

# ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE INVERSOR *STRING* E MICRO INVERSORES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA COM SOMBREAMENTO PARCIAL

Ellen David Chepp – ellen.chepp@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

## 4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados.

**Resumo.** Atualmente, há duas principais configurações possíveis para painéis fotovoltaicos conectados à rede em geração distribuída: com um inversor *string* e com micro inversores. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi comparar a potência e a energia elétrica gerada com um inversor *string* e micro inversores em uma hipotética instalação localizada em Porto Alegre em dois dias do ano. A instalação estudada possui oito módulos de 60 células em série. A representação geométrica e a verificação do sombreamento na instalação foram feitas no SketchUp e a máxima potência para cada situação foi obtida com o programa Crearray. No Crearray, cada módulo foi dividido em três submódulos com 20 células em série e um diodo *bypass*. O sistema com um inversor *string* foi obtido inserindo os 24 submódulos em série e obteve-se a potência em cada intervalo de tempo dos dois dias estudados. Para o sistema com micro inversores, a potência de cada módulo foi obtida individualmente e a potência total foi a soma das potências individuais em cada intervalo de tempo. Verificou-se um aumento na potência do painel com o uso de micro inversores nos horários em que houve sombreamento parcial do painel. Ao longo dos dois dias, o ganho de energia elétrica com micro inversores foi de 1%. O ganho de energia e de potência máxima com o uso de micro inversores podem variar de acordo com as situações de sombreamento de cada instalação, quanto maior for a participação da radiação direta no horário considerado, maior é o impacto do sombreamento parcial do painel, e os resultados quantitativos obtidos são representativos para este caso estudado. Neste caso estudado, verificou-se que o ganho de eletricidade gerada seria menor que o aumento do custo da instalação com micro inversores em comparação a um inversor *string*, tornando essa configuração menos vantajosa.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Micro inversores, Sombreamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Em um sistema fotovoltaico (FV) conectado à rede, o inversor é responsável pela conversão da corrente contínua gerada pelo sistema em corrente alternada e pelo seguimento do ponto de máxima potência (SPPM), ponto da curva tensão *versus* corrente em que a potência é máxima (Prieb, 2011). Para esses sistemas, existem diferentes configurações de inversores que podem ser adotadas.

No caso de painéis FV (com uma única fileira de módulos em série) podem ser empregadas duas configurações, principalmente: inversor *string* e micro inversores. O inversor *string* é conectado a uma fileira de módulos em série, enquanto que cada micro inversor pode ser conectado a um único módulo. Portanto, o SPPM e a conversão de corrente contínua em alternada é feita em cada módulo individualmente por micro inversores (Zheng et. al., 2014). Em uma configuração com inversor *string*, situações de falha em um módulo ou em um inversor e situações de sombreamento de um módulo poderiam afetar o desempenho de toda fileira de módulos, o que seria evitado com o uso de um micro inversor para cada módulo, já que nesse caso falhas e sombreamento em um módulo afetariam somente a produção de energia desse módulo (Zheng et. al., 2014).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é a realização de um estudo comparativo do uso de um inversor *string* e de micro inversores em um hipotético sistema FV instalado em uma edificação localizada em Porto Alegre (RS), considerando as situações de sombreamento. Para isso, foi realizado um estudo do sombreamento na instalação em dois dias do ano representativos de verão e inverno e foram comparadas a potência máxima e a energia elétrica gerada nas duas configurações.

## 2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS SOMBREADOS

Quando ocorre o sombreamento de uma célula FV em um módulo, essa célula pode dissipar potência das demais células conectadas em série, ocasionando o fenômeno chamado de ponto quente (*hot-spot heating*) (Rampinelli; Krenzinger, 2006). Para evitar esse problema, um diodo de *bypass* é conectado em paralelo com polaridade inversa a um conjunto de células em série. Dessa forma, quando uma célula é sombreada o diodo passa a conduzir corrente, evitando o superaquecimento da célula. O sombreamento de uma célula causa uma redução da potência máxima de todo o módulo e se esse módulo estiver conectado em série com mais outros módulos, todo o painel pode ser afetado.

Zheng et. al. (2014) compararam a eletricidade gerada em um sistema FV com SPPM realizado por um conversor (DC/DC) central, *string* e micro conversores e verificaram que em situações sem sombreamento a potência máxima é igual para as três configurações, mas em caso de sombreamento, o micro conversor apresenta maior produção de energia. Portanto, em situações em que não há sombreamento no sistema, a diferença na produção de energia para as diferentes configurações de inversores ocorreria apenas pela diferença de eficiência entre o inversor *string* e os micro inversores empregados em um painel.

Krauter e Bendfeld (2017) testaram e classificaram treze micro inversores, as eficiências europeias obtidas pelos autores podem ser vistas na Tab. 1 e são calculadas conforme a Eq. (1), onde  $\eta_{x\%}$  é a eficiência correspondente a x% da potência nominal do inversor. A eficiência europeia é uma média ponderada das eficiências em diferentes percentuais da potência nominal AC do inversor e foi definida considerando dados de irradiação do noroeste da Alemanha a fim de se obter um valor que melhor representasse o desempenho do inversor (Prieb, 2011). Também de acordo com Krauter e Bendfeld (2017), o preço de usinas fotovoltaicas com micro inversores é cerca de 20% maior. Segundo o Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems – ISE (2017), os inversores *string* têm eficiência de até 98% e um custo de 7 a 20 centavos de euro por W, já os micro inversores têm eficiência de 90 a 95% e custo de 33 centavos de euro por W.

Tabela 1: Eficiência de alguns micro inversores. Fonte: Krauter e Bendfeld (2017).

Classificação	Fabricante	Eficiência Europeia
1	SMA	95,4%
2	Enphase	95,2%
3	Hoymiles	95,0%
4	ABB/Power One	94,6%
5	Involar MAC 500	94,3%
6	APS Y 500	94,1%
7	Envertech	93,2%
8	Involar MAC 250	92,7%
9	Changetec	90,9%
10	AEconversion	90,3%
10	Enecsys	90,3%
11	Ienergy	89,9%
12	Letrika 260	88,7%

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

### 3. METODOLOGIA

Para realizar o estudo comparativo proposto, foi feito um estudo de caso de uma hipotética instalação com oito módulos de 60 células em série e 250 Wp de potência, localizada em Porto Alegre (RS). O modelo da edificação foi desenvolvido no *SketchUp* e pode ser visto na Fig. 1. Os módulos FV dessa instalação são voltados para o norte com inclinação de 22° (todos estão no mesmo plano).

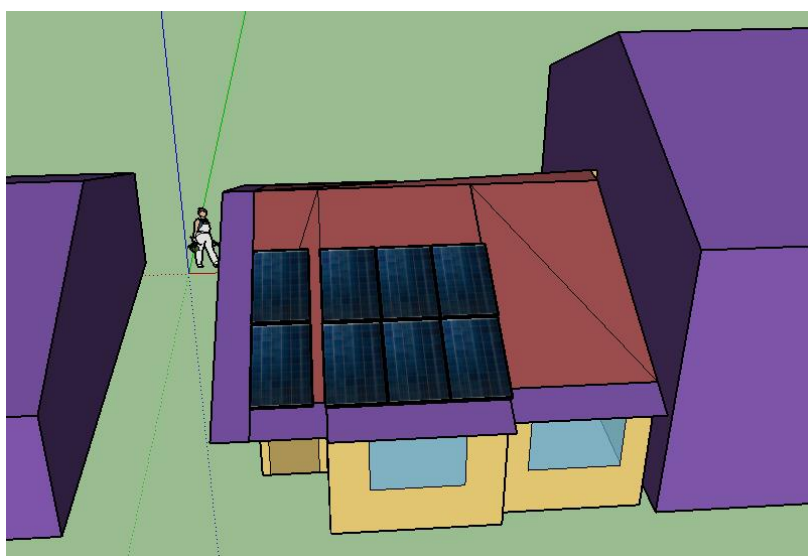


Figura 1 – Modelo da edificação com a instalação FV.

Através do programa *SketchUp* também foi possível verificar as sombras no painel. Ressalta-se que, como pode ser verificado na Fig. 1, as edificações vizinhas foram consideradas no modelo por serem possíveis fontes de sombra. Foram escolhidos os dias 17 de dezembro e 22 de julho neste estudo, por serem dias representativos de verão e de inverno de céu limpo (participação considerável de radiação direta). Nas Fig. 2 e 3, pode-se verificar as sombras na instalação nos dois dias a partir das 15 horas. No dia de verão, todos os módulos continuam na sombra após às 17 horas e 30 minutos. Já no dia de inverno, às 18 horas já é noite.

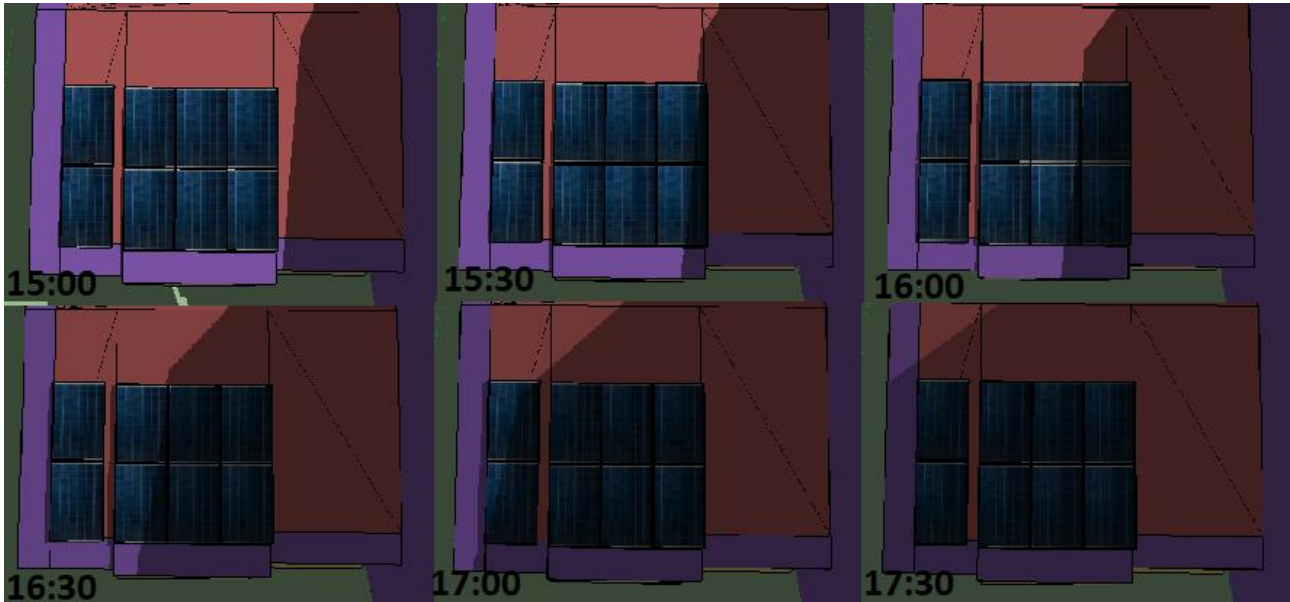


Figura 2 – Sombras na instalação no dia 17 de dezembro.

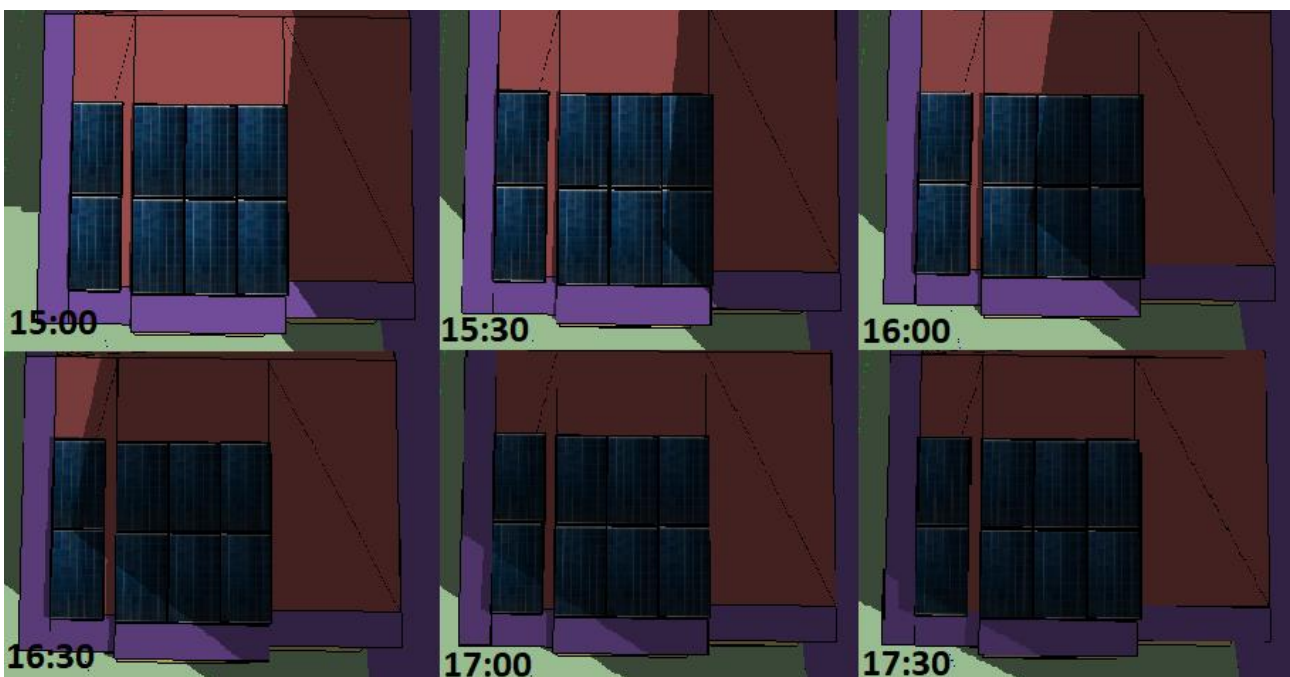


Figura 3 – Sombras na instalação no dia 22 de julho.

O programa *Crearray*, desenvolvido no Laboratório de Energia Solar – LABSOL da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, foi utilizado para simular a operação dos módulos. O programa permite que o usuário insira módulos e/ou células em série e/ou paralelo e apresenta a curva IV. Através de um arquivo de entrada fornecido pelo usuário com dados de irradiância e temperatura da célula ou do módulo, o *Crearray* pode calcular o ponto de potência máxima ou a corrente em função de uma tensão determinada, de acordo com a opção escolhida pelo usuário, e fornece os resultados em um arquivo de saída.

Para este trabalho, cada módulo foi dividido em três submódulos. Cada submódulo representa uma seção do módulo de 20 células em série e um diodo de *bypass*. A tensão de circuito aberto e a tensão de máxima potência de cada seção foram obtidos pela divisão desses parâmetros do módulo por três. As correntes de curto-circuito e de máxima potência foram mantidas iguais. Portanto, o arranjo foi composto por 24 seções de 20 células em série que representam os 8 módulos de 60 células em série. Dessa forma, foi possível analisar os efeitos de sombreamento parcial de um módulo, uma vez que uma célula sombreada tem o mesmo efeito que todo o submódulo sombreado. Foi escolhido um módulo policristalino presente no catálogo do programa, os dados desse módulo nas Condições Padrão (temperatura da célula igual a 25°C e irradiância solar de 1000W/m<sup>2</sup>) são apresentados na Tab.2.

Tabela 2: Dados do módulo escolhido para as simulações nas Condições Padrão de Teste.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência Nominal	246 W
Corrente de curto-circuito	8,914 A
Corrente de máxima potência	8,228 A
Tensão de circuito aberto	37,40 V
Tensão de máxima potência	29,89 V
Temperatura de Operação	46 °C
Número de células em série	60

Foram inseridos dois submódulos no programa, um representando os submódulos sombreados e outro, os submódulos não sombreados, com as características elétricas descritas anteriormente. Para cada intervalo de tempo, foram modificados os dados de irradiância e temperatura para esses submódulos. Os submódulos foram adicionados ao painel de acordo com o número de seções não sombreadas e na sombra para cada intervalo de tempo. Por exemplo, se houvesse somente um submódulo na sombra em determinado momento, seria adicionado ao painel um submódulo sombreado e 23 submódulos não sombreados. O ponto de máxima potência foi obtido a partir da curva IV gerada. Para realizar a análise da configuração com um inversor *string*, foi montado um painel com 24 submódulos em série. Já para a situação com micro inversores, a análise foi realizada com 3 submódulos em série (representando um módulo) e foi obtida a potência máxima para cada módulo. Nesse último caso, a potência total foi obtida pela soma das potências de cada módulo. Nas Fig. 4 e 5, pode ser visualizada a montagem do painel e do módulo individual, respectivamente, no Crearray.

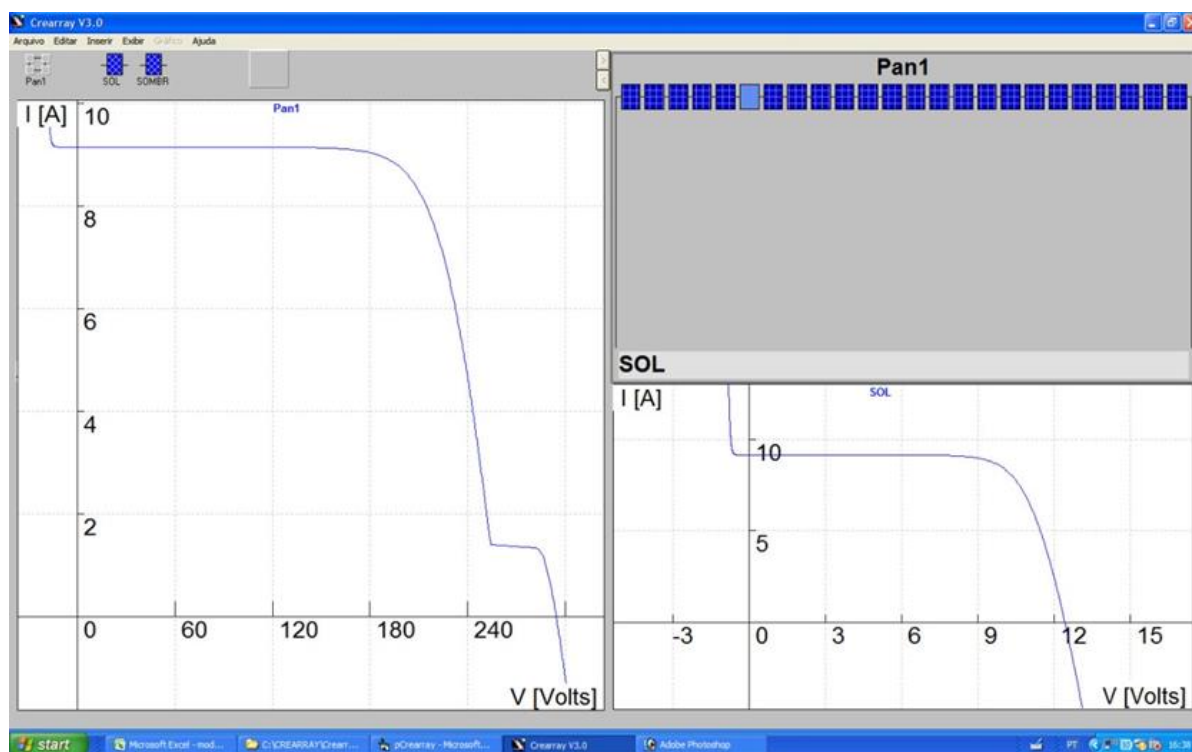


Figura 4 – Modelo da configuração com inversor *string* com dois submódulos na sombra.

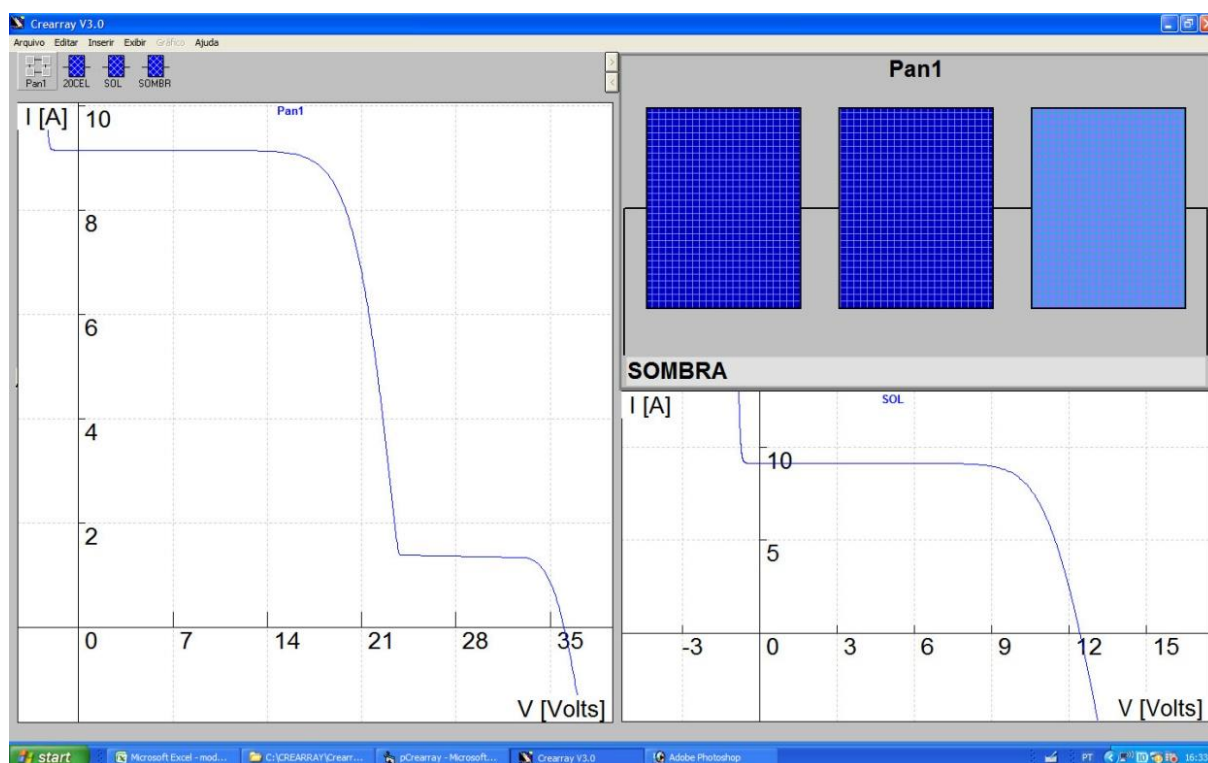


Figura 5 – Modelo da configuração com micro inversores (um módulo com um submódulo na sombra).

Os dados de temperatura ambiente e radiação foram obtidos com o programa Radiasol 2, também desenvolvido pelo LABSOL. Como o programa fornece dados horários, os valores de radiação e temperatura ambiente foram considerados constantes ao longo de cada hora. A temperatura da célula foi obtida a partir da Eq. (2) para cada intervalo de 30 minutos, onde  $T_{cel}$ ,  $T_{amb}$  e  $NOCT$  são as temperaturas (em °C) da célula, do ambiente e nominal de operação, respectivamente, e  $G$  é a irradiância no plano do módulo (em  $W/m^2$ ). A temperatura da célula foi considerada a mesma nas situações de sombreamento. Para as seções dos módulos não sombreadas, foram utilizados os dados de radiação global no plano inclinado. Já para os submódulos na sombra, considerou-se apenas a radiação difusa no plano inclinado.

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{(NOCT-20) G}{800} \quad (2)$$

Quando pelo menos uma célula do submódulo tinha mais de 50% de sua área na sombra, todo o submódulo foi considerado na sombra. A Tab. 3 resume as considerações feitas nos dois dias nos horários de sombreamento.

Tabela 3: Considerações feitas sobre as sombras nos módulos.

Horário	Considerações	
	Dia 17 de dezembro	Dia 22 de julho
15:00	Nenhuma célula sombreada.	1 submódulo sombreado.
15:30	3 submódulos sombreados.	6 submódulos sombreados.
16:00	7 submódulos sombreados.	13 submódulos sombreados.
16:30	15 submódulos sombreados.	22 submódulos sombreados.
17:00	23 submódulos sombreados.	Todos sombreados.
17:30	Todos sombreados.	Todos sombreados.

#### 4. RESULTADOS

A Fig. 6 apresenta as curvas IV do módulo sombreado e de um módulo não sombreado às 15h no dia 22 de julho, onde pode-se verificar o efeito do sombreamento na curva IV e na potência máxima do módulo. Esse efeito em todo o painel pode ser verificado na Fig. 7, considerando uma configuração com inversor *string*.

A eletricidade gerada por hora pelo painel nas duas configurações analisadas pode ser vista nas Fig. 8 e 9 para os dois dias. No dia 17 de dezembro, com o uso de micro inversores tem-se um ganho de energia elétrica horária de até 89 Wh. Já no dia 22 de julho, esse ganho de energia horária alcança 30Wh.

Ressalta-se que só há diferença na potência máxima do painel nos horários em que há sombreamento, a partir das 15 horas, e que essa diferença depende da proporção de radiação direta e difusa. Quanto maior a porção de radiação direta, maior é o impacto do sombreamento, uma vez que as células sombreadas recebem somente a radiação difusa. No final da tarde, a radiação difusa é predominante e em alguns horários todo o painel estava na sombra, por isso não ocorreu diferença entre as duas configurações nesse período no dia de verão. Portanto, em situações onde todo o painel está sob as mesmas condições, totalmente na sombra ou sem sombreamento, não há diferença de potência nas duas configurações.

A Tab. 4 apresenta a energia elétrica gerada, sem considerar as eficiências do inversor e dos micro inversores, para as duas configurações.

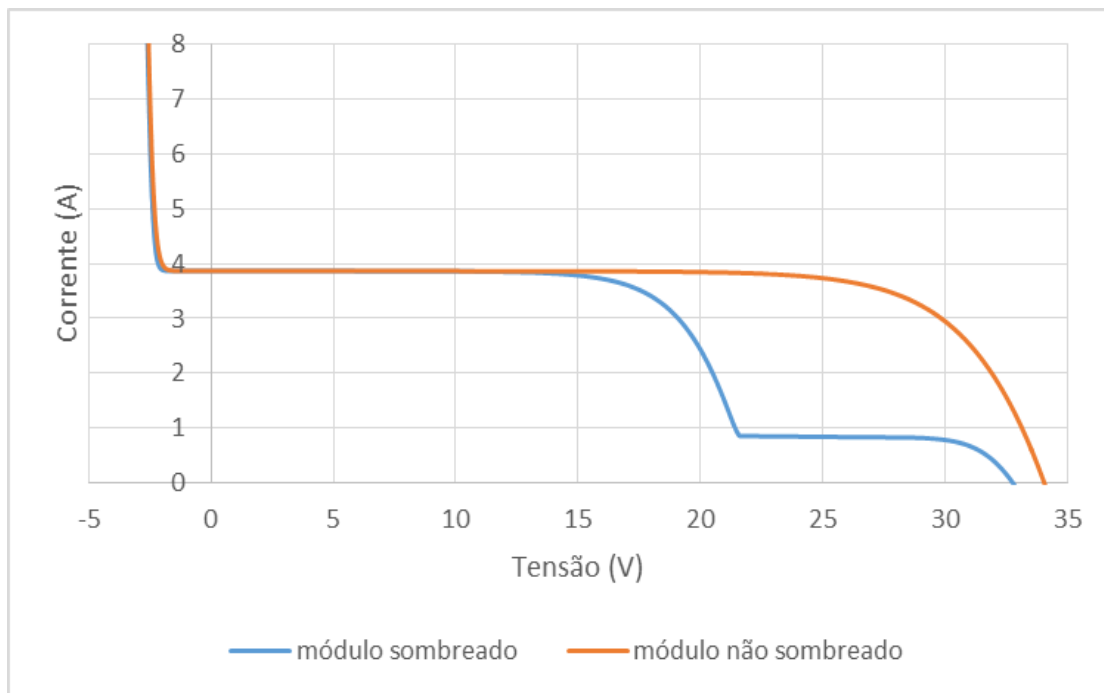


Figura 6 – Curvas IV do módulo sombreado e de um módulo não sombreado no dia 22 de julho às 15h.

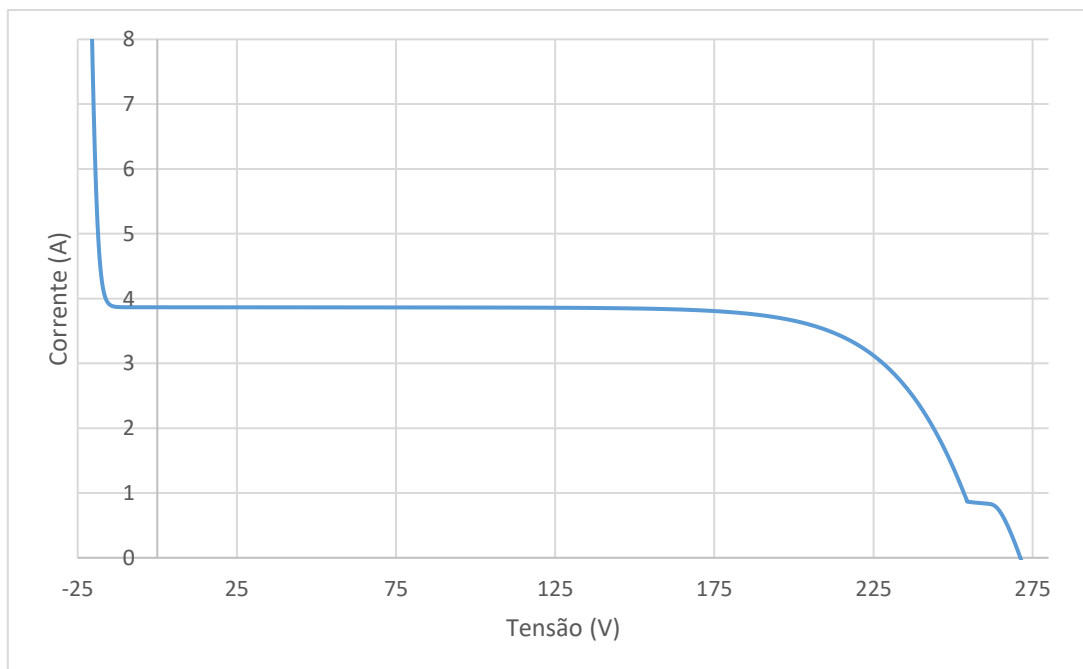


Figura 7 – Curva IV do painel no dia 22 de julho às 15h considerando uma configuração com um inversor *string*.

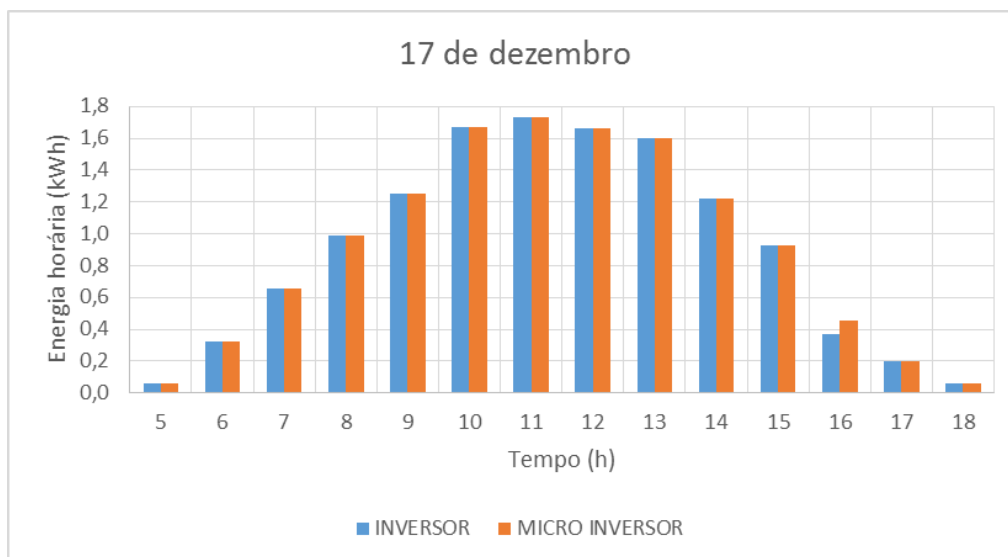


Figura 8 – Eletricidade gerada a cada hora para as duas configurações no dia 17 de dezembro.

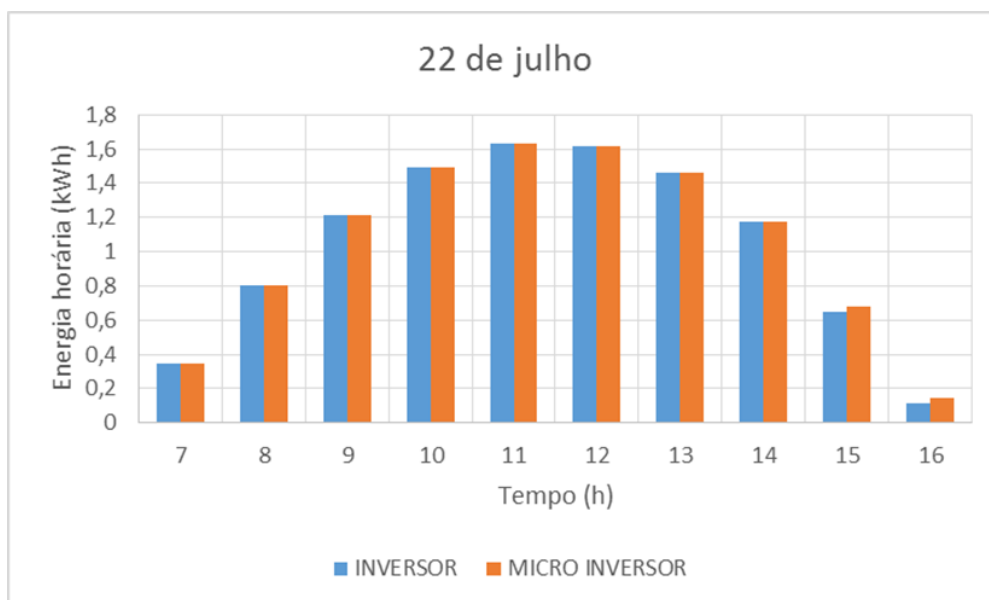


Figura 9 – Eletricidade gerada a cada hora para as duas configurações no dia 22 de julho.

Tabela 4: Comparação da energia elétrica gerada nas duas configurações para os dois dias.

Configuração	Eletricidade Gerada	
	17/dez	22/jul
Inversor String	12,7 kWh	10,5 kWh
Micro Inversores	12,8 kWh	10,6 kWh
Diferença	0,1 kWh (1%)	0,1 kWh (1%)

O custo de uma instalação com micro inversores é consideravelmente maior, podendo ser quase 5 vezes mais caro que um sistema com um inversor *string* (ISE, 2017) e neste caso, o ganho de energia é de aproximadamente 1%. Portanto, o sistema com micro inversores pode ser considerado menos vantajoso no sentido de que o aumento no custo supera o ganho na energia gerada, para este caso estudado.

É importante salientar que a diferença na energia elétrica gerada ao longo de um dia nas duas configurações depende da porção sombreada e do horário do sombreamento (quanto maior a porção de radiação direta, maior o impacto na potência máxima) e que houve um ganho na potência máxima do painel nos horários de sombreamento parcial com o uso de micro inversores. Portanto, os resultados quantitativos obtidos são representativos para este caso estudado especificamente.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar a potência e a energia gerada em uma instalação com um inversor *string* e micro inversores. Para isso, foi feito um estudo de sombreamento na instalação e foi utilizado o programa Crearray para obter a potência máxima para cada intervalo de tempo dos dois dias estudados, 17 de dezembro e 22 de julho.

Foi possível verificar que nos horários em todos os módulos estavam nas mesmas condições, ou seja, todos sem sombreamento ou todos na sombra, não houve diferença na potência máxima para as duas configurações. Nas situações de sombreamento parcial do painel, a configuração com micro inversores obteve maiores potências de saída.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que para o caso estudado, o ganho de energia elétrica ao longo dos dois dias foi de 1% com o uso de micro inversores, porém esse ganho é menor do que o aumento no custo do sistema, o que torna essa configuração menos vantajosa. Se ainda fosse considerada a diferença de eficiência entre os inversores, a pequena vantagem do ganho de energia elétrica no caso dos micro inversores iria ser invertida com vantagem para os inversores *string*. Ressalta-se que o ganho de energia elétrica e de potência máxima podem variar de acordo com as situações de sombreamento de cada instalação e que os resultados quantitativos obtidos são representativos para este caso estudado especificamente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

### REFERÊNCIAS

- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **PHOTOVOLTAICS REPORT**. Freiburg, 2017. Disponível em: < <https://www.ise.fraunhofer.de> > Acesso em: 16 nov. 2017.
- KRAUTER, Stefan; BENDFELD, Jörg. **UPDATE ON RANKINGS OF CONVERSION EFFICIENCIES AND ENERGY YIELD OF MICROINVERTERS, INCLUDING INVERTERS FOR TWO PV MODULES**. European photovoltaic solar energy conference and exhibition, 33., 2017, Amsterdam Amsterdam: 2017. 5 p.
- PRIEB, César Wilhelm Massen. **Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição**. 2011. 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- RAMPINELLI, A. G.; KRENZINGER, A.. EFEITO DO SOMBREAMENTO EM CÉLULAS DE UMA ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE. **Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente**, Argentina, v. 10, n. 4, p.9-16, jan. 2006.
- ZHENG, Huiying et al. Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configuration. **Renewable Energy**, Oxford, v. 68, p.58-66, ago. 2014.

### COMPARATIVE STUDY OF THE USE OF STRING INVERTER AND MICRO INVERTERS IN THE ELECTRICITY GENERATION OF A PHOTOVOLTAIC INSTALLATION WITH PARTIAL SHADING

**Abstract.** *Currently, there are two main possible configurations for photovoltaic panels connected to the grid in distributed generation: with a string inverter and with micro inverters. In this sense, the objective of this work was to compare the power and electricity generated with a string inverter and micro-inverters in a hypothetical installation located in Porto Alegre in two days of the year. The panel studied has eight modules of 60 cells in series. The geometric representation and check of the shading in the installation were made in SketchUp and the maximum power for each situation was obtained with the program Crearray. In the Crearray, each module was divided into three submodules with 20 cells in series and one bypass diode. The system with a string inverter was obtained by inserting the 24 submodules in series and the power was obtained in each time interval of the two days studied. For the system with micro-inverters, the power of each module was obtained individually and the total power was the sum of the individual powers in each time interval. There was an increase in panel power with the use of micro-inverters at times when the panel was partially shaded. Over the two days, the electric energy gain with micro-inverters was 1%. The power and maximum power gain with the use of micro-inverters can vary according to the shadowing situations of each installation, the greater the participation of the direct radiation in the considered time, the greater the impact of the partial shading of the panel, and the quantitative results obtained are representative for this case studied. In this case studied, it was verified that the generated electricity gain would be lower than the increase of the cost of the installation with micro inverters compared to a string inverter, making this configuration less advantageous.*

**Keywords:** Solar energy, Micro inverters, Shading.