

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

Resumo. *Esse trabalho apresenta uma metodologia para calcular parâmetros de desempenho, a saber, a produtividade final e o desempenho global, de sistemas fotovoltaicos conectados à rede a partir da irradiância e temperatura de célula e de algumas características dos componentes do sistema, como potências nominais e as curvas de eficiência do inversor em função do carregamento e tensão de entrada. A metodologia é exemplificada em um estudo de caso de um sistema fotovoltaico conectado à rede de 1,6 kWp.*

Palavras-chave: *Energia solar, Sistema fotovoltaico conectado à rede, produção de energia.*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um conjunto de fatores tem colaborado para a consolidação da geração fotovoltaica conectada à rede no Brasil. Dentre eles, pode-se destacar a redução do preço dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional; a divulgação, ainda que em maior intensidade nos meios acadêmico e empresarial, por meio de seminários, congressos, workshops, etc.; a mobilização do governo no sentido de criar um marco regulatório no setor, tendo como exemplos a Resolução Normativa nº 482/2012 e a Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 013/2011, ambas da ANEEL; a produção de Normas técnicas nacionais para conexão à rede e instalação elétrica de sistemas fotovoltaicos; e o interesse da indústria em nacionalizar a produção de componentes.

No entanto, a esses esforços deve-se somar a garantia de que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) instalados apresentem padrões mínimos de qualidade, pois de outro modo serão desacreditados técnica e financeiramente pelos investidores do setor energético e público em geral. Uma característica importante de um SFCR é a sua capacidade de produção de energia, normalmente expressa em função de figuras de mérito como a produtividade final e o desempenho global, cujos cálculos necessitam, basicamente, de três variáveis: a irradiação total no plano do gerador fotovoltaico (FV), sua potência nominal real e a energia injetada na rede.

2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Os parâmetros de desempenho mais utilizados para qualificar um SFCR são a produtividade final (Y_F) e o desempenho global (PR). O primeiro permite comparar sistemas fotovoltaicos de diferentes tamanhos, pois normaliza a produção de energia em relação à potência nominal do gerador FV, e apresenta uma variação pequena ano a ano, sendo característico de uma determinada região geográfica (Jahn e Nasse, 2003). O segundo é um valor adimensional que mostra o efeito total de perdas e falhas em um sistema fotovoltaico, indicando o quanto sua operação se aproxima da ideal, e permite comparar sistemas independentemente da localização geográfica, pois normaliza a produtividade em relação ao recurso solar. A produtividade final e o desempenho global são dados pelas Eq.1 e Eq.2, respectivamente.

$$Y_F = \frac{E_R}{P_{NG}} \quad (1)$$

$$PR = \frac{E_R G_{STC}}{P_{NG} H_S} \quad (2)$$

Onde E_R é a energia injetada na rede, P_{NG} é a potência nominal real do gerador FV nas condições padrão de teste, G_{STC} é a irradiância nas condições padrão de teste (1.000 W/m²) e H_S é a irradiação total no plano do gerador FV. Vale destacar que as variáveis de energia devem ser obtidas para um mesmo intervalo de tempo, normalmente um ano, quando o objetivo é caracterizar o sistema, ou períodos mais curtos com a finalidade de avaliar a funcionalidade do sistema em relação à geração de energia elétrica (ensaios de uma semana, por exemplo).

3. CÁLCULO DA ENERGIA INJETADA NA REDE

A energia injetada na rede pode ser obtida a partir de medições do SFCR ou de simulações. No primeiro caso, as medições devem ser realizadas com um wattímetro (sendo necessário integrar os valores de potência) ou um medidor de energia. Já no segundo, é necessário resolver uma série de equações que, utilizando como entrada a potência nominal do gerador FV, a eficiência do inversor, a irradiância total característica, a temperatura de célula e fatores de perdas, fornecem a energia injetada na rede. As Eq. 3, Eq. 4 e Eq. 5 resumem esses cálculos.

$$P_{c.c.} = P_{NG} \frac{G}{G_{STC}} F_G F_{T_c} CP_{c.c.} \quad (3)$$

$$P_R = P_{NI} \left[\frac{-(k_1 + 1) + \sqrt{(k_1 + 1)^2 - 4k_2 \left(k_0 - \frac{P_{c.c.}}{P_{NI}} \right)}}{2k_2} \right] CP_{c.a.} \quad (4)$$

$$E_R = \int_{T_1}^{T_2} P_R dt \quad (5)$$

Onde P_{CC} é a potência em corrente contínua na entrada do inversor, G é a irradiância total característica no plano do gerador FV, F_G é um fator relacionado à variação do rendimento do gerador FV em função da irradiância, dado pela Eq. 6, F_{T_c} é um fator relacionado à temperatura de célula, dado pela Eq. 7, CP_{CC} é um fator de perdas para o lado em corrente contínua do SFCR, que representa um determinado cenário de perdas, e inclui, dentre outras coisas, o desvio das características ideais dos componentes, a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência do inversor e a eficiência da instalação elétrica, P_R é a potência em corrente alternada injetada na rede, P_{NI} é a potência nominal do inversor, CP_{CA} é um fator de perdas para o lado em corrente alternada do SFCR, que completa o cenário de perdas e inclui, dentre outras coisas, a eficiência do transformador (se houver), a eficiência da instalação elétrica e a disponibilidade do sistema, e T_1 e T_2 são os limites do período de análise do SFCR. Os coeficientes k_0 , k_1 e k_2 definem o perfil da curva de eficiência do inversor em função da sua tensão de entrada em corrente contínua (V_{CC}) e do seu carregamento. Rampinelli (2010) fez um estudo sobre esses coeficientes e sua modelagem em função da tensão.

$$F_G = \frac{\left(\frac{G}{G_{STC}} \right)}{\left(\frac{G}{G_{STC}} \right) + n_0 + n_1 \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) + n_2 \left(\frac{G}{G_{STC}} \right)^2} \quad (6)$$

$$F_{T_c} = 1 + \gamma(T_c - 25) \quad (7)$$

Onde γ é o coeficiente térmico de potência e T_c é a temperatura de célula, ambos dos módulos FV, e n_0 , n_1 e n_2 são coeficientes empíricos de um modelo específico de módulo FV. Para obtê-los, o seguinte procedimento deve ser adotado: a potência máxima do módulo FV deve ser medida em intervalos de, no mínimo, 5 minutos; simultaneamente, a irradiância total característica e a temperatura de célula do módulo FV devem ser medidas (a irradiância no mesmo plano do módulo FV em ensaio); calcula-se o fator F_G experimental com a Eq. 8.

$$F_G = \frac{P_M G_{STC}}{P_{NM} G F_{T_c}} \quad (8)$$

Onde P_M é a potência máxima medida e P_{NM} é a potência nominal nas condições padrão de teste, ambas do módulo FV. Os valores obtidos formam uma curva $F_G \times G$ experimental e os coeficientes n_0 , n_1 e n_2 devem ser escolhidos de tal forma que a curva da Eq. 6 encaixe-se com a máxima precisão sobre a curva experimental, como mostra a Fig. 1.

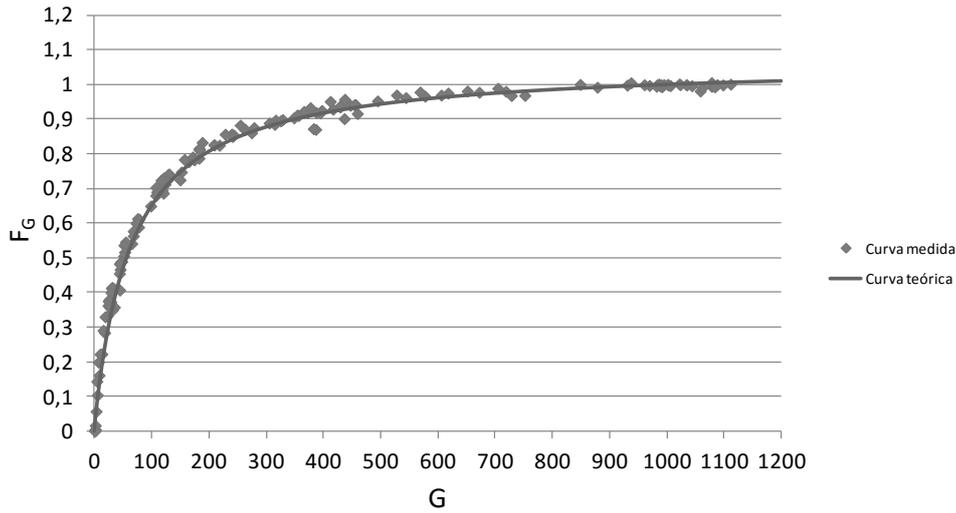


Figura 1. Curva $F_G \times G$ para um módulo FV de Silício policristalino. Os coeficientes para a Eq. 6 são $n_0 = 0,06$, $n_1 = -0,06$ e $n_2 = 0$.

Praticamente todo inversor de conexão à rede possui seguimento do ponto de máxima potência, logo a tensão em corrente contínua em sua entrada quase sempre é a de máxima potência. A Eq. 9 apresenta uma maneira de calcular essa tensão de forma aproximada, porém suficientemente adequada para os cálculos.

$$V_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{M,STC} \frac{G}{1000}} \quad (9)$$

Onde $I_{M,STC}$ é a corrente de máxima potência, nas condições padrão de teste, do gerador FV.

4. MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA TOTAL E DA TEMPERATURA DE CÉLULA DO GERADOR FV

A irradiância total deve ser medida de duas maneiras distintas: uma para o cálculo dos parâmetros de desempenho e outra para o cálculo da energia injetada na rede (irradiância característica). A primeira medição deve ser feita com um piranômetro de termopilha, pois este possui uma resposta espectral ampla, capaz de abranger quase todo o espectro da radiação solar, e erro de medição em função do ângulo de incidência pequeno. Deve ser instalado preferencialmente no plano do gerador FV e, quando não for possível instalá-lo dessa forma ou forem utilizados bancos de dados com valores referentes à irradiância global, o que é bastante comum, deve ser feita a transposição para o plano do gerador FV.

A segunda medição deve se feita com um módulo FV de mesma tecnologia e modelo que os utilizados para compor o gerador FV e instalado no mesmo plano do gerador FV. Isso é necessário porque o valor de irradiância obtido já considera os efeitos do descasamento espectral e ângulo de incidência, ou seja, é a irradiância característica para um modelo de módulo FV.

A temperatura de célula pode ser medida diretamente, com um PT-100, por exemplo, ou com um módulo de referência, que pode ser o mesmo utilizado para medir irradiância característica. Para isso, é necessário que seja possível dividir suas células FV em dois setores (pode-se retirar os diodos de *by-pass*, por exemplo, como mostra a Fig. 2) e em um medir a corrente de curto-circuito ($I_{sc,ref}$) e no outro a tensão de circuito aberto ($V_{oc,ref}$). Na impossibilidade de executar essa divisão, podem ser utilizados dois módulos FV: um para medir $I_{sc,ref}$, e outro para medir $V_{oc,ref}$.

Algumas condições devem ser observadas para a calibração a sol real de um módulo FV para essa finalidade: o módulo deve ser colocado ao lado de um piranômetro de termopilha calibrado, ambos no mesmo plano, e estar limpo; a temperatura de célula deve se medida com um sensor apropriado; a radiação solar no momento da calibração deve incidir perpendicularmente tanto no módulo FV quanto no piranômetro; o céu deve estar limpo (garantia de que o índice de claridade é bastante elevado); e o ângulo zenital solar deve resultar em uma massa de ar o mais próximo possível de 1,5 no momento da calibração ($\theta_z \approx 48,18^\circ$).

A corrente do setor em curto-circuito, a tensão do setor em circuito aberto, a irradiância total e a temperatura de célula devem ser medidas simultaneamente em intervalos de um segundo durante o período de um minuto, e, em seguida, deve ser feita a média dos 60 valores obtidos (resultando em $V_{oc,ref,m}$, $I_{sc,ref,m}$, $G_{S,m}$ e $T_{c,ref,m}$, respectivamente). A corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto do módulo FV de referência, nas condições padrão de teste, são obtidas com as Eq. 10 e Eq. 11, respectivamente.

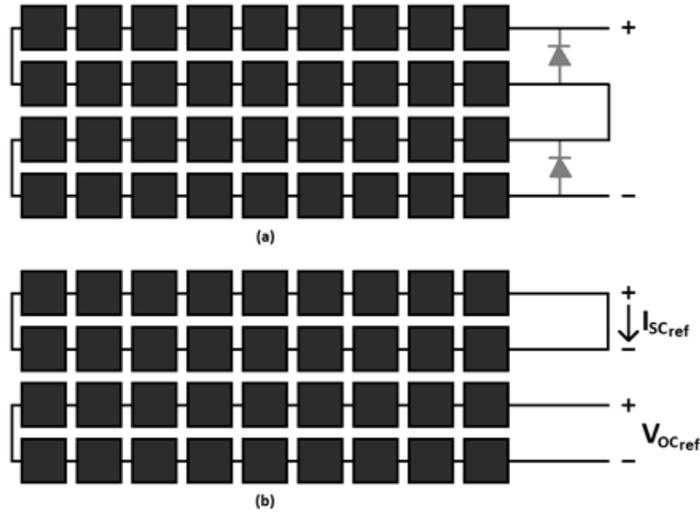


Figura 2. Módulo FV (a) com diodos de *by-pass* e (b) dividido para a medição simultânea de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto.

$$I_{SCref,STC} = \frac{1.000 I_{SCref,m}}{G_{S,m} \left[1 + \alpha_{ref} (T_{C,ref,m} - 25) \right]} \quad (10)$$

$$V_{OCref,STC} = N_{Sref} V_{T(25^{\circ}C)} \ln \left(\frac{I_{SCref,STC}}{I_{0(25^{\circ}C)}} + 1 \right) \quad (11)$$

Onde α_{ref} é o coeficiente térmico de corrente do módulo FV de referência, N_{Sref} é o número de células FV em série no setor em circuito aberto, $V_{T(25^{\circ}C)}$ é a tensão térmica da célula FV a $25^{\circ}C$ ($\approx 25,68$ mV) e $I_{0(25^{\circ}C)}$ é a corrente de saturação da célula FV a $25^{\circ}C$. Outra maneira de obter os valores $I_{SCref,STC}$ e $V_{OCref,STC}$ é medir a curva I x V do módulo FV em um simulador solar que apresente os resultados nas condições padrão de teste. A irradiância total característica e a temperatura de célula do módulo FV de referência são, então, obtidas com as Eq. 12 e Eq. 13.

$$G = \frac{1.000 I_{SCref}}{I_{SCref,STC} \left[1 + \alpha_{ref} (T_{C,ref} - 25) \right]} \quad (12)$$

$$T_{C,ref} = \frac{V_{OCref} - V_{OCref,STC} + 25 \beta_{ref}}{\beta_{ref} + N_{Sref} \frac{mK}{q} \ln \left(\frac{G}{1.000} \right)} \quad (13)$$

Onde β_{ref} é o coeficiente térmico de tensão do setor em circuito aberto do módulo de referência, m é o fator de idealidade do diodo do modelo circuital da célula FV, K é a constante de Boltzmann e q é a carga do elétron. É interessante destacar que as Eq. 12 e Eq. 13 formam um sistema cujas soluções são a irradiância total característica e a temperatura de célula do módulo FV de referência, a qual é ligeiramente superior a do gerador FV. Martínez-Moreno *et al.* (2011) apresenta uma maneira de obter a temperatura de célula do gerador FV (Eq. 14).

$$T_C = T_{C,ref} - \frac{G}{800} (T_{NOC} - 20) \eta_{STC} F_{T_C} \quad (14)$$

Onde T_{NOC} é a temperatura nominal de operação e η_{STC} é a eficiência nas condições padrão de teste, ambas do módulo FV de referência.

5. MEDIÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL DO GERADOR FV

A potência nominal do gerador FV é um parâmetro importante para os cálculos de produção de energia e desempenho, e pode ser feita de duas formas: com um medidor de curva I x V (usualmente uma carga capacitiva) ou com um wattímetro e um módulo FV de referência (calibrado como indicado no item 4) para medição da irradiância característica e temperatura de célula (pode ser utilizado outro sensor para medir diretamente a temperatura de célula).

No primeiro caso, o medidor de curva I x V deve ser capaz de, além de medir a curva instantânea do gerador FV, corrigi-la para as condições padrão de teste e, se não possuir essa função, a correção deve ser feita manualmente (a NBR 12302 define procedimentos para a correção da curva I x V medida para as condições padrão de teste de temperatura e irradiância). Já no segundo caso, a potência nominal é estimada com o procedimento adaptado de Martines-Moreno *et al.* (2011): durante pelo menos um dia de operação em campo, a potência em corrente contínua na entrada do inversor deve ser medida com um wattímetro, simultaneamente com a irradiância característica e a temperatura de célula; a potência medida deve ser corrigida para a condição padrão de temperatura (25°C) com a Eq.15, resultando em um conjunto de pontos ($P_{CC(25^{\circ}C)}$, G); finalmente, P_{NG} deve ser escolhido para melhor ajustar a Eq. 16 aos pontos obtidos anteriormente.

$$P_{CC(25^{\circ}C)} = \frac{P_{CC}}{F_{Tc}} \quad (15)$$

$$P_{CC(25^{\circ}C)} = P_{NG} \frac{G}{G_{STC}} \quad (16)$$

É interessante observar que o resultado é uma aproximação, pois a potência medida com o wattímetro sofre a influência das eficiências da instalação elétrica em corrente contínua e do seguimento do ponto de máxima potência. Como ambas são bastante elevadas para altas irradiâncias, o valor da potência nominal obtido pode ser utilizado nos cálculos. A curva $P_{CC(25^{\circ}C)} \times G$ apresenta um perfil como mostra a Fig. 3. Nela podemos identificar três regiões:

- 1 – desvio do comportamento linear, causado pelo seguimento do ponto de máxima potência e baixo rendimento dos módulos FV em valores pequenos de irradiância;
- 2 – parte linear da curva, a qual deve ser utilizada para estimar a potência nominal do gerador FV; e
- 3 – restrição imposta pela máxima potência de trabalho do inversor.

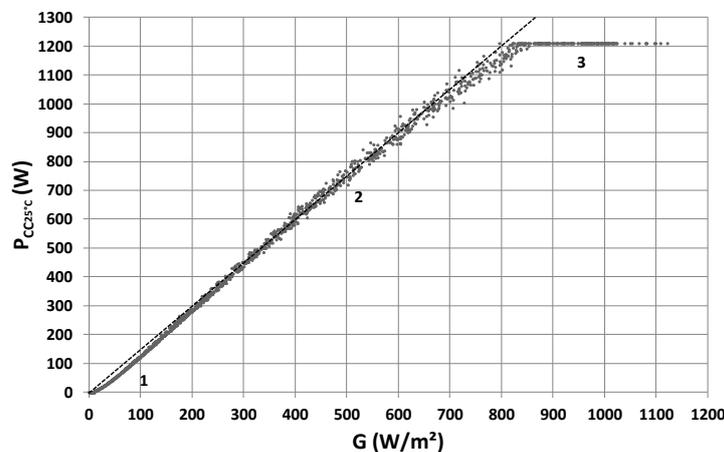


Figura 3. Curva $P_{CC(25^{\circ}C)} \times G$ de um gerador FV de 1,5 kWp.

6. ESTUDO DE CASO – SFCR DE 1,6 kWp

O sistema ensaiado faz parte do SFCR de 12,26 kWp do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, o qual é constituído por 80 módulos de silício monocristalino de 75 Wp e 80 módulos de silício policristalino, sendo 20 de 70 Wp, 20 de 77 Wp e 40 de 83 Wp. Esses módulos estão divididos em 8 grupos, cada um conectado a um inversor de 1.000 W nominais. O ensaio foi realizado em apenas um desses grupos, cujo gerador apresenta 20 módulos de silício policristalino de 83 Wp, com configuração como mostra a Fig. 4.

O equipamento de medição consistiu em um wattímetro digital, um módulo FV de referência para medição da irradiância e um termopar para medição da temperatura de célula. O wattímetro mediu simultaneamente tensão e corrente na entrada e na saída do inversor, além da irradiância e temperatura de célula (entradas auxiliares de sinal),

como mostra a Fig. 4. As medições foram realizadas durante o período de uma semana no mês de julho de 2011, e os dados foram registrados em intervalos de 10 segundos. Durante esse período não houve interrupções no funcionamento do sistema e nenhum dia foi predominantemente nublado.

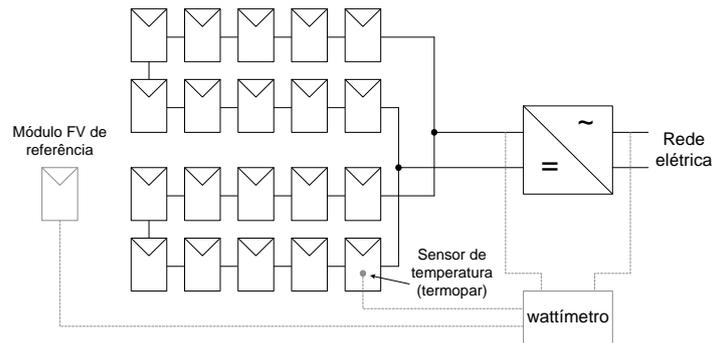


Figura 4. Configuração do subsistema ensaiado e do equipamento de medição.

Os coeficientes k_0 , k_1 e k_2 foram obtidos a partir de curvas de eficiência fornecidas pelo fabricante do inversor no catálogo do produto, e correspondem às Eq. 17, Eq. 18 e Eq. 19.

$$k_0 = 0,000041V_{CC} + 0,005341 \quad (17)$$

$$k_1 = 0,000316V_{CC} - 0,029547 \quad (18)$$

$$k_2 = -0,000114V_{CC} + 0,082520 \quad (19)$$

A potência nominal do gerador FV foi estimada, com o wattímetro, em 1.155 Wp, valor muito inferior à potência de placa de 1.660 Wp (cerca de 44% a mais em relação a medida). Essa diferença mostra a importância de medir a potência real do gerador FV, pois de outro modo os resultados de desempenho seriam subestimados. Além disso, mostra que existe algum problema com o gerador FV, seja uma degradação exagerada ou um mau funcionamento de algum módulo FV que está limitando a geração de eletricidade. A Fig. 5 mostra a curva $P_{CC(25^\circ C)} \times G$ utilizada para medir a potência nominal do gerador FV.

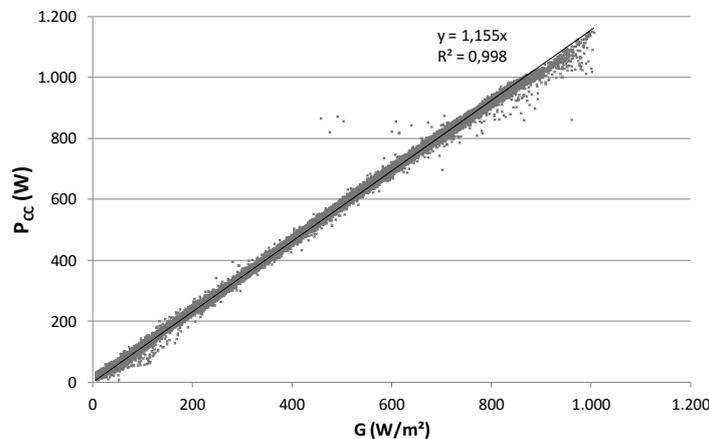


Figura 5. Curva $P_{CC(25^\circ C)} \times G$ utilizada para medir a potência nominal do gerador FV. Observa-se que o coeficiente linear é 1,155 m^2 , o que, multiplicado pela irradiância nas condições padrão de teste (1.000 W/m^2) resulta em uma potência de 1.155 Wp.

De posse da eficiência nominal do gerador, os coeficientes n_0 , n_1 e n_2 foram obtidos com os próprios dados medidos de potência em corrente contínua, irradiância característica e temperatura de célula. Os resultados foram $n_0 = 0,017$, $n_1 = -0,09$ e $n_2 = 0,073$. Para completar os dados necessários para o cálculo da energia injetada na rede, falta apenas determinar o cenário de perdas. No lado em corrente contínua, será considerada perda de 1% devido ao cabeamento relativamente longo entre o gerador FV e o inversor. Já no lado em corrente alternada, não serão consideradas perdas, pois o ponto de medição é bastante próximo ao inversor. As Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8 mostram curvas comparando os valores medidos e calculados de tensão em corrente contínua na entrada do inversor, potência na entrada do inversor e potência injetada na rede, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que o modelo matemático é bastante preciso.

A energia injetada na rede medida foi 33,26 kWh, enquanto que a calculada foi 33,08 kWh, uma diferença de aproximadamente $-0,54\%$ em relação à medida. Isso reforça a precisão do modelo matemático utilizado e qualifica-o para o cálculo dos parâmetros de desempenho de um SFCR. O Instituto de Eletrotécnica e Energia também possui uma estação solarimétrica, onde a irradiância total é medida com um piranômetro voltado para o norte geográfico e inclinado em 23° . O gerador FV do sistema medido não possui a mesma orientação do piranômetro (principalmente devido às restrições do prédio em que foi montado, que está orientado em 18° para o oeste), contudo, nesse caso, o erro em utilizar diretamente as medições de irradiância da estação não é significativo para os objetivos desse trabalho.

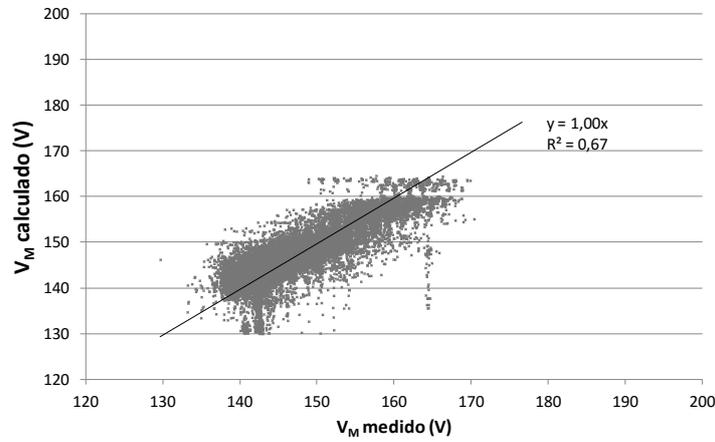


Figura 6. Comparação entre a tensão na entrada do inversor, medida e calculada.

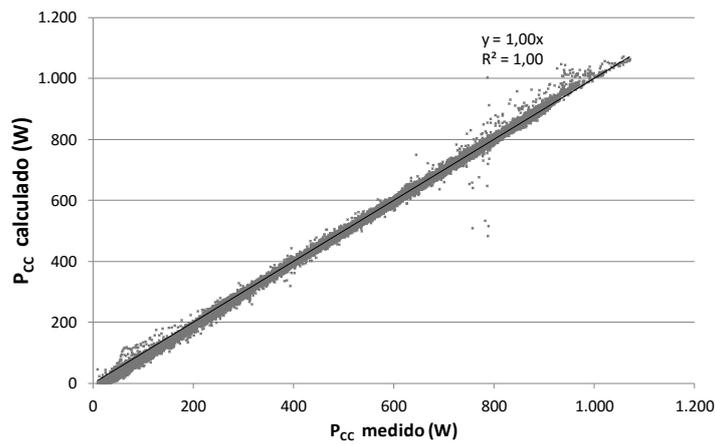


Figura 7. Comparação entre a potência na entrada do inversor, medida e calculada.

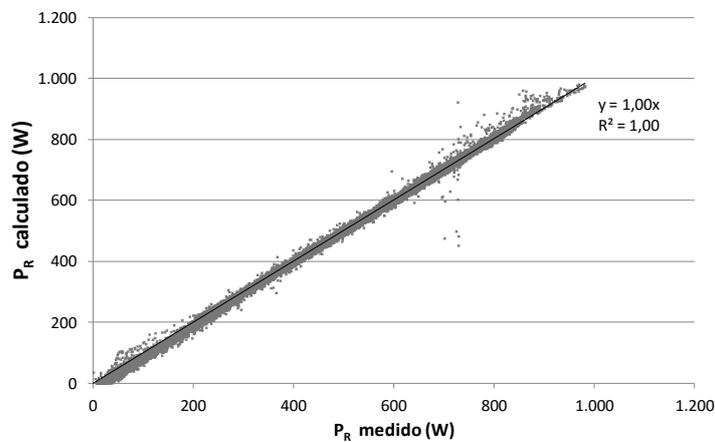


Figura 8. Comparação entre a potência injetada na rede, medida e calculada.

A irradiação total no período dos ensaios foi de 34,39 kWh/m². De posse da energia injetada na rede, potência nominal do gerador FV e irradiação total no plano do gerador FV (nesse caso, a irradiação total aproximada), é possível calcular os parâmetros de desempenho, apresentados na Tab. 1, obtidos com as Eq. 1 e Eq. 2.

Tabela 1. Parâmetros de desempenho utilizando a energia injetada na rede, medida e calculada.

PARÂMETRO DE DESEMPENHO	COM ENERGIA MEDIDA	COM ENERGIA CALCULADA
Produtividade final	28,79 kWh/kWp	28,64 kWh/kWp
Desempenho global	83,72%	83,28%

7. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma metodologia, que inclui uma variável que traduz o comportamento do gerador FV em condições de baixa irradiância, para obter a energia injetada na rede por um sistema fotovoltaico, a qual é utilizada para calcular dois dos principais parâmetros de desempenho de um SFCR: produtividade final e desempenho global.

Além disso, foi mostrada a importância de medir a irradiância com dois tipos de sensores: um piranômetro, cujas medições serão utilizadas na determinação do desempenho, e um módulo FV calibrado, cuja medição de irradiância característica é mais apropriada para calcular a energia injetada na rede.

Os resultados obtidos com simulações foram bastante satisfatórios, pois corresponderam aos valores medidos com grande precisão: em relação aos valores medidos, os calculados apresentaram diferença de -0,54%, -0,52% e -0,55 para a energia injetada na rede, produtividade final e desempenho global, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- Jahn, U., Nasse, W., 2003. Performance analysis and reliability of grid-connected PV systems in IEA countries, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka.
- Rampinelli, G., 2010. Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- Martínes-Moreno, F., Lorenzo, E., Muñoz, J., Moretón, R., 2011. On the testing of large PV arrays, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Published online in Wiley Online Library.

CALCULATION OF PERFORMANCE PARAMETERS FOR GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. This paper presents a methodology to calculate performance parameters, namely, the final productivity and performance ratio, for grid connected photovoltaic systems from the irradiance and cell temperature, as well as some electric characteristics of system components, such as power ratings and the efficiency curves of the inverter as a function of loading and input voltage. The methodology is exemplified with a real case of a grid connected photovoltaic system of 1.6 kWp.

Key words: Solar energy, Grid connected photovoltaic system, Energy production.