

EFICIÊNCIA BRASILEIRA DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

A. Pinto, R. Zilles, M. Almeida

Instituto de Eletrotécnica e Energia – Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto 1289, CEP 05508-010, São Paulo, Brasil
Tel. 11 3091-2656 - e-mail: afpinto@iee.usp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma proposta para quantificar a eficiência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil. As eficiências européia 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 e elas não consideram a dependência da tensão de entrada e a eficiência de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP). Nesse sentido, este trabalho propõe uma nova maneira de calcular a eficiência ponderada, considerando a dependência da tensão de entrada, a eficiência de SPMP e as características brasileiras de incidência solar, criando o conceito da Eficiência Brasileira para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Palavras chaves: inversores, eficiência, conexão à rede, energia solar.

INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) têm sido utilizados com mais frequência que nunca. Mesmo no Brasil, onde não há programas de “feed-in”, programa de incentivo à energias renováveis que remunera o produtor com tarifas superiores aos valores do kWh exercido pelas distribuidoras, a potência fotovoltaica (FV) instalada (figura 1) cresce de forma exponencial.

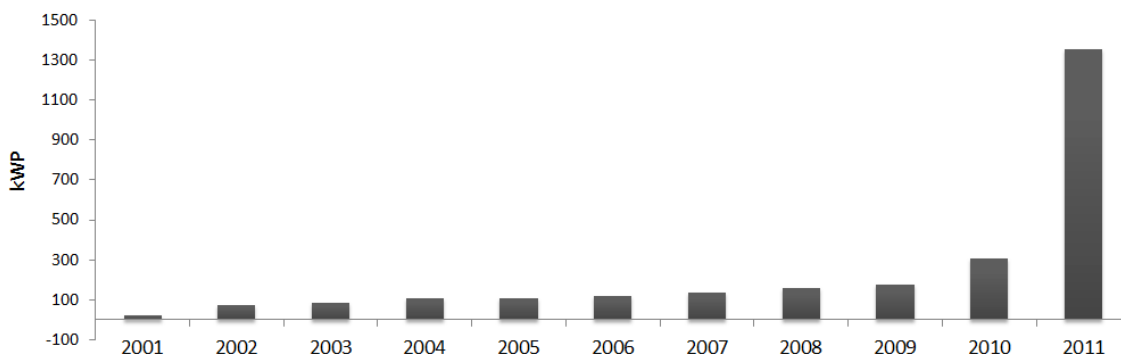


Figura 1: Potência fotovoltaica instalada acumulada com sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil. Fonte: Elaboração própria.

Apesar do crescimento acentuado da utilização de SFCR, a potência FV instalada com estes sistemas ainda é bastante reduzida no país. Para que esse crescimento se torne expressivo e a energia solar FV tenha maior participação na matriz elétrica brasileira é necessário o desenvolvimento de iniciativas que estimulem a utilização dessa fonte de energia. Nesse sentido, está em andamento a iniciativa governamental através do projeto FINEP/FUSP 1545/10 “Desenvolvimento de Competências em Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Baixa Tensão”, que consiste na implantação de um projeto piloto demonstrativo de 120 telhados fotovoltaicos que tem por objetivo analisar a inserção dos SFCR em unidades consumidoras de baixa tensão.

No que tange aos requerimentos técnicos de qualidade, proteção e segurança, apesar de já haver um procedimento de etiquetagem e qualificação de equipamentos de sistemas fotovoltaicos: Portaria INMETRO/MDIC Nº 04 de 04/01/2011 Regulamento de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (Módulo, Controlador de Carga, Inversor e Bateria), o inversor CC/CA utilizado em SFCR não está contemplado nos procedimentos de avaliação de conformidade dessa portaria. Nesse sentido, este trabalho propõe uma forma de qualificar inversores para SFCR, com base na eficiência, para futura inclusão no Regulamento de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

A eficiência é um dos critérios mais importantes em termos de qualificação, pois, através dela, equipamentos de mesmas características (potência, tensão de entrada, etc.) podem ser comparados. Apesar de tal importância, não há um consenso quanto ao cálculo da eficiência de um inversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

O manual dos inversores geralmente apresenta curvas de eficiência x carregamento para 3 tensões de entrada, uma para a eficiência máxima e outras duas nas tensões limites da faixa de operação do seguimento do ponto de máxima potência (SPMP). Além disso, normalmente são apresentadas as eficiências máxima, européia e CEC.

Para comparar os inversores, sem utilizar apenas a eficiência máxima que estes podem alcançar, mas levando em consideração o fato de que o inversor não funciona todo o tempo na potência nominal, na década de 90 foi introduzido o conceito de eficiência européia, a qual representa a eficiência do inversor sobre diversos carregamentos. A eficiência européia é uma média ponderada representada pela equação 1 (Nickel, 2004; Valentini et al., 2008). A figura 2 ilustra os pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento utilizados no cálculo da equação 1, sendo os círculos azuis sobre a curva os pontos de eficiência nos carregamentos indicados ($\eta_{5\%}$, $\eta_{10\%}$, $\eta_{20\%}$, $\eta_{30\%}$, $\eta_{50\%}$, $\eta_{100\%}$) e as barras vermelhas os coeficientes de ponderação relacionados a cada carregamento e sua participação no valor total da eficiência européia. Os coeficientes de ponderação são associados ao perfil de radiação solar de uma região específica da Alemanha (cidade de Trier) e não dizem respeito à dependência da tensão de entrada.

$$\eta_{EURO} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,10\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,20\eta_{100\%} \quad (1)$$

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

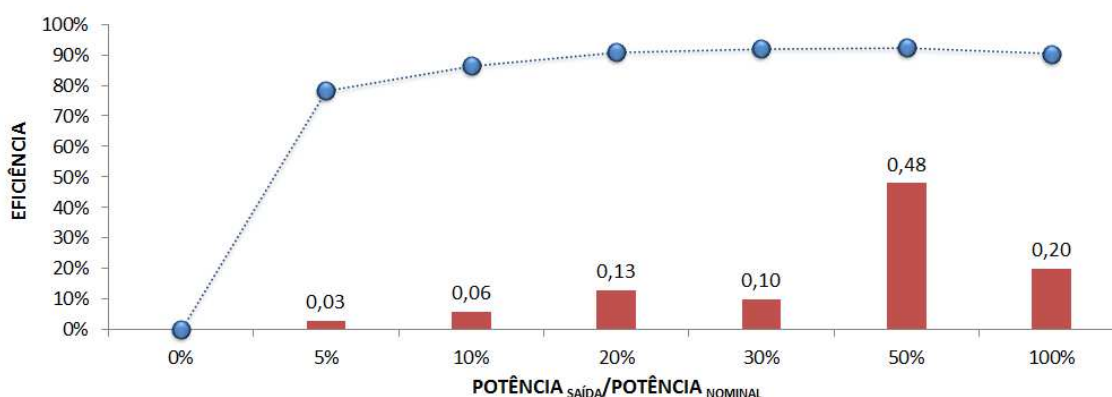


Figura 2: Ilustração dos pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento utilizados no cálculo da eficiência européia.

Apesar da eficiência européia ter várias limitações, ela representa a eficiência do inversor melhor que a eficiência máxima, porém relacionada a um perfil de baixa irradiância. Isso pode ser observado na equação 1 pelo fato de que os coeficientes de ponderação para os carregamentos de até 50% representam 80% do valor total.

A fim de caracterizar um inversor para o perfil de radiação solar da Califórnia (alto nível de irradiância), a Comissão de Energia da Califórnia (CEC) criou a eficiência CEC, a qual também é uma média ponderada das eficiências em diversos carregamentos de um inversor, apresentada na equação 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 européia, considera a eficiência do inversor dependente apenas do carregamento. Devido a essa deficiência, diversas formas de calcular a eficiência têm sido propostas, e dentre elas destaca-se a eficiência PHOTON, a qual considera o carregamento, a tensão de entrada e o SPMP.

A eficiência PHOTON, proposta pela revista Photon International, é uma eficiência ponderada como a européia 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) em 20 diferentes tensões de entrada na faixa operacional do SPMP. As equações 3 e 4 (Photon Laboratory, 2010) apresentam as fórmulas da eficiência PHOTON para perfis de média e alta irradiância, respectivamente.

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

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

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

Apesar da eficiência PHOTON oferecer uma opção mais adequada para comparar inversores, ela utiliza os coeficientes de ponderação da eficiência européia e CEC, o que não caracteriza bem o funcionamento dos inversores no Brasil, pois como será visto no decorrer deste trabalho, a frequência de carregamentos superiores à 75%, para o Brasil, tem valor significativo em relação às outras faixas de carregamento diferentemente das eficiências CEC e européia. Nesse sentido, este trabalho propõe uma nova eficiência ponderada, a Eficiência Brasileira, na qual os coeficientes representam o perfil médio brasileiro de radiação solar. Além disso, de forma semelhante à eficiência PHOTON, a dependência da tensão de entrada e da eficiência de SPMP é levada em consideração.

Vale salientar que este trabalho não estuda os efeitos do sobre/sub dimensionamento do inversor em relação à potência do gerador fotovoltaico, o qual iria provocar variações nos coeficientes de ponderação proporcionais (não necessariamente lineares) a esse sobre/sub dimensionamento.

EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO, EFICIÊNCIA DE SPMP E EFICIÊNCIA TOTAL

Determinar a eficiência do inversor não é tão simples quanto à relação entre a potência de entrada e a de saída, 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, equação 5, indica a eficácia de transformação de corrente contínua em alternada e é dada pela razão entre a potência CA de saída (P_{CA}), a uma dada tensão de entrada, e a potência CC de entrada (P_{CC}) em um período de integração definido (T).

$$\eta_{CONV} = \frac{\int_0^T P_{CA} dt}{\int_0^T P_{CC} dt} \quad (5)$$

A eficiência de SPMP, equação 6, indica quanto o inversor consegue utilizar da máxima potência disponibilizada pelo gerador FV, ou seja, é a relação entre a potência CC de entrada e a potência no ponto de máxima potência (P_{PMP}) do gerador FV para uma dada condição de irradiância e temperatura.

$$\eta_{SPMP} = \frac{\int_0^T P_{CC} dt}{\int_0^T P_{PMP} dt} \quad (6)$$

A eficiência de SPMP pode ser dividida em eficiência estática e dinâmica. A eficiência dinâmica de SPMP descreve a precisão do inversor de operar no ponto de máxima potência do gerador FV com as variações de irradiância e temperatura. Este conceito não é muito claro devido à dificuldade em se definir uma variação padrão da irradiância. Alguns trabalhos têm dedicado atenção a este respeito, 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 a eficácia conjunta de conversão da potência CC em CA e de utilização da potência máxima que o gerador FV pode fornecer, e pode ser calculada através da equação 7.

$$\eta_T = \eta_{CONV} \times \eta_{SPMP} = \frac{\int_0^T P_{CA} dt}{\int_0^T P_{PMP} dt} \quad (7)$$

ANÁLISE DO PERFIL DE RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

Dados de radiação solar, com resolução de minutos, são necessários para a determinação dos coeficientes de ponderação da Eficiência Brasileira. Dados de irradiação solar no plano inclinado (inclinação igual à latitude local) para o ano de 2005, com

um minuto de resolução e para todas as capitais brasileiras e Distrito Federal, foram obtidos do Projeto SoDa - Solar Radiation Project (Projeto SoDa, 2011). Apesar deste banco de dados não ter comprovação de sua exatidão, o mesmo foi utilizado devido à carência de dados com resolução de minutos.

Com esses dados foi calculada a irradiância média regional e nacional para cada minuto do ano. Os dados de irradiância média foram separados em faixas (0-100, 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. Essas faixas de irradiância foram escolhidas porque a curva da eficiência do inversor tem uma inclinação no início muito maior do que após os 20% de carregamento, ou seja, as variações na eficiência no início da curva são maiores e ela mantém-se praticamente constante após os 20% de carregamento, logo é necessário um detalhamento maior no início da curva do que no meio e no final.

A figura 3 mostra a participação de cada faixa de irradiância na irradiação anual para cada região do Brasil e para a média nacional e a figura 4 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.

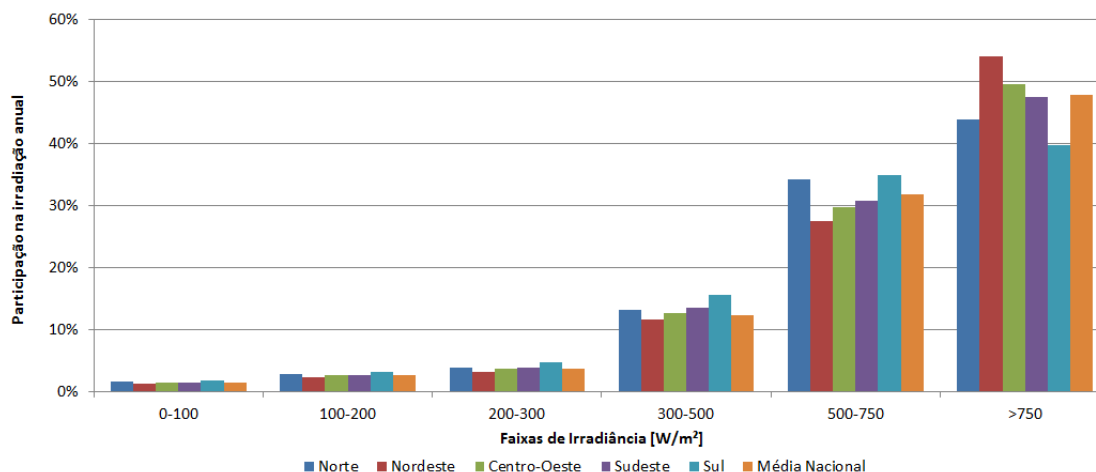


Figura 3: Participação na irradiação anual por faixa de irradiância para as regiões brasileiras e para a média nacional.

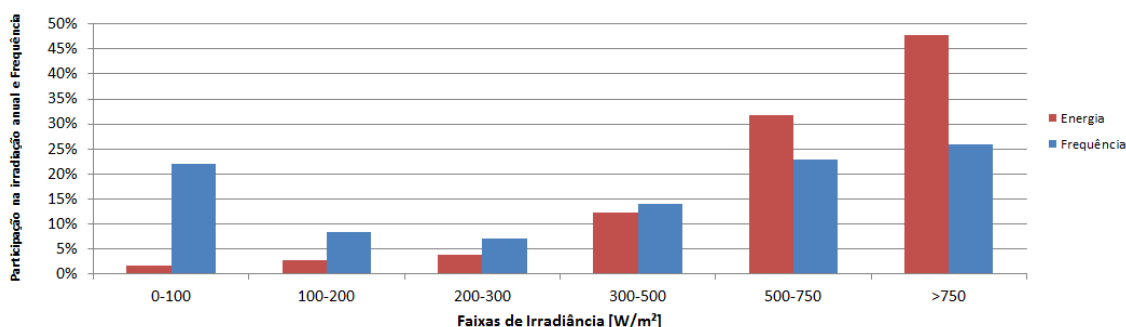


Figura 4: Distribuição de frequência da irradiância e participação na irradiação anual para a média nacional por faixas.

Analisando as figuras 3 e 4 é fácil 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. Desse modo, os coeficientes de ponderação das eficiências européia e CEC não se adequam bem ao perfil de radiação solar médio do Brasil, pois os mesmos priorizam as baixas faixas de irradiância.

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. Para calculá-la alguns passos devem ser seguidos.

Primeiramente, as faixas de tensão do SPMP e do carregamento do inversor são identificadas e divididas em 10 e 6 passos, respectivamente, necessitando, dessa forma, simular 60 diferentes curvas de um gerador FV.

Os passos de tensão são obtidos subtraindo-se a tensão máxima pela tensão mínima e dividindo o resultado por 9, logo o primeiro passo corresponde à tensão mínima e os seguintes são obtidos adicionando-se o quociente da divisão sucessivamente até a tensão máxima, resultando em 10 passos.

Os passos de carregamento devem ser sempre 10, 20, 30, 50, 75 e 100% da potência nominal de saída. Os passos são fixos porque serão multiplicados pelos coeficientes de ponderação calculados para estes carregamentos.

O inversor é ensaiado com cada uma das 60 curvas do gerador FV a fim de se obter a eficiência total para cada passo de carregamento do inversor tendo a tensão de entrada (V_{PMP}) como parâmetro, ou seja, haverá 10 valores de eficiência (uma para cada V_{PMP}) a um dado carregamento (10, 20, 30, 50, 75 e 100 %).

Com as eficiências totais, deve-se calcular a eficiência total média (equação 8), que corresponde à soma dos 10 valores de eficiência total (um para cada tensão de entrada) para cada carregamento dividida por 10.

$$\eta_{TMEDk\%} = \frac{\sum_{i=V_{PMPMIN}}^{V_{PMPMAX}} \eta_{k\%,i}}{10} \quad (8)$$

Sendo $\eta_{TMEDk\%}$ a eficiência total média a k% de carregamento e $\eta_{k\%,i}$ a eficiência total a k% de carregamento e a uma dada tensão de entrada i.

Por fim, a Eficiência Brasileira é calculada multiplicando as eficiências totais médias a um dado carregamento pelo coeficiente de ponderação correspondente. A tabela 1 mostra os coeficientes de ponderação com as eficiências correspondentes e a equação 9 apresenta o cálculo da Eficiência Brasileira.

Coefficientes de Ponderação	Eficiência total média
0,02	$\eta_{TMED10\%}$
0,02	$\eta_{TMED20\%}$
0,04	$\eta_{TMED30\%}$
0,12	$\eta_{TMED50\%}$
0,32	$\eta_{TMED75\%}$
0,48	$\eta_{TMED100\%}$

Tabela 1: Coeficientes de ponderação da Eficiência Brasileira

$$\eta_{BR} = 0,02\eta_{TMED10\%} + 0,02\eta_{TMED20\%} + 0,04\eta_{TMED30\%} + 0,12\eta_{TMED50\%} + 0,32\eta_{TMED75\%} + 0,48\eta_{TMED100\%} \quad (9)$$

Os coeficientes de ponderação são baseados no perfil de radiação solar no Brasil e representam a contribuição de cada faixa de irradiância da média nacional para a irradiância anual, assumindo que em 1000 W/m^2 tem-se a potência nominal de saída do inversor. A figura 5 ilustra os pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento utilizados no cálculo da Eficiência Brasileira, sendo os círculos azuis sobre a curva os pontos de eficiências totais médias nos carregamentos indicados ($\eta_{10\%}$, $\eta_{20\%}$, $\eta_{30\%}$, $\eta_{50\%}$, $\eta_{75\%}$, $\eta_{100\%}$) e as barras vermelhas a participação de cada faixa de irradiância da média nacional na irradiância anual.

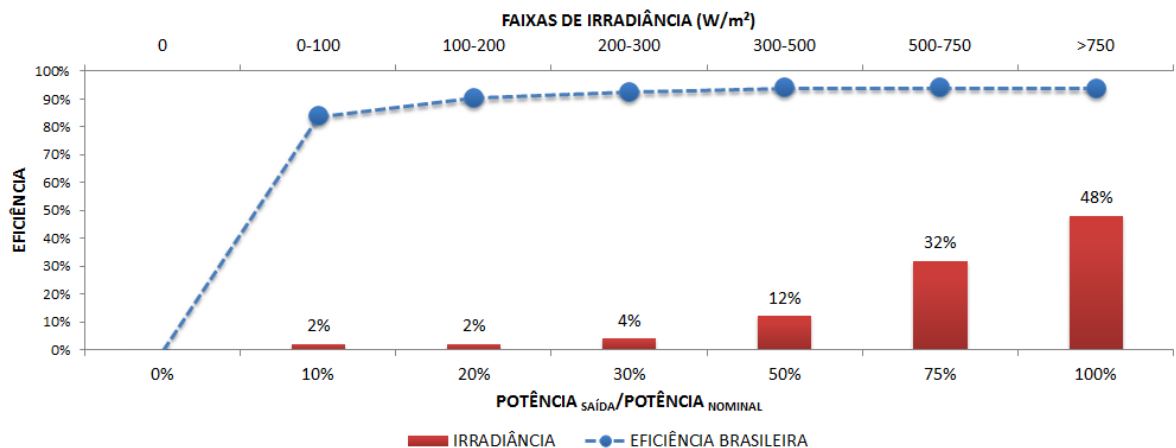


Figura 5: Ilustração dos pontos de uma curva genérica de eficiência x carregamento utilizados no cálculo da Eficiência Brasileira.

Como exemplo de comparação entre os quatro tipos de eficiência (máxima, europeia, CEC e Brasileira), uma curva de eficiência arbitrária, baseada em um inversor comercial (figuras 6 e 7), foi utilizada para calcular as quatro eficiências.

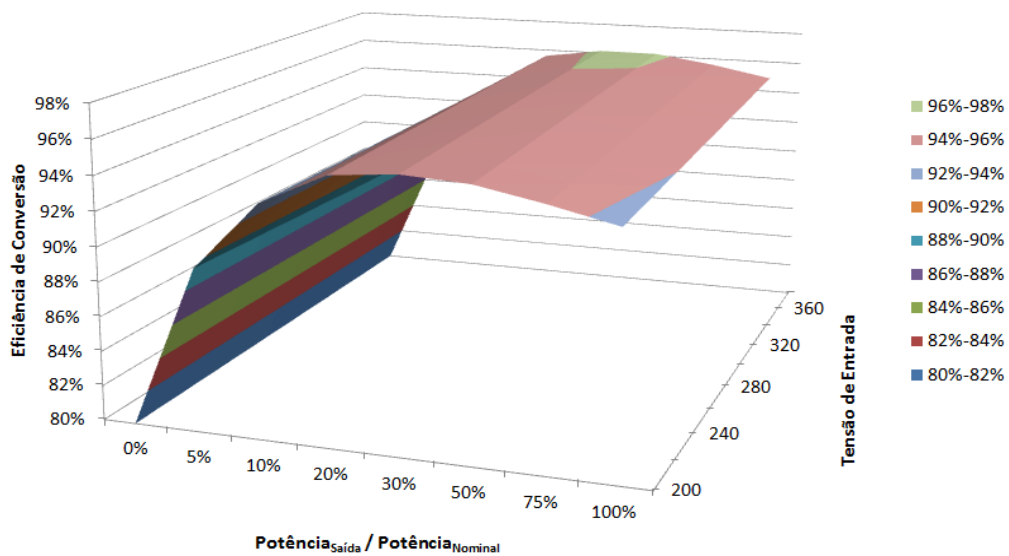


Figura 6: Curva da eficiência de conversão utilizada no exemplo.

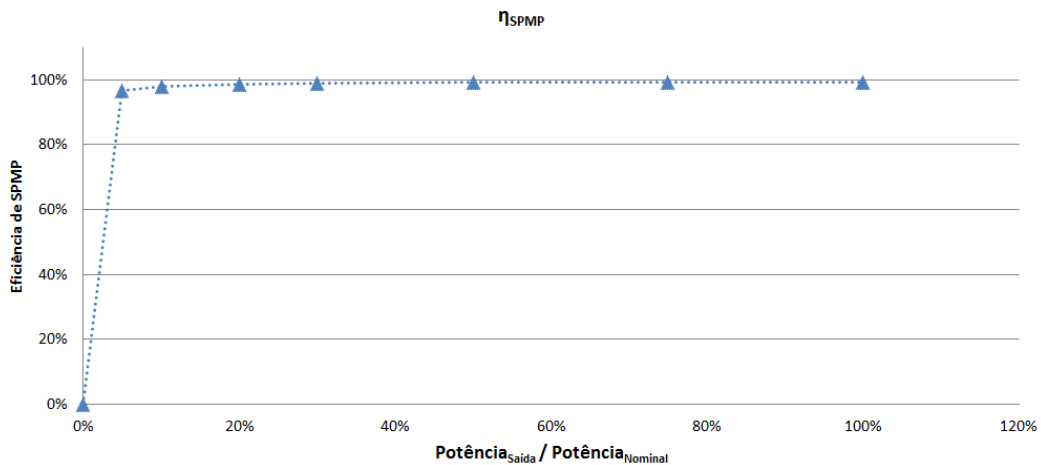


Figura 7: Curva da eficiência de SPMP utilizada no exemplo.

Como resultados foram obtidos quatro valores: 96,14%, 95,42%, 95,65% e 94,06% de eficiência máxima, européia, CEC e Brasileira, respectivamente. Vale ressaltar que as eficiências européia, CEC e máxima foram calculadas utilizando apenas a curva de eficiência de conversão (na tensão que proporciona a maior eficiência). É fácil observar que a eficiência máxima não representa o funcionamento do inversor durante um longo período de tempo, pois representa apenas um ponto de uma das curvas.

As eficiências européia e CEC representam a capacidade de conversão de potência CC em CA melhor do que a eficiência máxima porque dizem respeito ao desempenho do inversor em vários pontos da curva, mas não levam em consideração o perfil de radiação solar brasileiro e a influência da tensão de entrada.

Dessa forma, a Eficiência Brasileira é um bom parâmetro para comparar a eficiência de inversores que operam no Brasil, e pode ser um bom critério de qualificação de inversor para SFCR para o Programa Brasileiro de Etiquetagem. A tabela 2 apresenta a proposta de classificação e a figura 8 apresenta o selo que poderá ser adotado no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO para inversores de SFCR.

Eficiência Brasileira ($\eta_{BR}\%$)	Classe
$\eta_{BR} > 96$	A
$\eta_{BR} \geq 94$	B
$\eta_{BR} \geq 92$	C
$\eta_{BR} \geq 90$	D
$\eta_{BR} < 90$	E

Tabela 2: Proposta de qualificação de inversores para SFCR.

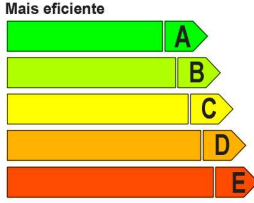

Energia (Elétrica)		INVERSOR CONEXÃO A REDE
Fabricante Marca		
Modelo		
Mais eficiente 		A
Menos eficiente		
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%)		96,6
Faixa de operação do MPPT (V)		330 - 400
Potência máxima de entrada DC (W)		7200
Potência nominal de saída CA (W)		7000
<small>Regulamento Específico Para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia Linha de Sistemas de Energia Fotovoltaica - RESPD13-FOT</small> <small>Instruções de instalação e recomendações de uso, leia o Manual do aparelho</small>		
<small>PROCEL</small>		<small>PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</small>
<small>IMPORTANTE: A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA ANTES DA VENDA, ESTÁ EM DESACORDO COM O CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR</small>		

Figura 8: Selo do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO de inversores para SFCR.

CONCLUSÕES

Este artigo introduz o conceito de Eficiência Brasileira para SFCR, a qual considera a tensão de entrada, a eficiência de SPMP e o perfil médio da radiação solar brasileira, sendo assim a que pode produzir uma comparação mais confiável para inversores de SFCR que irão operar no Brasil do que as eficiências europeia e CEC. Adicionalmente, a Eficiência Brasileira também pode ser um fator de classificação para a qualificação de inversores para SFCR no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem.

É importante salientar que não houve comprovação da exatidão dos dados utilizados. Isto compromete apenas a exatidão dos coeficientes de ponderação, mas não o método proposto.

REFERENCIAS

- 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. e 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 G., Krenzinger A. e 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, 9, 129-130.
- Bower W., Whitaker C., Erdman W., Behnke M., e Fitzgerald M. (2004). Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected PV systems. *Sandia National Laboratories*.
- Häberlin H.e Schärp 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.
- Haeberlin H., Borgna L., Kaempfer M. e Zwahlen U. (2006). Measurement of dynamic MPP-tracking efficiency at grid-connected PV inverters. *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*
- Henze N., Bründlinger R., Häberlin H., Burguer B., Bergmann A. e 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 08/07/2011.

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 and these efficiencies do not consider the input voltage and MPPT efficiency. In this sense, this paper proposes a new way of calculating a weighted efficiency, considering the input voltage, the MPPT efficiency and the characteristics of Brazilian solar incidence, creating the concept of a Brazilian Efficiency for PV grid-connected inverters.

Keywords: inverter, efficiency, grid connection, solar energy.