartner, F.P., 2005. Euro Realo Inverter Efficiency: DC-Voltage Dependency, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, v. CD-ROM, Barcelona, Espanha.

- Baumgartner, F. P., Schmidt, H., Burger, B., Bründlinger, R., Häberlin, H., Zehner M., 2007. Status and Relevance of the DC Voltage Dependency of the Inverter Efficiency, 22nd EPVSEC, v. CD-ROM, Milão, Itália.
- Bletterie, B., Bründlinger, R., Häberlin, H., Baumgartner, F.P., Schmidt, H., Burger, B., Klein, G., Alonso-Abella, M., 2008. Redefinition of the European Efficiency, 23rd EPVSEC, v. CD-ROM, Valência, Espanha.
- Bower, B., Whitaker, C., Erdman, W., Behnke, M., Fitzgerald, M., 2004. Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems, Sandia Laboratories.
- CENELEC, 2010. EN 50530:2010 Overall Efficiency of Photovoltaic Inverters, CENELEC, Bélgica.
- Haeberlin, H., Schaerf, P., 2009. New Procedure for Measuring Dynamic MPP-Tracking Efficiency at Grid-Connected PV Inverters, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburgo, Alemanha.
- Haeberlin, H., Borgna, L., Kaempfer, M., Zwahlen, U., 2005. Total Efficiency η_{TOT} - A New Quantity for Better Characterization of Grid-connected PV Inverters, 20th EPVSEC, v. CD-ROM, Barcelona, Espanha.
- Haeberlin, H., Borgna, L., Kämpfer, M., Zwahlen, U., 2006. Measurement of Dynamic MPP Tracking Efficiency at Grid-Connected PV Inverters, 21st EPVSEC, v. CD-ROM, Dresden, Alemanha.
- Prieb, C., Krenzinger, A., 2012. Determinação Experimental da Eficiência de Inversores para SFCR com o Uso de Simuladores de Arranjos Fotovoltaicos, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, v. CD-ROM, São Paulo.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DYNAMIC MPPT 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 dynamic maximum power point tracking efficiency of grid-connected inverters. The results for the dynamic MPPT efficiency of six 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, MPPT Efficiency*