

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA FV CONECTADO À REDE COM USO DE UM MICROINVERSOR

Ricardo Machado Dias – dias_rm_dias@hotmail.com

Gabriela Schenkel – gabrielaschenkel@gmail.com

João Batista Dias – joaobd@unisinobr

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM.

Resumo. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica tem como finalidade a conversão da energia solar em energia elétrica. Em função da crescente procura por energias limpas, estão sendo desenvolvidos microinversores para suprir a demanda de uma parcela da população que necessita de uma pequena quantidade de energia e para regiões de difícil acesso onde não há a necessidade de instalações de grande porte. Esse estudo mostra a análise energética de um sistema de geração de energia FV, composto por um módulo e um microinversor conectados à rede elétrica, baseados nos índices de mérito determinados pela Comunidade Econômica Europeia (CEC – Joint Research Centre, 1993, apud Oliveira, 2002). O trabalho foi desenvolvido no âmbito experimental. A análise foi dividida em dias típicos, ensolarado, parcialmente encoberto e encoberto, tendo como objetivo estimar os valores de energia injetada na rede elétrica para cada dia em questão, sabendo também quais foram as principais perdas do sistema e poder estimar o quanto de economia poderia ter uma família de baixa renda cujo consumo energético esteja na faixa dos 100 kWh por mês. Projetando uma economia de aproximadamente 30 %, os valores de energia gerada ficaram de acordo com o esperado, tendo uma maior produção para os dias ensolarados em função da radiação incidente sobre o módulo, em contrapartida, existiram dias encobertos em que o sistema não se conectou.

Palavras-chave: Sistema conectado à rede, Microinversor, Análise Energética, Índices de Mérito.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento de demanda por energia elétrica fotovoltaica, empresas do ramo estão em busca de novos produtos que satisfaçam as necessidades de seus clientes e em busca por novos clientes. Pensando nisso, estão sendo desenvolvidos inversores compactos, chamados de microinversores, destinados aos consumidores que necessitam de uma pequena demanda de energia elétrica.

Esses inversores, destinados a converterem corrente contínua (c.c.), gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada (c.a.), apropriada para o consumo das indústrias e residências, estão sendo desenvolvidos para operarem com um baixo valor de tensão em relação aos inversores destinados às grandes instalações.

Os microinversores são desenvolvidos para serem conectados à rede, possibilitando uma redução de até 30% nos custos em relação os sistemas de estocagem (Green, 2000), propiciando que a população de menor renda possa usufruir dos benefícios desse sistema.

Em prol desse sistema, foi feito um estudo da análise energética de um microinversor conectado à rede elétrica baseado nos índices de mérito, que são determinados pela Comunidade Econômica Europeia (CEC – Joint Research Centre, 1993, apud Oliveira, 2002), que tem por função a avaliação do comportamento energético dos diversos tipos de instalações.

Essa análise foi feita em um sistema de geração para a avaliação do comportamento energético de um conjunto módulo fotovoltaico e microinversor conectados à rede, com sistema de aquisição de dados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito experimental, onde um sistema de geração foi construído, composto por um módulo fotovoltaico modelo LG255S1C, um microinversor *Enphase* modelo M215, um sistema de aquisição de dados *Agilent* modelo 34970A. A montagem do sistema pode ser vista na Fig. 1.



Figura 1 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.

O sistema foi instalado no Laboratório de Energias Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. A inclinação do módulo é igual à latitude local, 30 graus, e com ângulo azimutal de 180 graus, direcionado ao norte geográfico.

Para a análise de desempenho do sistema, foram utilizados sensores de filme fino de platina, PT100, para medir as temperaturas tanto do módulo quanto do microinversor. Esses sensores foram calibrados, sendo geradas as curvas características de cada um deles com suas devidas incertezas de medidas. As medidas de temperatura do ar foram coletadas junto à estação meteorológica instalada no mesmo laboratório. Para a análise da corrente c.c. do módulo FV e da corrente c.a. do microinversor, foram utilizadas resistências *Shunts*. Os respectivos shunts podem ser verificados na Fig. 2.

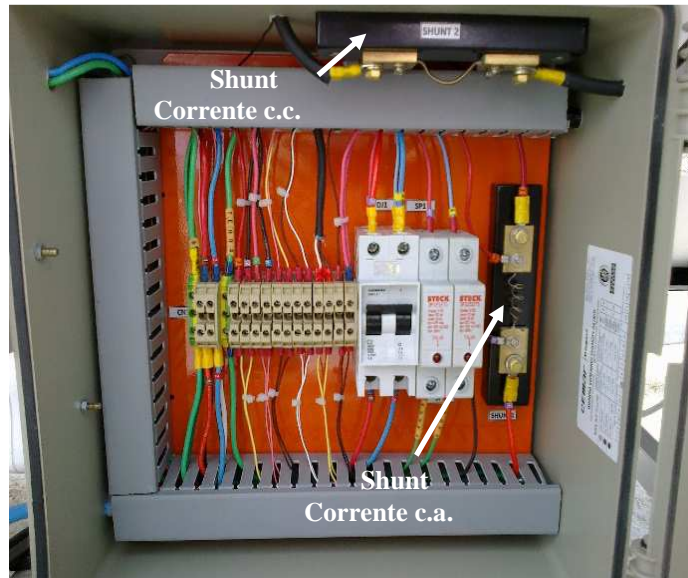


Figura 2 - Quadro elétrico do sistema de geração.

Para a medição da irradiância incidente no plano do painel FV, foi instalado um piranômetro interligado com o sistema de aquisição de dados.

3. ÍNDICES DE MÉRITO

Para que um sistema seja considerado energeticamente eficaz, é necessário que o mesmo tenha sido analisado em determinada condição padrão. Como por exemplo, os módulos fotovoltaicos devem sair de fábrica com algumas características, encontrada através de normas padrão para a fabricação dos mesmos.

Da mesma forma, para verificar a performance de um determinado sistema FV, existem ferramentas que auxiliam nesse processo. Essas ferramentas que auxiliam na análise energética de um sistema FV são chamadas de índices de mérito, que são utilizadas pela Comunidade Econômica Europeia em sistemas conectados à rede (CEC – Joint Research Centre, 1993, apud Oliveira, 2002).

3.1 Equações para os índices de mérito

Para o equacionamento será utilizada uma sequência de equações que estão de acordo com o sentido da produção de energia, desde o módulo e indo em direção à rede elétrica. Sendo assim, seguem as seguintes equações:

Irradiação Média Diária no Plano do Gerador $[H(\gamma, \beta)]$. É a irradiação incidente no plano do gerador em $[\text{kWh}/\text{m}^2\text{d}]$ para uma determinada inclinação do módulo β e ângulo azimutal γ , onde G representa a irradiação no plano do gerador, em $[\text{W}/\text{m}^2]$, e Γ representa o período de operação do sistema, em [dia].

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int G(t) dt \quad (1)$$

Eficiência Global do Sistema $[\eta_s]$. Trata de quanto da energia elétrica gerada pelo módulo FV foi entregue à rede elétrica, onde E_{ca} é a energia elétrica entregue à rede em [kWh], E_{ger} é a energia solar no plano do gerador em [kWh], A_{ger} é a área do gerador, em $[\text{m}^2]$ e P_{ca} é a potência elétrica entregue à rede, em [W];

$$\eta_s = \frac{E_{ca}}{E_{ger}} = \frac{\int P_{ca}(t)dt}{A_{ger} \int G(t)dt} \quad (2)$$

Eficiência média do Inversor [η_{inv}]. É a capacidade do inversor em transformar energia elétrica E_{cc} em energia elétrica E_{ca} , medidas em [kWh], podendo ser representada na forma percentual, onde P_{ca} é a potência elétrica entregue à rede, em [W] e P_{cc} é a potência elétrica medida na entrada do inversor, em [W];

$$\eta_{inv} = \frac{E_{ca}}{E_{cc}} = \frac{\int P_{ca}(t)dt}{\int P_{cc}(t)dt} \quad (3)$$

Fator de Capacidade [CF]. O fator de capacidade representa a capacidade do sistema em gerar energia elétrica em função de sua capacidade instalada para geração da mesma, considerando uma produção de 24 horas, tendo como parâmetros a E_{std} que é a energia elétrica real na condição padrão, em [kWh] e a P_{std} que é a potência elétrica real instalada na condição padrão, em [Wp].

$$CF = \frac{E_{ca}}{E_{std}} = \frac{\int P_{ca}(t)dt}{\int P_{std}(t)dt} \quad (4)$$

Produtividade [Y]. Representa a quantidade de energia gerada por cada kW_p instalada no sistema, podendo ser expressa em horas/dia [h/d]. Esse parâmetro mede a quantidade de energia gerada em horas, se o sistema estivesse convertendo em energia elétrica toda a sua potência real instalada. Dentro do parâmetro produtividade, pode ser determinada a produtividade Y_A do gerador FV em função da potência instalada P_{std} , representando o valor médio diário de energia produzida pelo gerador, em [h/d].

$$Y_A = \frac{1}{P_{std}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int P_{cc}(t)dt \right] \quad (5)$$

Já a produtividade Y_F do sistema, também em [h/d], representa o valor médio diário da energia elétrica entregue à rede elétrica em função da potência entregue a rede [P_{ca}].

$$Y_F = \frac{1}{P_{std}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int P_{ca}(t)dt \right] \quad (6)$$

Além dos dois parâmetros citados acima, existe o parâmetro produtividade de referência Y_R , expresso em [h/d], que representa a razão entre a irradiação média no plano do gerador $H(\gamma, \beta)$ e a irradiância padrão G_{ce} de 1000 W/m².

$$Y_R = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{ce}} \quad (7)$$

Desempenho Global do Sistema [P_R]. É a razão entre a energia gerada pelo sistema em relação à energia realmente disponível para um determinado período de tempo. Dessa forma, a produtividade do sistema pela produtividade de referência fornecem o desempenho global do sistema, como pode ser visto na Eq. 8.

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (8)$$

Perdas de Captura [L_C]. A diferença entre a produtividade de referência Y_R e a produtividade do gerador fotovoltaico Y_A , fornecem outro índice muito importante (Mayer, 1999), as perdas por captura na entrada do microinversor.

$$L_C = Y_R - Y_A \quad (9)$$

Perdas de Sistema [L_S]. A diferença entre a produtividade do gerador fotovoltaico Y_A e a produtividade do sistema Y_F , fornecem o índice de perdas de sistema ou sobre o microinversor.

$$L_S = Y_A - Y_F \quad (10)$$

Produção Média Diária da Energia Elétrica E_F . Avaliada em [kWh/d], é a média diária de energia elétrica que o sistema pode produzir, fazendo uma relação entre a Irradiância, radiação padrão, desempenho global e a potência instalada.

$$E_F = \left[\frac{H(\gamma, \beta) \cdot P_R}{G_{ce}} \right] P_{std} \quad (11)$$

4. METODOLOGICA

Para a análise deste estudo de caso foi considerado um período aproximado de duas semanas para coleta de dados, sendo esses dados divididos em dias ensolarados, parcialmente encobertos e encobertos.

Para essa análise, foram coletados dados da corrente e da tensão c.c. geradas pelo módulo FV, a corrente e a tensão c.a gerada pelo microinversor. Além dessas componentes, foram verificadas as temperaturas do módulo e a temperatura do microinversor e a irradiância [G] na superfície do módulo, sendo que todos foram coletados minuto a minuto através do sistema de aquisição de dados Agilent.

Para o tratamento dos dados, foram considerados valores em que surgiu corrente c.c. gerada pelo módulo FV e o momento em que não existiu mais essa corrente. Dentro dessa análise verificou-se que o período estava entre as 07h00min e às 19h00min (horário de verão), sendo essa informação a primeira parte do filtro dos dados. Esse filtro está de acordo com Joint Research Centre [JRC] (1993), que prevê a exclusão de determinados dados que não condizem com dados esperados.

Após organização dos dados com seus respectivos cálculos, foi feito um novo filtro considerando somente momentos em que o microinversor estava conectado à rede, como pode ser observado nas Fig. 3 e 4. Após esse processo foram feitas as integrações para a resolução dos cálculos dos índices de mérito. Seguindo o processo foram analisadas as curvas de irradiância para determinar os dias ensolarados, parcialmente encobertos e encobertos.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Dias ensolarados

Dentro do período de aquisição de dados, foram selecionados os dias que representavam dias ensolarados sem a presença de nuvens, sendo então feita a curva característica desse dia relacionando a irradiância do dia [G], a potência na entrada do microinversor [P_{cc}] e a potência entregue à rede elétrica [P_{ca}], obtendo a seguinte curva como é mostrada na Fig.3. Essas curvas são provenientes dos dados do dia em questão de forma horária.

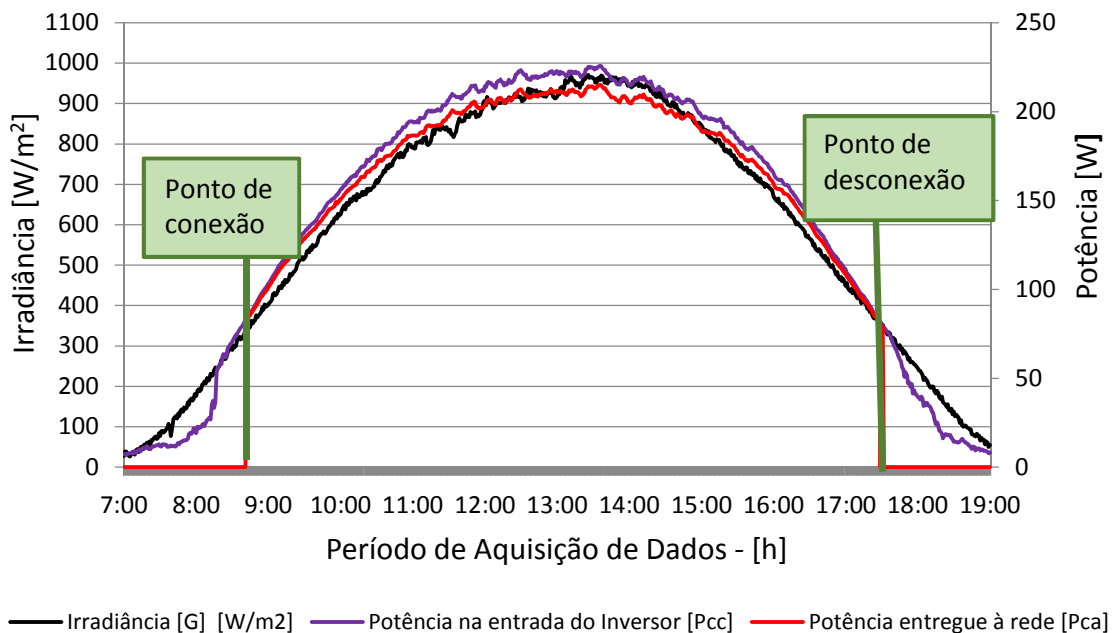


Figura 3 - Dia típico ensolarado.

5.2 Dias parcialmente encobertos

Seguindo a metodologia por busca de dias típicos que representem condições nas quais o sistema estará sujeito, foram selecionados os dias que representavam dias parcialmente encobertos, com considerável nível de irradiação, mas que em alguns momentos surgiam algumas nuvens. Dentro desses dias, a Fig. 4, representa bem essa condição.

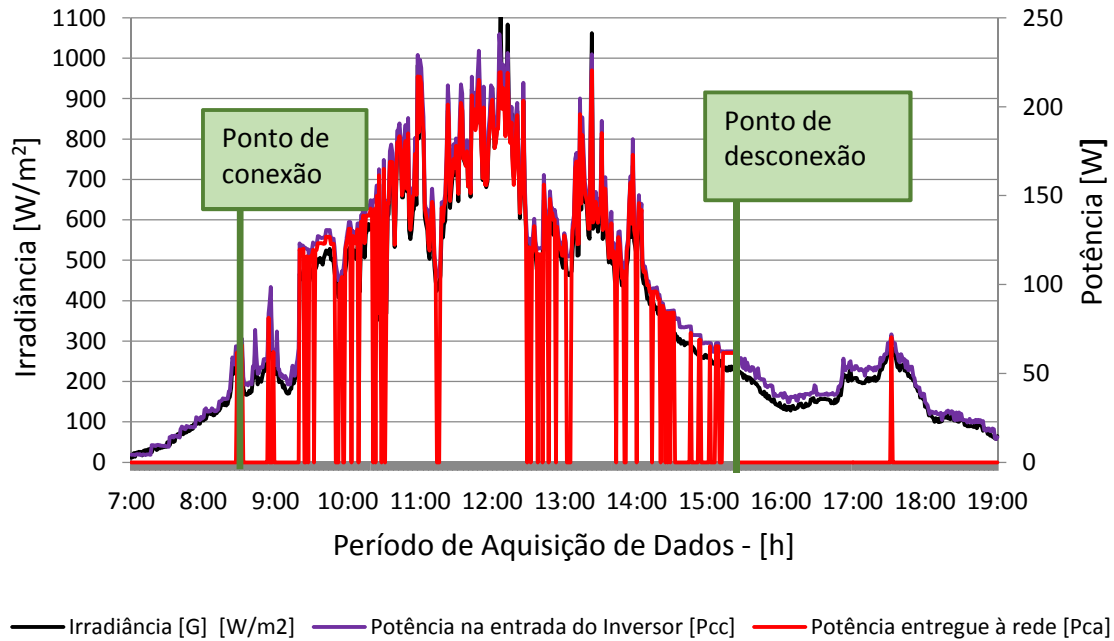


Figura 4 - Dia típico parcialmente encoberto.

5.3 Dias encobertos

Complementando a procura por dias que representem condições na qual se pode ter a produção de energia elétrica através do painel solar, a Fig. 5 representa os dias encobertos com alto índice de nuvens, sendo que nesse dia não houve a conexão do microinversor na rede elétrica, desconsiderando esse dia e não entrando no processo de avaliação.

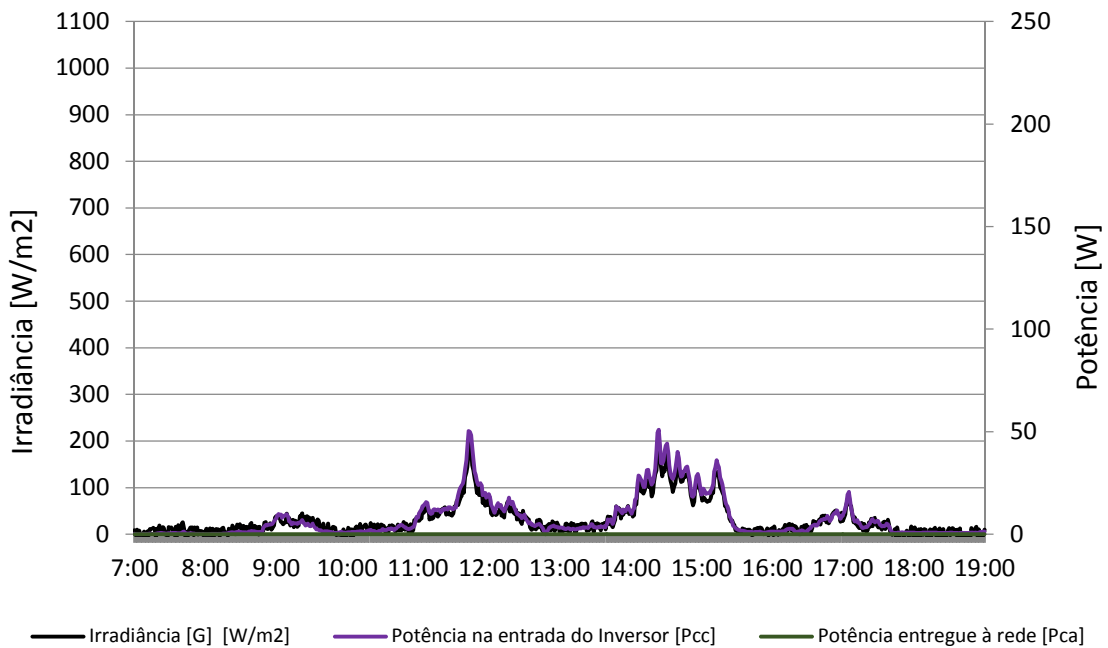


Figura 5 - Dia típico encoberto.

5.4 Índices de Produtividade e de perdas

Determinados os dias típicos, que tem como função a visualização do comportamento do sistema para determinadas condições climáticas, foram filtrados todos os dias que possuíam as mesmas características, ensolarado, parcialmente encoberto e encoberto e foram feitas médias de produtividade para cada um deles. As Eq. 5, 6 e 7 fornecem esses dados.

Essas médias foram comparadas com uma média total de todos os dias, que tem por finalidade representar o sistema como um todo. Sendo assim, os comportamentos para cada dia típico pode ser verificado na Fig. 6 e as médias desses dias podem ser verificadas na Fig. 7 respectivamente.

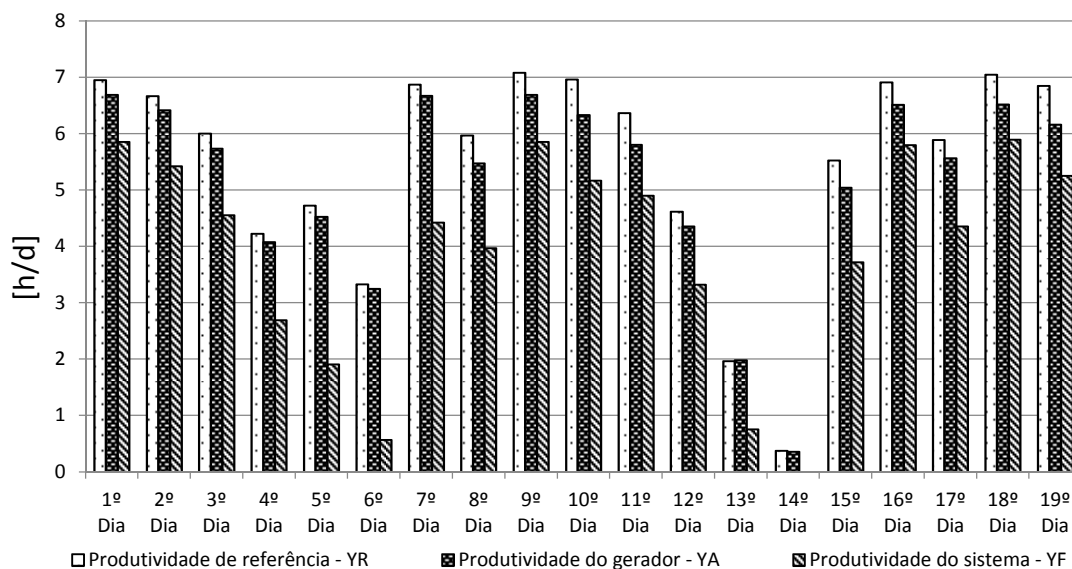


Figura 6 - Índices de produtividade dia a dia.

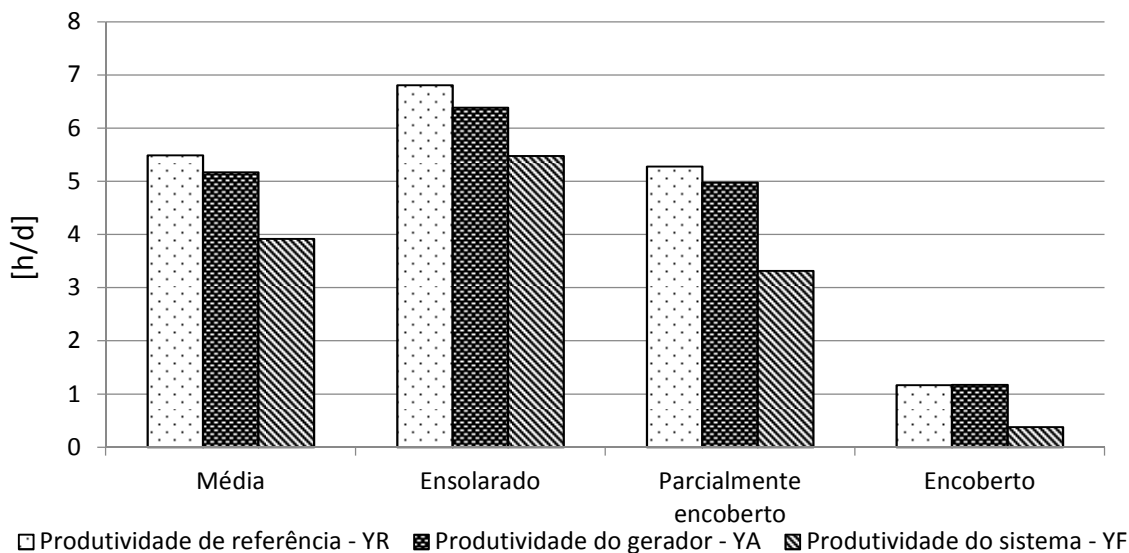


Figura 7 - Médias de produtividade para os dias típicos.

O gráfico da Fig. 7 mostra claramente que para o período de coleta de dados, os índices de produtividade apresentaram variações esperadas. Para dias ensolarados maior produtividade que os demais dias, isso em função de Y_R ser maior. Para o dia parcialmente encoberto, ficaram muito próximos da média de todo o período.

As temperaturas de módulo e microinversor para cada dia típico pode ser verificado na Fig. 8. Para os dias encobertos, a temperatura do módulo esteve abaixo da temperatura do microinversor. Para os dias parcialmente encobertos, as temperaturas estiveram muito próximas, já para os dias ensolarados, a temperatura do módulo esteve muito acima da temperatura do microinversor. Isso aumenta as perdas térmicas tanto na captura L_C quanto às do sistema

L_s . Quanto maior for à irradiância incidente no módulo, maior será a temperatura da célula e por consequência, maiores serão as perdas L_c . (Mayer, 1999).

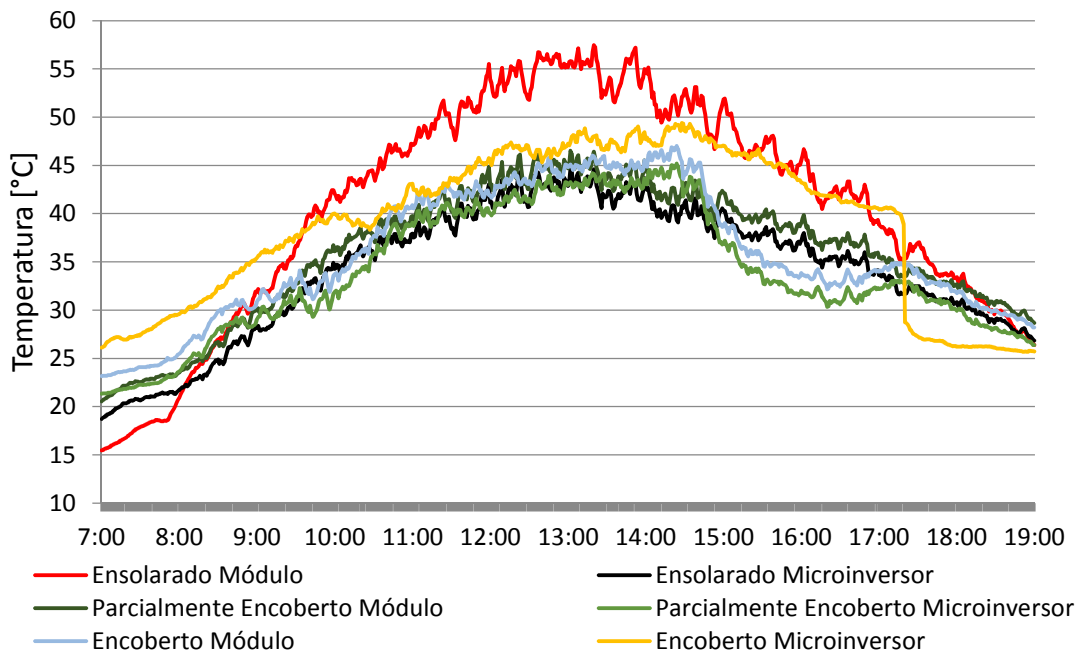


Figura 8 - Diferenças de temperaturas entre módulo e microinversor.

Dentro da análise de desempenho, a JRC recomenda que os dados da produção diária com suas respectivas perdas sejam apresentados num mesmo gráfico. Sendo assim, a Fig. 9 vem com esse enfoque, mostrar o comportamento entre produtividade e perdas para os dias típicos selecionados. As Eq. 6, 9 e 10 fornecem esses dados.

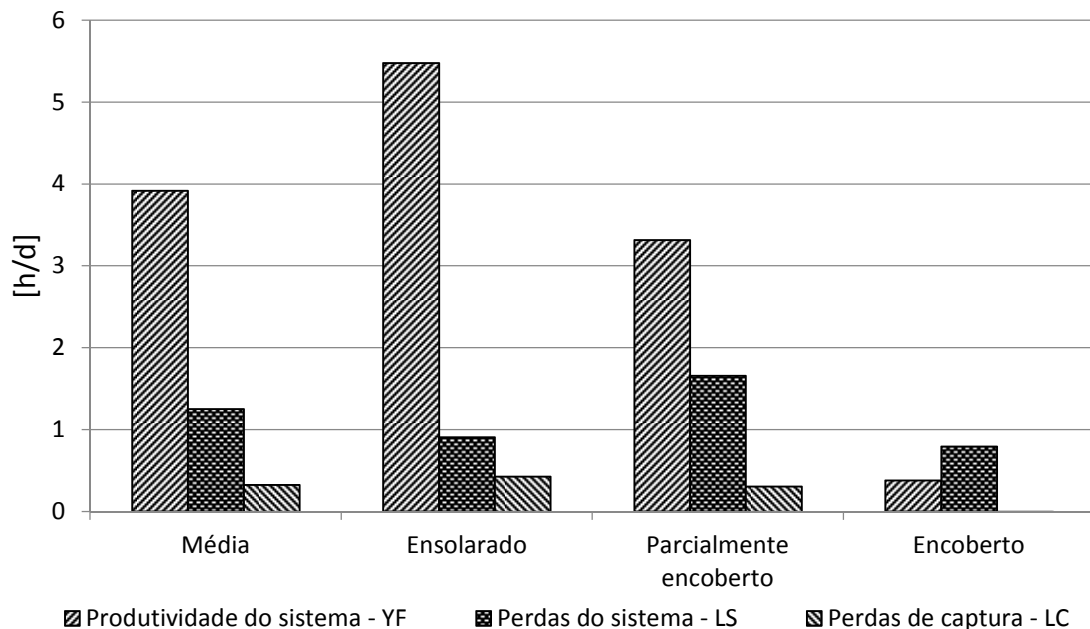


Figura 9 - Produtividade e perdas para dias típicos.

5.5 Geração de energia e eficiência do sistema

Dentro da análise do desempenho dos índices de mérito do sistema em estudo, existe uma relação entre a energia que chega do módulo FV [E_{cc}] e a energia que é entregue a rede elétrica [E_{ca}]. Seguindo o caminho da geração até o objetivo final que é a rede elétrica, é contabilizada a energia que entre no microinversor, que é a mesma que sai do

módulo FV, e a energia que sai do mesmo. A razão entre essas duas energias, E_{ca} e E_{cc} , encontra-se um índice de extrema importância para a análise do desempenho do sistema, a eficiência média do microinversor, gerada pela Eq. 3.

A Fig. 10 representa as energias na entrada e na saída do microinversor e suas respectivas eficiências para cada dia típico, na Fig. 11.

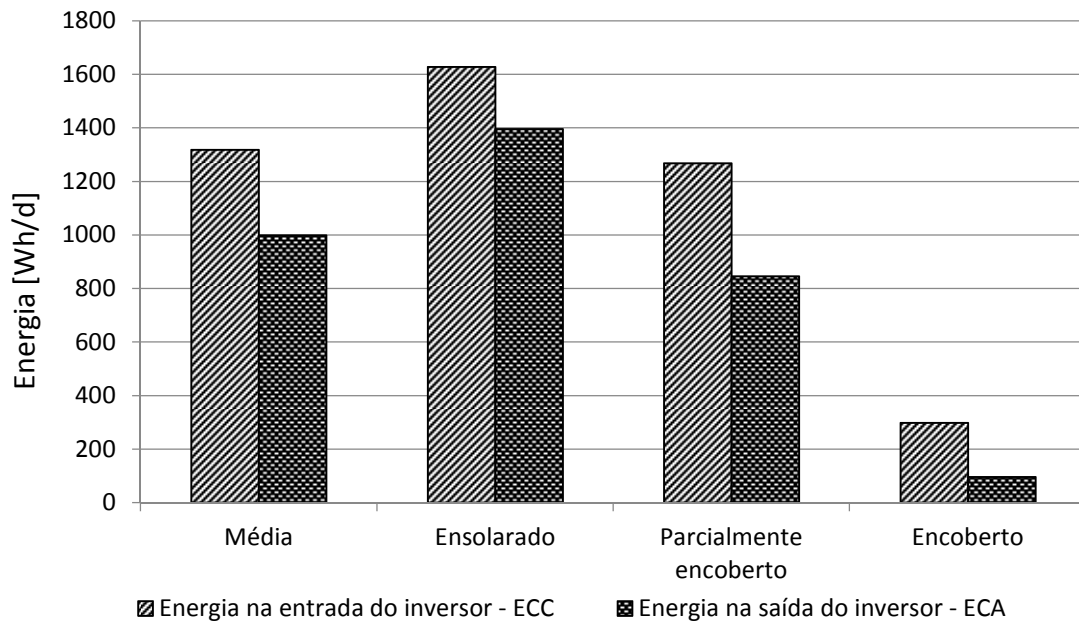


Figura 10 - Energias na entrada e saída do microinversor.

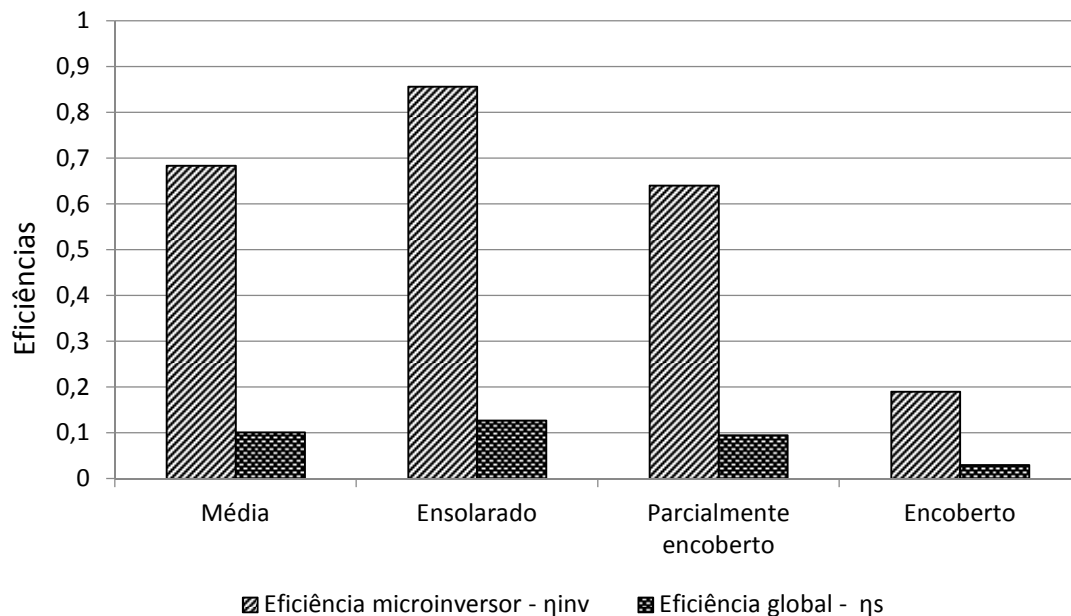


Figura 11 - Eficiências do sistema e do microinversor.

Dentro da parte de eficiência, a eficiência global do sistema, obtida através da Eq. 2, representa o quanto de energia elétrica produzida pelo módulo FV foi convertida em energia elétrica que foi entregue a rede elétrica. A Fig. 11 mostra a eficiência global para cada dia típico, sendo que não existiram grandes diferenças entre elas. Já a eficiência do microinversor ficou abaixo da tolerância especificada pelo fabricante do produto.

A Fig. 12 mostra como foi o desempenho global do sistema [P_R], que é a razão entre a energia gerada pelo sistema em relação à energia realmente disponível para um determinado período de tempo, obtido pela Eq. 8, e o fator de capacidade [C_F] é a capacidade do sistema em gerar energia elétrica em função de sua capacidade instalada durante um período de 24 horas. O fator de capacidade é encontrado através da Eq. 4.

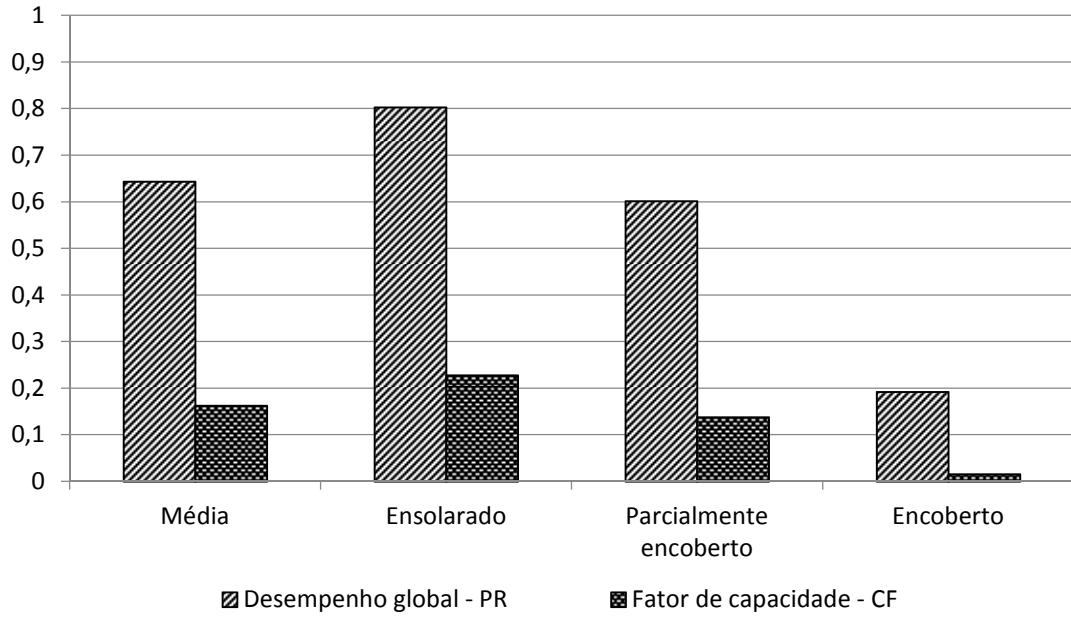


Figura 12 - Desempenho global e fator de capacidade.

Finalizando a análise dos índices de mérito, que demonstra como é o comportamento energético de uma determinada instalação, outro fator que importante (Dias, 2006) é a produção de energia elétrica diária [E_F] que mostra através da Eq. 11, a produção média de energia elétrica diária do sistema em estudo.

Considerando uma residência com consumo mensal médio de 100 kWh, obtendo uma média diária de 3,3 kWh, que corresponde a 24 % dos domicílios de uma zona rural de Manaus (Jannuzzi, 1997), se fosse instalado o sistema FV em estudo, cada família teria uma redução em torno de 30 % de seu consumo mensal. Dados esses que podem ser verificados na Fig. 13 que apresenta os valores de produção de energia elétrica para cada dia típico e sua respectiva média diária.

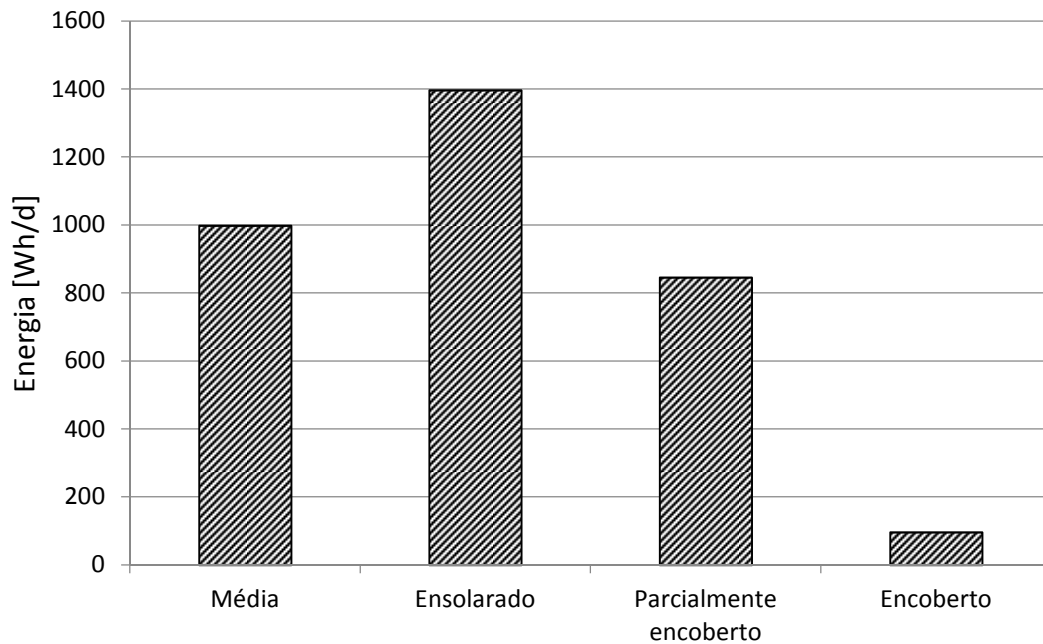


Figura 13 - Produção média diária de energia elétrica.

6. CONCLUSÃO

Esse artigo apresenta o comportamento de um sistema de geração de energia FV conectado à rede elétrica. Ele demonstra a produção de energia, com a utilização de um microinversor que funciona com baixos valores de tensão em sua entrada.

A análise foi realizada de acordo com os índices de mérito, demonstrando clareza nos valores obtidos, ficando evidente que para os dias ensolarados, onde a incidência da radiação é maior, a produção de energia injetada na rede elétrica também é maior comparado aos dias parcialmente encobertos e encobertos.

Sendo uma análise preliminar destes índices, com poucos dias de coleta de dados, este trabalho deve continuar por um período prolongado para se ter uma análise mais completa. No entanto, as medições obtidas revelam de certa forma a produção de energia com o uso deste microinversor. Relacionado às energias na entrada e na saída do microinversor, os valores para os dias parcialmente encobertos estão muito próximos se comparados à média de todos os dias. Ressalta-se que a produção de energia média, no mês de novembro de 2013, ficou da ordem de 30 kWh. Já para a média dos dias ensolarados, a produção chegou a 42 kWh, no mesmo período. Por outro lado, em dias plenamente encobertos, o microinversor não se conectou, o que fez aumentar as perdas de sistema L_S .

Salienta-se a importância da continuação deste estudo empregando microinversores, tendo em vista a inserção dos mesmos em sistemas de geração de energia para atender residências de baixo consumo elétrico.

Agradecimentos

Ao Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares, CAPES/PROSUP, pelo apoio prestado a este e aos demais participantes da equipe.

REFERÊNCIAS

- Dias, J. B., 2006. Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para Otimização do Fator de Dimensionamento, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Enphase Energy, 2012: “M215™ Microinverter”, catálogo do fabricante.
- Green, M., 2000. “Power to People”, University of South Wales Academic Press.
- JRC - Joint Research Centre – Ispra Establishment., “guidelines for the assessment of photovoltaic plants, Document B, Analysis and presentation of monitoring data, 1995.
- LG Electronics, 2011: “Mono X – LG255S1C”, catálogo do fabricante.
- Mayer, D., 1999. “Analyse des performances des Systèmes Photovoltaïques: Recommandation sur le Dimensionnement”, IEA – International Energy Agency, PVPS Task2.
- Oliveira, S. H. F., 2002. Geração Distribuída de Eletricidade: Inserção de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede no estado de São Paulo, Tese de Doutorado, PIPGE – (EP/FEA/IEE/IF), USP.

EVALUATION OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM WITH A MICRO-INVERTER

Abstract. *The grid connected photovoltaic power system aims at converting solar energy into electricity. Due to the growing demand for clean energy, micro-inverter are being developed to meet the demands of a population that requires a small amount of energy and areas of difficult access where there is no need for large installations . This study shows the energy analysis of a system of PV generation, consisting of one module and a microinversor connected to the grid, based on indices of merit determined by the European Economic Community (CEC - Joint Research Centre, 1993, apud Oliveira, 2002). The study was conducted in an experimental setting. The analysis was divided into typical days, sunny, partly cloudy and overcast, aiming to estimate the values of energy injected into the electric grid for each day in question, knowing also what were the main system losses and to estimate how much the economy could have a low income family whose energy consumption is in the range of 100 kWh per month. Designing a saving of approximately 30 %, the energy values were generated according to the expected, having a higher production for sunny days due to the incident on the module. However, there were overcast days where the radiation system is not connected*

Key words: Grid Connected System, Micro-inverter, Energy Analysis, Indices of Merit.