A CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA BRASILEIRA DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Aimé Pinto – afpinto@iee.usp.br
José César de Souza Almeida Neto – jose.cesar.neto@usp.br
Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br
Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente

Resumo. *Este trabalho apresenta uma proposta para quantificar a eficiência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil. A eficiências europeia e CEC têm sido utilizadas como base de comparação entre inversores, mas os coeficientes de ponderação utilizados em seus cálculos não refletem as características da incidência solar no país. Nesse sentido, este trabalho propõe uma revisão na maneira de calcular a eficiência ponderada, considerando as características brasileiras de incidência solar, atualizando o conceito da Eficiência Brasileira para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Inversores, Conexão à Rede*

1. INTRODUÇÃO

A partir da Audiência Pública ANEEL 042/2011 foram construídas as bases para Resolução Normativa N° 482/2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Com esta resolução, com o crescente aumento das tarifas de energia e com o atual cenário de energético de escassez de água, a popularidade e a utilização de sistemas de microgeração a partir de fonte solar fotovoltaica tem crescido substancialmente.

Sendo os inversores, nestes sistemas de geração, os equipamentos chaves referentes à qualidade de energia e proteções, o INMETRO atualizou a Portaria N° 04/2011 através da Portaria N° 357/2014 para incluir os inversores de conexão à rede na avaliação de conformidade com as especificações mínimas de operação, as quais são regidas principalmente pelas normativas ABNT/NBR 16149 e ABNT/NBR 16150.

Apesar dos inversores atualmente participarem de um controle de qualidade, ainda falta um parâmetro de comparação para usuários leigos utilizarem para decidir qual equipamento comprar. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do INMETRO já é utilizada em outros equipamentos para compará-los segundo sua eficiência energética. Como a ENCE ainda não engloba os inversores de conexão à rede, apesar de sua inclusão estar sendo discutida, este trabalho propõe uma revisão na maneira de calcular a eficiência, considerando as características brasileiras de incidência solar, criando uma forma simplificada de qualificação de inversores a qual poderá ser utilizada no Programa Brasileiro de Etiquetagem.

A eficiência é o principal parâmetro de comparação no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem, coordenado pelo Inmetro, o qual fornece informações sobre o desempenho dos produtos através de ensaios e da ENCE. Apesar de tal importância, não há um consenso quanto ao cálculo da eficiência de um inversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Mesmo não havendo consenso quanto a uma metodologia de cálculo da eficiência de um inversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, existem várias metodologias para tal fim. As primeiras foram desenvolvidas visando o mercado europeu, como é o caso da eficiência europeia representada pela Eq. (1) (Nickel, 2004; Valentini *et al.,* 2008).

$$\eta_{EURO} = 0{,}03\eta_{5\%} + 0{,}06\eta_{10\%} + 0{,}13\eta_{20\%} + 0{,}48\eta_{50\%} + 0{,}20\eta_{100\%} \quad (1)$$

Sendo $\eta_{i\%}$ a eficiência de conversão a i% de carregamento do inversor.

Após o grande crescimento da utilização de sistemas fotovoltaicos devidos aos incentivos, eficiência europeia ganhou bastante popularidade no setor da energia solar, porém ela não caracterizava bem o perfil de carregamento de locais com grande radiação, uma vez que ela foi desenvolvida baseando-se no perfil de radiação da cidade alemã de Trier. Neste sentido, a Comissão de Energia da Califórnia (CEC) criou a eficiência CEC baseando-se no perfil de radiação solar da California, apresentada na Eq. (2) (Rampinelli *et al.,* 2010).

$$\eta_{CEC} = 0{,}04\eta_{10\%} + 0{,}05\eta_{20\%} + 0{,}12\eta_{30\%} + 0{,}21\eta_{50\%} + 0{,}53\eta_{75\%} + 0{,}05\eta_{100\%} \quad (2)$$

A eficiência CEC, assim como a europeia, é dependenteapenas do carregamento do inversor, porém sabe-se que a tensão de operação também tem grande influência na eficiência Devido a essa deficiência, a eficiência PHOTON foi criada pela revista Photon International a fim de suprir essa limitação.

A eficiência PHOTON é uma eficiência ponderada como a europeia e a CEC, porém os valores das eficiências em cada carregamento ($\eta_{5\%}$, $\eta_{10\%}$, $\eta_{20\%}$, $\eta_{30\%}$, $\eta_{50\%}$, $\eta_{100\%}$) são médias aritméticas da eficiência total (eficiência de conversão e de SPMP- Seguimento do Ponto de Máxima Potência) em 20 diferentes tensões de entrada na faixa operacional do SPMP. As Eq. (3) e (4) (Photon Laboratory, 2010) apresentam as fórmulas da eficiência PHOTON para perfis de média e alta irradiância, respectivamente.

$$\eta_{\mathrm{PHOTONMédia}} = 0{,}03\eta_{\mathrm{MED5\%}} + 0{,}06\eta_{\mathrm{MED10\%}} + 0{,}13\eta_{\mathrm{MED20\%}} + 0{,}10\eta_{\mathrm{MED30\%}} + 0{,}48\eta_{\mathrm{MED50\%}} + 0{,}20\eta_{\mathrm{MED100\%}} \quad (3)$$

$$\eta_{\mathrm{PHOTONAlta}} = 0{,}04\eta_{\mathrm{MED10\%}} + 0{,}05\eta_{\mathrm{MED20\%}} + 0{,}12\eta_{\mathrm{MED30\%}} + 0{,}21\eta_{\mathrm{MED50\%}} + 0{,}53\eta_{\mathrm{MED75\%}} + 0{,}05\eta_{\mathrm{MED100\%}} \quad (4)$$

Sendo que $\eta_{\mathrm{MEDk\%}}$ é a eficiência total média (média aritmética entre as eficiências totais para 20 tensões de entrada) a k% de carregamento do inversor.

Mesmo a eficiência PHOTON sendo uma metodologia bastante completa, ela utiliza os coeficientes de ponderação da eficiência europeia e CEC, o que não caracteriza bem o funcionamento dos inversores no Brasil. Nesse sentido, Pinto *et. al*. (2011) propôs a criação da eficiência Brasileira, a qual foi baseada no perfil de radiação solar médio das capitais brasileiras e na dependência da tensão de entrada e da eficiência de SPMP, sendo representada pela Eq .(5).

$$\eta_{\mathrm{BR}} = 0{,}02\eta_{\mathrm{TMED10\%}} + 0{,}02\eta_{\mathrm{TMED20\%}} + 0{,}04\eta_{\mathrm{TMED30\%}} + 0{,}12\eta_{\mathrm{TMED50\%}} + 0{,}32\eta_{\mathrm{TMED75\%}} + 0{,}48\eta_{\mathrm{TMED100\%}} \quad (5)$$

Sendo que $\eta_{\mathrm{TMEDk\%}}$ é a eficiência total média (média aritmética entre as eficiências totais para 10 tensões de entrada) a k% de carregamento do inversor.

Apesar da eficiência Brasileira proposta por Pinto *et. al*. (2011) ser mais adequada para a utilização no Brasil que outras metodologias, sua aplicação se mostrou de alto custo, uma vez que envolveu uma grande quantidade de ensaios, e de execução demorada. Devido ao alto custo e tempo de execução, esta metodologia não foi considerada adequada para a inclusão no âmbito do PBE, uma vez que o programa visa o atendimento ao publico em geral e, portanto, a sua aplicação deve impactar o mínimo possível nos custos dos equipamentos oferecidos à sociedade. Nesse sentido, este trabalho propõe uma revisão da eficiência ponderada chamada Eficiência Brasileira proposta por Pinto *et. al*. (2011), de forma a manter suas características básicas, porém criando uma metodologia de aplicação viável aos laboratórios participantes do PBE.

2. CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS INVERSORES

A eficiência do inversor não é caracterizada apenas pela razão entre a potência de entrada ($P_{c.c.}$) e de saída ($P_{c.a.}$), ela envolve outros fatores como a tensão de entrada e o SPMP. Diversos conceitos podem ser compreendidos sob o termo geral de eficiência: eficiência de SPMP, de conversão e total, as quais são descritas a seguir:

A eficiência de conversão, Eq. (5), representa a eficácia de transformação de corrente contínua em alternada a uma dada tensão de entrada e potência c.c. de entrada em um período de integração T definido.

$$\eta_{\mathrm{CONV}} = \frac{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{P_{c.a.}dt}}{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{P_{c.cc}dt}} \quad (6)$$

A eficiência de SPMP, Eq. (6), representa a capacidade do inversor de extrair a máxima potência disponível do gerador FV (P_{PMP})para uma dada condição de irradiância e temperatura.

$$\eta_{\mathrm{SPMP}} = \frac{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{P_{c.c.}dt}}{\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{P_{PMP}dt}} \quad (7)$$

A eficiência de SPMP pode ser caracterizada de duas formas, uma com P_{PMP} constante e outra variável ao longo do tempo, a qual chamamos de eficiência estática e dinâmica respectivamente. A eficiência dinâmica de SPMP contabiliza a precisão do inversor de operar no ponto de máxima potência do gerador FV com variações de irradiância e temperatura. Apesar do conceito ser claro, existe uma grande dificuldade em se definir uma variação padrão de irradiância. Na literatura internacional, alguns trabalhos importantes foram publicados sobre este tema, podendo-se citar Bower et al. (2004), Häberlin e Schärf, (2009), Häberlin et al. (2006), Henze et al. (2009) e Valentini et al., (2008). Já a eficiência estática de SPMP descreve a precisão do inversor de operar no ponto de máxima potência do gerador FV com irradiância e temperatura fixas.

A eficiência total representa o conjunto da eficiência de conversão com a de SPMP e pode ser calculada através da equação 8.

$$\eta_T = \eta_{conv} \times \eta_{SPMP} = \frac{\int_0^T P_{c.a.} dt}{\int_0^T P_{PMP} dt} \quad (8)$$

3. ANALISE DO PERFIL DE RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

Como os coeficientes de ponderação da eficiência são derivados dos perfis de radiação solar e a redução da quantidade de coeficientes é uma das formas de simplificação da metodologia, os passos realizados por Pinto *et. al*. (2011) foram repetidos e analisados a fim de se verificar onde se poderia reduzir a quantidade de coeficientes.

Dados de irradiação solar no plano inclinado (inclinação igual à latitude local), obtidos do Projeto SoDa - Solar Radiation Project (Projeto SoDa, 2015),para o ano de 2005, com um minuto de resolução e para todas as capitais brasileiras e Distrito Federal, foram utilizados.

A partir destes dados foi calculada a irradiância média regional e nacional para cada minuto do ano. Os dados de irradiância média foram separados em faixas (000-100, 100-200, 200-300, 300-500, 500-750 e >750 W/m²) e, em seguida, foi calculada a participação de cada uma na irradiação anual, conforme proposto

A Fig. 1 mostra a participação de cada faixa de irradiância na irradiação anual para cada região do Brasil e para a média nacional e a Fig. 2 mostra a participação de cada faixa de irradiância na irradiação anual para a média nacional e a distribuição de frequência da irradiância para essas faixas.

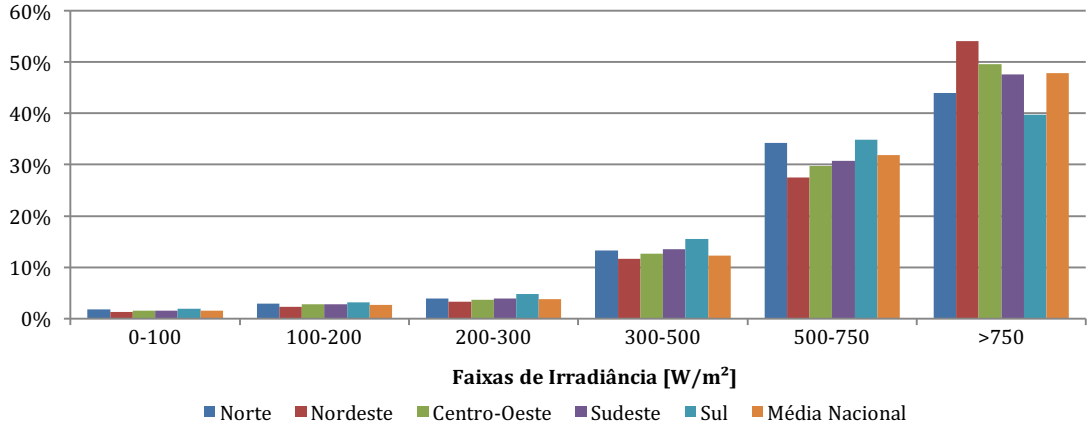

Figura 1 – Participação na irradiação anual por faixa de irradiância para as regiões brasileiras e para a média nacional.

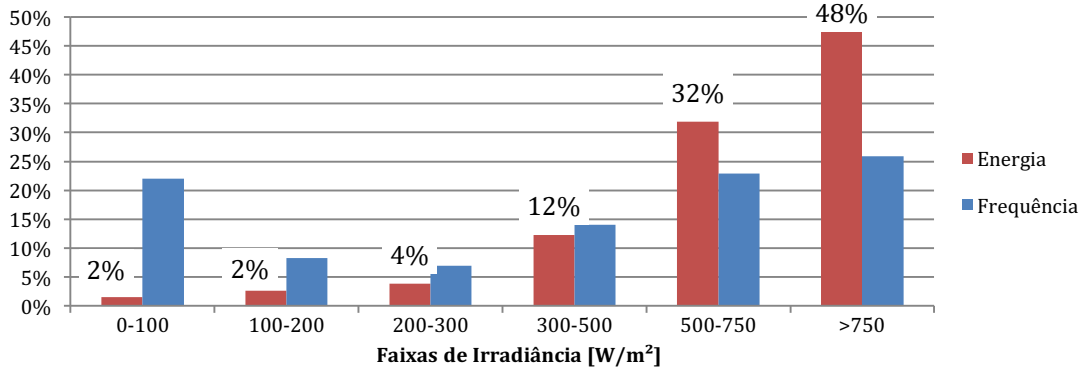

Figura 2 – Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas.

Analisando as Fig. 1 e 2 pode-se observar que, apesar da baixa frequência em altas irradiâncias, mais de 40% da irradiação anual é proveniente de irradiâncias maiores que 750 W/m² e mais de 70% da irradiação provém de irradiâncias superiores a 500 W/m².

Como a participação da faixa de irradiância de 100-200 W/m^2 é pequena se comparada com as outras faixas de maior potência, esta foi reunida à faixa seguinte (200-300) a fim de reduzir a quantidade de medidas e consequentemente o custo do ensaio.

4. EFICIÊNCIA BRASILEIRA

A Eficiência Brasileira de um inversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede é uma média ponderada que leva em consideração a dependência da tensão de entrada, a eficiência do SPMP e o perfil de radiação solar brasileiro. Tal eficiência já foi definida em Pinto *et. al*. (2011). Porém, a sua aplicação se mostrou inviável, uma vez que a grande quantidade de ensaios demandava uma grande quantidade de tempo. Nesse sentido, este artigo faz uma revisão em sua definição de forma a simplificar os ensaios reduzindo o tempo e o custo de forma significativa, tornando esse novo método uma alternativa viável a ser aplicada no âmbito de um processo de etiquetagem.

Em Pinto *et. al*. (2011), as tensões do SPMP e os carregamento do inversor são definidos em 10 e 6 pontos, respectivamente, necessitando, dessa forma, simular 60 diferentes curvas de um gerador FV. Nesta revisão, será adotado apenas uma tensão de SPMP (tensão média da faixa de SPMP) e 5 pontos de carregamento, necessitando simular apenas 5 curvas de um gerador FV.

Em Pinto *et. al*. (2011), os pontos de carregamento devem ser sempre 10, 20, 30, 50, 75 e 100% da potência nominal de saída. Nesta revisão, os pontos a serem utilizados devem ser sempre 10, 30, 50, 75 e 100% da potência nominal de saída. Tal redução está relacionada à junção das faixas de irradiância proposta na seção 3.

O inversor é ensaiado com cada uma das 5 curvas do gerador FV a fim de se obter a eficiência total para cada ponto de carregamento do inversor a uma tensão de entrada (V_{PMP}) específica (tensão média da faixa de SPMP), ou seja, haverá 5 valores de eficiência resultantes.

Por fim, a Eficiência Brasileira é calculada multiplicando as eficiências totais a um dado carregamento pelo coeficiente de ponderação correspondente. Tal procedimento é sintetizado na a Eq. (9) que apresenta o novo cálculo da eficiência. Além disso, a Tab. 1 mostra os novos coeficientes de ponderação com as eficiências correspondentes.

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação da Eficiência Brasileira.

Coeficientes de Ponderação	Eficiência total média
0,02	$\eta_{TMED10\%}$
0,06	$\eta_{TMED30\%}$
0,12	$\eta_{TMED50\%}$
0,32	$\eta_{TMED75\%}$
0,48	$\eta_{TMED100\%}$

$$\eta_{BR} = 0{,}02\eta_{TMED10\%} + 0{,}06\eta_{TMED30\%} + 0{,}12\eta_{TMED50\%} + 0{,}32\eta_{TMED75\%} + 0{,}48\eta_{TMED100\%} \quad (9)$$

Os coeficientes de ponderação são baseados no perfil de radiação solar no Brasil, levando-se em consideração a atualização proposta neste artigo, e representam a contribuição de cada faixa de irradiância da média nacional para a irradiação anual, assumindo que em 1.000 W/m² tem-se a potência nominal de saída do inversor. A Fig. 3 ilustra os pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento e a representação gráfica dos coeficientes de ponderação da Eficiência Brasileira, sendo os círculos azuis sobre a curva os pontos de eficiências totais médias nos carregamentos indicados ($\eta_{10\%}$, $\eta_{30\%}$, $\eta_{50\%}$, $\eta_{75\%}$, $\eta_{100\%}$) e as barras vermelhas a participação de cada faixa de irradiância da média nacional na irradiação anual.

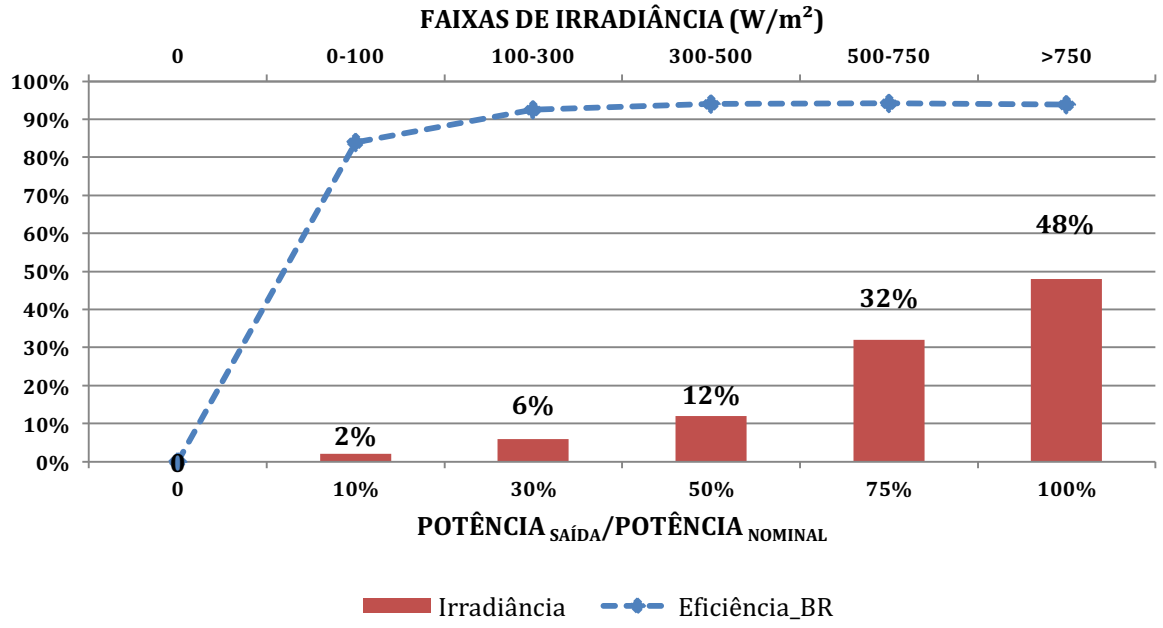

Figura 3 – Ilustração dos pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento utilizados no cálculo da Eficiência Brasileira.

Como exemplo de aplicabilidade e comparação, o cálculo da Eficiência Brasileira utilizando a metodologia proposta neste artigo, foi aplicado em 5 inversores presentes no mercado nacional, resultando nos valores mostrados na Tab. 2. Para a realização dos ensaios, utilizou-se um simulador de gerador fotovoltaico modelo TopCon Quadro do fabricante Regatron, um simulador de rede FCAMQ 1500-33-15 do fabricante Supplier e um analisador de energia WT 3000 do fabricante Yokogawa.

Tabela 2 – Resultado do cálculo da Eficiência Brasileira em alguns inversores.

Inversor	Potência Nominal	ETA_REV	Classe
1	4,6 kW	96,08%	A
2	4,6 kW	86,50%	E
3	3,0 kW	95,42%	B
4	1,5 kW	94,91%	C
5	1,2 kW	89,53%	E

Analisando-se os resultados da Tab. 2 podemos perceber que há uma grande variação entre as eficiências dos inversores, com isso podemos perceber a importância de um parâmetro de comparação, o qual deve ser simples e de fácil aplicação.

Com a nova metodologia, a quantidade de ensaios necessários para o cálculo da eficiência reduziu de 60 para apenas 5 ensaios diminuindo drasticamente o tempo, porém mantendo conteúdo suficiente para servir como base de comparação e tornando viável a sua incorporação ao Programa Brasileiro de Etiquetagem.

Além dos valores da eficiência, a Tab. 2 também traz um item chamado classe, que nada mais é do que uma nota atribuída de acordo com a eficiência do equipamento, a qual é imputada conforme a Tab. 3.

Vale ressaltar que as classes de eficiência não fazem distinção entre inversores com e sem transformador, pois uma vez que o intuito das classes é a comparação da eficiência energética, os inversores com transformador, cuja eficiência é menor, não deveriam ter uma classificação exclusiva, mas devem ser comparados igualmente aos outros inversores.

Tabela 3 – Proposta de qualificação dos inversores conforme a Eficiência Brasileira.

Classe de Eficiência Energética (Eficiência Brasileira)
$A > 96\%$
$95\% < B \leq 96\%$
$94\% < C \leq 95\%$
$93\% < D \leq 94\%$
$E \leq 93\%$

Dessa forma, a Eficiência Brasileira é um bom parâmetro para comparar a eficiência de inversores que operam no Brasil, e deveria se adotada pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem, oferecendo assim informações de interesse para o consumidor, particularmente aos que estão instalando sistemas de micro e mini geração fotovoltaica. A Fig. 4 apresenta a etiqueta que poderá ser adotada no Programa Brasileiro de Etiquetagem para inversores.

Figura 4 – Proposta de Etiqueta do Programa Brasileiro de Etiquetagem de inversores para SFCR.

5. CONCLUSÕES

A proposta de revisão no cálculo da Eficiência Brasileira proporciona uma redução de 92 % na quantidade de medidas necessárias, levando a uma redução no tempo e no custo de ensaio. A implantação da Eficiência Brasileira no Programa Brasileiro de Etiquetagem de inversores, além de proporcionar um elemento objetivo de comparação entre produtos, irá incentivar a adoção de equipamentos eficientes

Agradecimentos

Este artigo contou com o apoio de recursos oriundos do CNPq, CAPES e do projeto P&D ANEEL N° PD-0068-0029/2011 – Desenvolvimento de competências e avaliação de arranjos técnicos e comerciais em geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

REFERÊNCIAS

Nickel, J., 2004. On the trail of Euro-Eta: The origins of the concept of a European efficiency for inverters. Photon International, 6, 50-53.

Valentini, M., Raducu, A., Sera, D., Teodorescu, R., 2008 PV inverter test setup for European efficiency, static and dynamic MPPT efficiency evaluation. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 11th International Conference, 433-438.

Rampinelli, A., Krenzinger ,A., Romero, F., 2010. Análise de características de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede em função da tensão de entrada. III Congresso Brasileiro de Energia Solar

Photon Laboratory, 2010. Photon, La revista de fotovoltaica, 129-130.

Pinto, A., Zilles, R., Almeida, M., 2011. Eficiência Brasileira de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 15, pp. 9-15.

Bower, W., Whitaker, C., Erdman, W., Behnke, M., Fitzgerald, M., 2004. Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected PV systems. Sandia National Laboratories.

Häberlin, H., Schärf, P., 2009. New procedure for measuring dynamic MPP-tracking efficiency at grid-connected PV inverters. Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3631-3637.

Häberlin, H., Borgna, L., Kaempfer, M., Zwahlen, U., 2006. Measurement of dynamic MPP-tracking efficiency at grid-connected PV inverters. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference

Henze, N., Bründlinger, R., Härberlin, H., Burguer, B., Bergmann, A., Baumgartner, F., 2009. prEN 50530 - The new european standard for performance characterisation of PV inverters. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3105-3109.

Projeto SoDa. Disponível em http://www.soda-is.com/eng/index.html, acessado em 08/07/2015.

CHARACTERIZATION OF BRAZILIAN EFFICIENCY FOR PHOTOVOLTAIC GRID CONNECTION INVERTERS

Abstract. *This paper presents a proposition of quantifying grid connected PV inverters efficiency in Brazil. European and CEC Efficiencies have been used as comparison basis between inverters, but the weighting factors used on their calculations do not reflect the characteristics of Brazilian solar incidence. In this sense, this paper proposes an*

improvement in the way of calculating a weighted efficiency, considering the characteristics of Brazilian solar incidence, updating the concept of Brazilian Efficiency for PV grid-connected inverters.

***Key words**: Solar Energy, Inverter, Grid Connection*