

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA SOB CONDIÇÃO DE SOMBREAMENTO PARCIAL

VANESSA DA COSTA MARQUES, RONNAN DE BRITO CARDOSO, ROGÉRIO ALMEIDA, DARLAN FERNANDES

*Departamento de Engenharia Elétrica, DEE-UFPB
Cidade Universitária, João Pessoa - PB*

E-mails: [vanessa.marques, ronnan.cardoso, rogerio, darlan]@cear.ufpb.br

Abstract— This paper evaluates the injection of active power to the grid by photovoltaic modules submitted to the shadowing condition through two different arrangements of electronic converters. It is known that the main components of the photovoltaic systems connected to the electrical grid are the photovoltaic generator, the DC-DC converter and the inverter. Nevertheless, in most cases, one uses only a single converter connected to the photovoltaic modules. In order to increase the efficiency of photovoltaic systems connected to a power grid, one performed the study of a photovoltaic system that makes use of two converters in the facilities in a manner that it presents a greater yield than with the use of a single converter. In the first arrangement, four photovoltaic modules are connected to the electrical grid from a single boost converter cascaded with a PWM inverter; whilst, in the second arrangement, the connection of the four photovoltaic modules to the electrical grid involves two boost converters, with one converter for each two modules. Both DC-DC converters are connected in parallel and cascaded with the PWM inverter. Based on these two structures, the study aims to determine which of the arrangements has the best power gain taking into account shading conditions of the photovoltaic panels.

Keywords— Photovoltaic Solar Energy, Partial Shading, Conversion Efficiency, boost Converter, Electrical Network.

Resumo— Este trabalho avalia a injeção de potência ativa à rede elétrica por um sistema fotovoltaico submetido à condição de sombreamento através de dois diferentes arranjos de conversores eletrônicos. Sabe-se que os principais componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são o gerador fotovoltaico, o conversor CC-CC e o inversor. Entretanto, na maioria dos casos utiliza-se apenas um conversor conectado aos módulos fotovoltaicos. A fim de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, foi realizado o estudo de um sistema fotovoltaico que faz uso de dois conversores nas instalações a fim de que este apresente maior rendimento que apenas o uso de um conversor. No primeiro arranjo, quatro módulos fotovoltaicos são conectados à rede elétrica a partir de um único conversor *boost* ligado em cascata com um inversor PWM; enquanto que, no segundo arranjo, a conexão dos quatro módulos fotovoltaicos à rede elétrica envolve dois conversores *boost*, sendo um conversor para cada dois módulos. Ambos os conversores CC-CC são ligados em paralelo e em cascata com o inversor PWM. Com base nessas duas estruturas, o estudo objetiva determinar qual dos arranjos apresenta melhor ganho de potência tendo em conta condições de sombreamento dos painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave— Energia Solar Fotovoltaica, Sombreamento Parcial, Eficiência de conversão, Conversor *boost*, Rede Elétrica.

1. Introdução

Os problemas relacionados à degradação do meio ambiente na geração de energia elétrica, como por exemplo, impactos sociais e ambientais resultantes do represamento de rios aliado à diminuição das reservas de combustíveis fósseis, e ao aumento dos níveis de consumo de energia elétrica, deram surgimento às crises energéticas que obrigaram o homem a procurar outras fontes de energia. (COUTINHO, 2016).

Além da necessidade de novas fontes de energia, percebe-se a importância do investimento em novas fontes, como a fotovoltaica, pois é importante aproveitar recursos locais próximo aos pontos de consumo para produção de energia elétrica, diminuindo assim as perdas de distribuição e evitando os investimentos em obras de rede de expansão (CAAMAÑO MARTIN *et al*, 2008).

A Agência Nacional de Energia Elétrica regulamentou a geração por consumidores através da Resolução Normativa N° 482/2012. (ANEEL, 2012). Deste modo, o consumidor final do sistema pode

gerar e injetar energia elétrica na rede da distribuidora, o que se tornou um marco na política energética do país (NETO *et al*. 2014).

O rendimento das células fotovoltaicas depende de diversos fatores, tais como o posicionamento dos módulos, temperatura, e principalmente o sombreamento parcial, cuja ocorrência é inevitável (RÜTHER, 2004). A operação em módulo apresenta queda de rendimento em relação a eficiência das células individuais devido ao fator de empacotamento e à perda nas interconexões elétricas das células (LUANA *et al.*, 2016). Dessa forma, torna-se imprescindível a busca por soluções que promovam um melhor rendimento dos sistemas fotovoltaicos.

As principais estruturas dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são o gerador fotovoltaico, o conversor CC-CC e o inversor conectado à rede. Na maioria dos casos utiliza-se apenas um conversor conectado aos módulos fotovoltaicos, porém é necessário extrair o melhor proveito das células fotovoltaicas, pois o custo do investimento inicial é elevado. Desse modo, a fim de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, foi realizado o estudo de um sistema fotovoltaico que faz uso de dois

conversores nas instalações a fim de que esse apresente maior rendimento.

Sendo assim, faz-se necessário modelar o painel fotovoltaico representando-o matematicamente, de modo a se obter uma forma de comparar o desempenho dos módulos conectados à rede elétrica através de diferentes tipos de conexão. Neste trabalho, dois estudos de caso são propostos: no primeiro caso, dois conjuntos (constituídos cada um de 2 módulos fotovoltaicos em série) são ligados em paralelo à entrada de um único conversor CC-CC do tipo *boost*, que por sua vez é ligado em cascata a um inversor monofásico PWM conectado à rede elétrica; No segundo caso são utilizados dois conversores CC-CC ligados em paralelo e conectados ao inversor PWM, sendo que em cada conversor CC-CC constam ligados um conjunto de 2 painéis fotovoltaicos em série. Em ambos os casos, a situação de sombreamento parcial dos painéis fotovoltaicos é considerada. Com base nessas duas estruturas é verificado aquela que apresenta melhor eficiência quanto à injeção de potência ativa à rede elétrica.

2. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Monofásica

A estrutura simplificada do sistema fotovoltaico adotado neste trabalho é ilustrada na Figura 1.

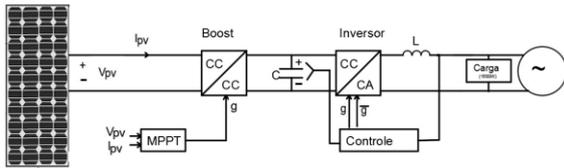


Figura 1. Sistema Fotovoltaico conectado à rede monofásica

Neste sistema o painel fotovoltaico é conectado à rede elétrica através da ligação em cascata de um conversor CC-CC do tipo *boost* e de um inversor PWM CC-CA. O conversor *boost* é controlado para rastrear o ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico utilizando a técnica Perturba & Observa de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) (BUSA *et al.*, 2012). Por outro lado, o controle do inversor formado por controladores PIs visa manter a tensão no barramento CC constante com injeção de potência ativa à rede elétrica com fator de potência unitário. Este sistema também é constituído de um PLL para sincronização do inversor PWM com a rede elétrica, cuja estrutura é a apresentada em (KAURA, V. *et al.*, 1997). Com base nesse sistema simplificado serão apresentadas duas diferentes configurações de ligação dos conversores CC-CC e CC-CA a fim de se obter a estrutura com melhor rendimento para arranjo de painéis fotovoltaicos sob condição de sombreamento.

2.1. Painel Fotovoltaico sob Condição de com Sombreamento Parcial

Um painel fotovoltaico é constituído por células fotovoltaicas que são ligadas entre si, tal que, a configuração de ligação produza uma dada tensão e corrente específicas.

O circuito ideal de uma célula fotovoltaica pode ser definido como uma fonte de corrente contínua em paralelo com um diodo. Contudo, tendo em conta as perdas ôhmicas associadas às correntes de condução e de fuga, e representadas através de resistências em série (R_s) e em paralelo (R_p), respectivamente, o circuito adequado e comumente adotado para representar uma dada célula fotovoltaica é mostrado na Figura 2.

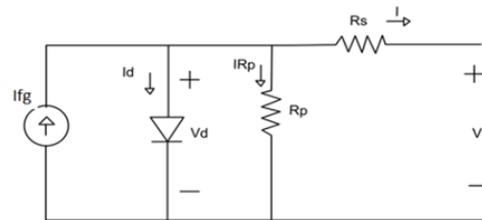


Figura 2. Circuito equivalente representativo de uma célula fotovoltaica.

Aplicando a lei dos nós de Kirchhoff no circuito da Figura 2 obtêm-se a equação definida em (1).

$$I = I_{fg} - I_d - I_{R_p} \quad (1)$$

Onde I é a corrente de saída da célula fotovoltaica; I_{fg} é a corrente fotogerada; I_d é a corrente que passa pelo diodo; e I_{R_p} é a corrente de fuga.

Sendo a corrente fotogerada expressa como:

$$I_{fg} = \frac{G}{G_{max}} (I_{cc} + K_I \Delta T) \quad (2)$$

Onde G é a irradiância em W/m^2 ; G_{max} é a irradiância na condição padrão de operação e igual a $1000 W/m^2$; I_{cc} é a corrente de curto circuito do painel; K_I é o coeficiente de temperatura; e ΔT a variação e temperatura do painel.

E a corrente do diodo descrita por (MASTERS, 2004), é definida como:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{a \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Em que I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo; q é a carga do elétron; V_d é a tensão sobre o diodo; a é o fator de idealidade do diodo; K é a constante do Boltzman; e T é a temperatura da célula fotovoltaica.

Com base na equação de uma célula fotovoltaica, onde $V_d = R_s I + V$, sendo V a tensão de saída da célula fotovoltaica, a representação matemática de um dado arranjo de painéis fotovoltaicos ligados em série e em

paralelo é definida como:

$$I = \left[N_p I_{fg} - N_p I_o \left[e^{\frac{q \cdot (N_s/N_p) R_s I + V_p}{N_s \cdot a \cdot K T}} - 1 \right] - \frac{(N_s/N_p) R_s I + V_p}{(N_s/N_p) R_p} \right] \quad (4)$$

Em que N_s consiste no número de painéis em série; N_p o número de painéis em paralelo; e V_p é a tensão resultante do arranjo de painéis fotovoltaicos.

A partir da equação (4) é possível obter tanto a curva I-V como a curva P-V de um dado painel fotovoltaico e/ou arranjo de painéis. Através dessas curvas obtêm-se as correntes e tensões associadas às máximas potências que o painel e/ou arranjo de painéis pode desenvolver para um dado valor de irradiância e temperatura.

No presente trabalho, o modelo do painel fotovoltaico utilizado e implementado no ambiente computacional Matlab/Simulink® foi o módulo LF-335-WP-US do fabricante *Lifeline Energy* (LF 335-WP-US DATASHEET, 2018), cujas curvas I-V e P-V e as especificações elétricas para as condições de teste padrão ($G_{max} = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) são apresentados na Figura 3 e Tabela 1, respectivamente.

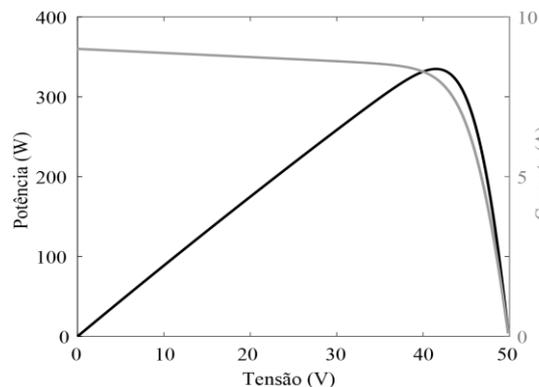


Figura 3. Curva I-V e P-V do módulo fotovoltaico LF-335WP-US.

Tabela 1. Especificações elétricas do módulo fotovoltaico LF-335WP-US

Potência Máxima do Módulo (P_{mp})	335 W
Corrente em Máxima Potência (I_{mp})	8,07 A
Tensão em Máxima Potência (V_{mp})	41,5 V
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	49,9 V
Corrente de curto circuito (I_{cc})	9,0 A
Resistência paralela ao diodo (R_p)	77,6407 Ω
Resistência série (R_s)	0,25633 Ω

Para propósitos de simulação das condições de sombreamento parcial dos painéis fotovoltaicos e variação dos níveis de irradiância foram considerados, a princípio, dois painéis, ligados em série. Na Figura 4 são apresentados os resultados das simulações realizadas para esta configuração, onde se verifica que a diminuição da radiação incidente sobre o arranjo de painéis afeta de modo considerável o valor do pico

de potência máxima produzida pelo arranjo. Isto ocorre devido à redução do valor da intensidade de corrente fotogerada.

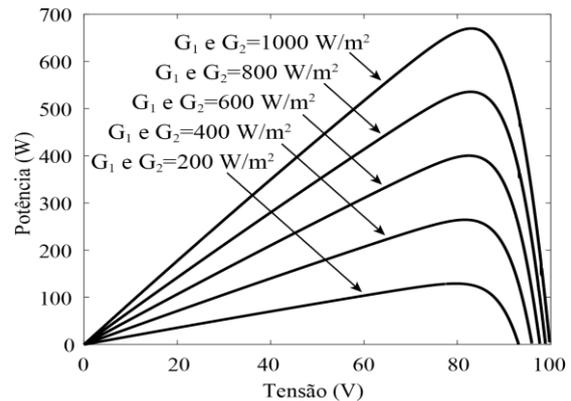


Figura 4. Curvas P-V do arranjo fotovoltaico, com diferentes níveis de radiação.

Na Tabela 2 são resumidos os valores das potências máximas produzidas pela configuração de painéis para os diferentes valores de irradiância e temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 2. Efeito da variação do nível de radiação do sistema sobre a potência máxima produzida

Nível de Radiação do Sistema – G_1 e G_2 (W/m^2)	Potência Máxima Produzida (W)
1000	669,8
800	535,6
600	400,3
400	264,4
200	129,2

Caso ocorra sombreamento parcial, o desempenho de todo o sistema fotovoltaico é afetado. O diodo de *bypass* é um dispositivo de proteção, utilizado para que a corrente possa contornar o módulo que está levemente irradiado, a fim de evitar que a única corrente do módulo sombreado possa reduzir a corrente de todo o conjunto fotovoltaico, conforme é ilustrado na Figura 5.

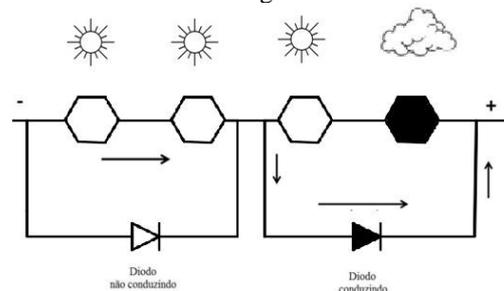


Figura 5. Esquema de funcionamento do diodo de *bypass* em painéis reais.

Na Figura 6 são apresentados os resultados das simulações em que o segundo painel da configuração adotada sofre variações na radiação incidente, já o primeiro se manteve com radiação constante, $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$. A curva P-V do arranjo apresenta múltiplos picos ocasionados pelo sombreamento parcial.

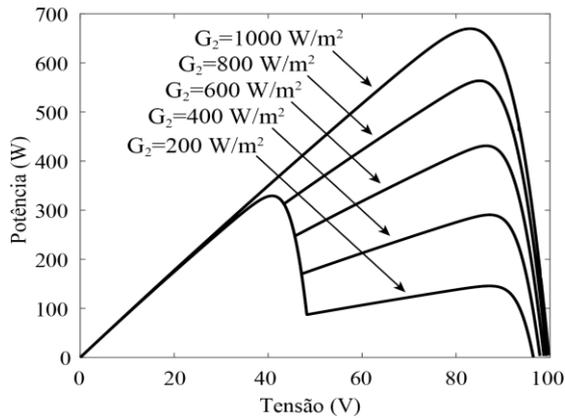


Figura 6. Curva P-V do arranjo fotovoltaico, com diferentes níveis de sombreamento parcial.

Na Tabela 3 são resumidos os valores das potências máximas produzidas pela configuração de painéis para os diferentes valores de sombreamento parcial.

Tabela 3. Efeito da variação do sombreamento parcial sobre a potência máxima produzida

Nível de Radiação no Painel 1 – G_1 (W/m^2)	Nível de Radiação no Painel 2 – G_2 (W/m^2)	Potência Produzida (W)
1000	1000	669,8
1000	800	563,7
1000	600	431,1
1000	400	329,2
1000	200	329,2

3. Resultados e Análises de Simulação

Com a finalidade de estudar a dinâmica da conexão dos módulos fotovoltaicos com a rede elétrica, a estrutura simplificada apresentada na Figura 1 foi construída no ambiente Matlab/Simulink®. Contudo, foi adicionada uma carga de 1600 W para emular, por exemplo, a carga equivalente de um ar-condicionado. A fim de alimentar tal carga, foram utilizados quatro painéis fotovoltaicos LF-335-WP-US.

Os painéis fotovoltaicos foram ligados à rede elétrica de duas maneiras. No primeiro modo de ligação (*Caso 1*) dois conjuntos constituídos cada um de 2 módulos fotovoltaicos em série são ligados em paralelo à entrada de um único conversor CC-CC do tipo *boost*, conforme é apresentado na Figura 7. Por outro lado, no segundo modo de ligação (*Caso 2*) foram utilizados dois conversores *boost* ligados em paralelo, pelos quais foram ligados dois painéis em série em cada conversor, respectivamente, conforme apresentado na Figura 8. Para propósitos de simulação, em ambos os casos a temperatura considerada foi de 40 °C.

É de referir que que no *Caso 2* cada um dos conversores *boost* apresenta metade da potência do conversor *boost* do *Caso 1*. Com efeito, pode-se considerar que em ambos os casos de estudo o custo de implementação é relativamente o mesmo.

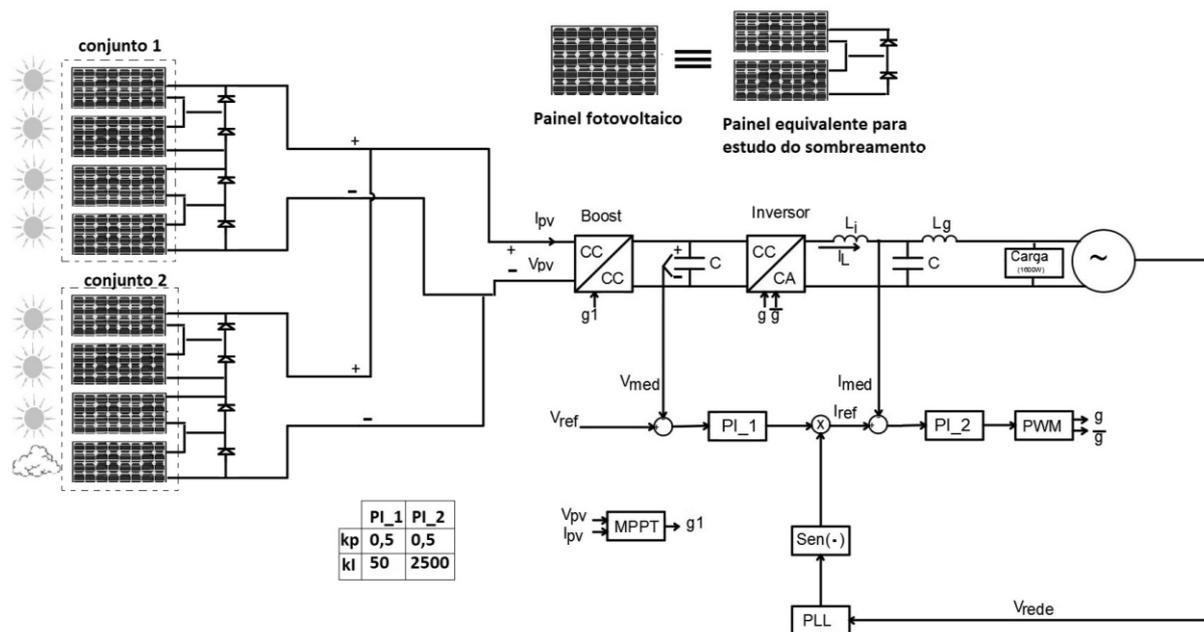


Figura 7. Quatro painéis fotovoltaicos conectados a um único conversor elevador de tensão e conectados a rede elétrica.

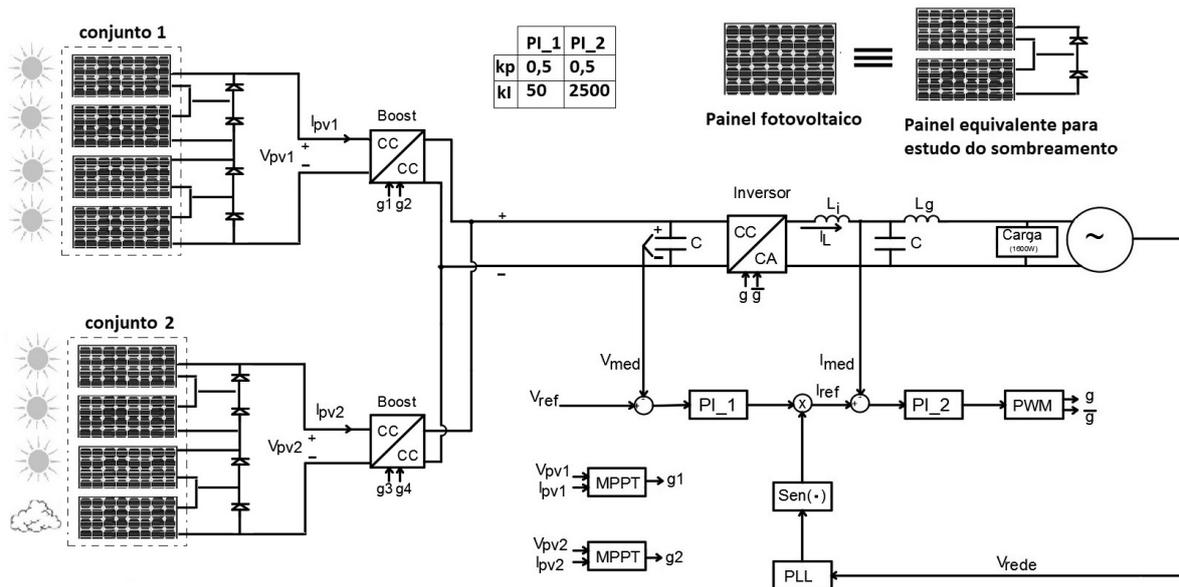


Figura 8. Quatro painéis fotovoltaicos conectados a rede elétrica através de dois conversores elevador de tensão.

3.1. Caso 1

Para este caso de estudo foi adotado um tempo total de simulação de 1s em que nos primeiros 500ms foi assumido que todos os módulos estão submetidos à mesma irradiação solar, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 1000\text{W/m}^2$, porém, a partir de 500 ms de simulação o módulo 4 do conjunto 2 sofre mudança na irradiância de $G_4=500\text{W/m}^2$, desse modo o arranjo se torna parcialmente sombreado. Conforme mostrado na Figura 9, o sistema sem sombreamento apresenta um valor de máxima de potência de 1245 W, enquanto que na situação de sombreamento parcial o sistema passa a apresentar o valor máximo de potência de 951,6 W.

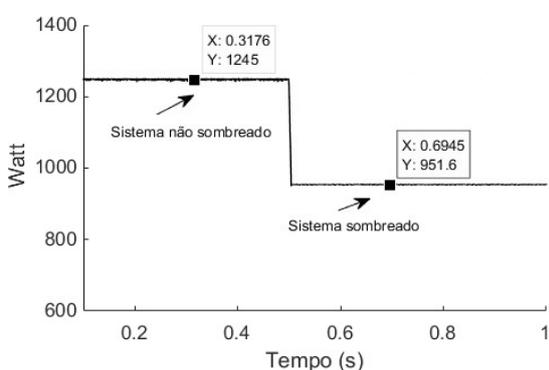


Figura 9. Potência dos painéis conectados à rede elétrica.

3.2. Caso 2

Para este caso também foi adotado um tempo de simulação de 1 s. Nos primeiros 500ms de simulação todos os módulos encontram-se submetidos à mesma irradiação solar, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 1000\text{W/m}^2$, e a partir de 500 ms de simulação o módulo 4 sofre mudança na irradiância, sendo esse módulo

pertencente ao segundo conjunto de painéis (ver Fig. 8).

O resultado da simulação do caso 2 no grupo de módulos em condições de operação normal (conjunto 1) e o grupo onde ocorre o sombreamento parcial (conjunto 2), é apresentado na Figura 10.

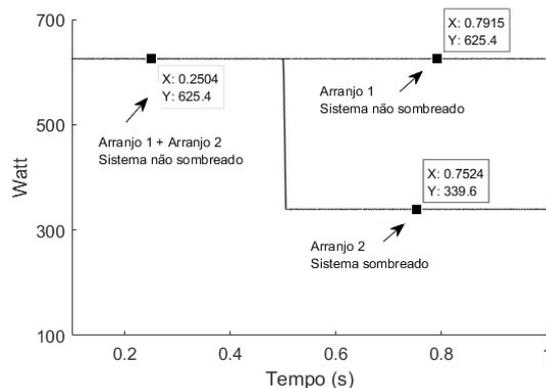


Figura 10. Potência dos painéis conectados à rede elétrica.

Pode-se observar, através da Figura 10, que ambos os arranjos de painéis (conjuntos 1 e 2) apresentam potências de 625,4 W durante o tempo em que não há sombreamento em um dos arranjos. No entanto, durante o sombreamento parcial, o conjunto 2 de painéis passa a apresentar a potência de 339,6 W. Todavia, nesta configuração o valor total de potência (soma das potências de ambos os conjuntos 1 e 2) que é fornecido para a carga durante o período de não sombreamento corresponde a 1251 W. Por outro lado, na condição de sombreamento parcial a potência fornecida para carga atinge o valor de 965 W.

Dessa forma, ao comparar os Casos 1 e 2 constata-se que existe um ganho na potência referente à condição de sombreamento parcial para o caso em que se têm dois conjuntos de dois painéis

fotovoltaicos conectados separadamente através de dois conversores *boost*. Estes resultados são apresentados na Figura 11 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 4. Comparação de potência dos painéis

Potência dos painéis com um <i>boost</i> versus com dois <i>boost</i>		
Quantidade de conversores utilizados:	Condição de não sombreamento:	Condição de sombreamento parcial:
1 <i>boost</i>	1245 W	951,6 W
2 <i>boost</i>	1251 W	965,0 W

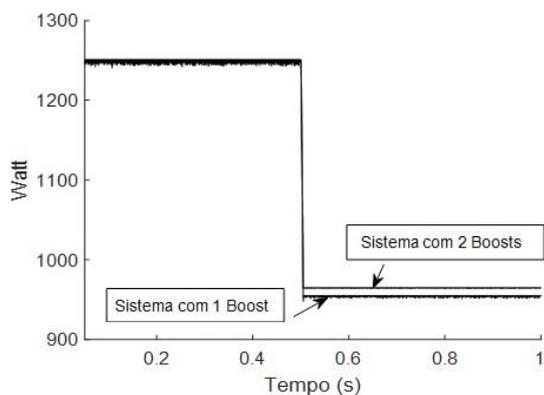


Figura 11. Potência dos painéis com um *boost* versus com dois *boost*.

Pode-se constatar que ao utilizar um único conversor *boost* conectado a dois conjuntos em paralelo de painéis fotovoltaicos (*Caso 1*), haverá apenas uma única curva P-V associada a essa configuração de painéis. Assim, todo o sistema é afetado na condição de sombreamento parcial tal que o controle de MPPT extrai um valor de potência máxima que não é a potência máxima dos painéis devido à condição adversa do sombreamento.

Por outro lado, ao adotar dois conversores *boost* em que cada conversor é conectado a dois conjuntos de painéis separadamente, sendo um grupo de módulos em condições de operação sem sombreamento, e outro grupo submetidos ao sombreamento parcial (*Caso 2*), haverá duas curvas P-V correspondentes a cada grupo de painéis. Dessa forma o controle de MPPT relativo ao primeiro grupo de painéis não sombreado vai extrair de sua curva P-V a máxima potência em condições nominais de operação. Já o MPPT associado ao grupo sob condição de sombreamento vai extrair da sua curva P-V uma potência que não será a máxima nominal dos painéis, mas sim a máxima potência para a condição de operação em sombreamento parcial. Entretanto, essa configuração permite obter um ganho de potência com relação ao *Caso 1*.

4 Conclusões

Comparando os sistemas fotovoltaicos com um e dois conversores CC-CC tipo *boost*, respectivamente, ambos sob condições de sombreamento parcial,

conclui-se que a utilização de dois conversores apresenta um ganho de potência de 1,41% durante a situação de sombreamento parcial.

A diferença de potência entre os dois casos estudados pode parecer pequena inicialmente, entretanto, vale salientar que para este trabalho foram utilizados poucos painéis fotovoltaicos, porém, para sistemas fotovoltaicos maiores o ganho de potência pode ser relevante.

Neste artigo foi utilizado o mesmo conversor CC-CC para ambos os casos em que se conectam os dois conjuntos de módulos fotovoltaicos à rede elétrica através de um único conversor, e para o caso em que se fez uso de dois conversores para conectar os dois conjuntos de módulos fotovoltaicos à rede elétrica. Porém, na prática, isso pode conduzir a um aumento de custo de implementação do sistema. Todavia, pode-se utilizar dois conversores *boost* de menor potência, já que eles estão ligados a um menor número de módulos fotovoltaicos. Assim, caso seja feita uma análise de custo, conversores menores poderiam proporcionar custos menores ou até iguais ao uso de um único conversor de maior potência.

Referências Bibliográficas

- ANEEL (2012). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- Busa, *et al* (2012). Simulation Analysis of Maximum Power Control of Photovoltaic Power System. International Journal on Advanced Electrical and Electronics Engineering, Vol.1, pp. 9-14.
- Caamaño Martín *et al* (2008). Interaction Between Photovoltaic Distributed Generation and Electricity Networks. Progress in Photovoltaics: research and applications, Vol. 16, pp. 629-643.
- Coutinho, Carlos (2016). O efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos fotovoltaicos. Dissertação. São Mateus. UFES.
- Kaura, V. and Blasko, V. (1997). Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. IEEE transactions on industry applications, Vol. 33, No 1, pp 58-63.
- Luana *et al* (2016). Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. Engenharias On-line.
- Masters (2004). Renewable and efficient electric power systems. Stanford University. John Wiley & Sons.
- Neto *et al* (2014). A resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL: possibilidades e entraves para a microgeração distribuída. Revista Brasileira de Energia Solar, Vol. 5, No. 2, pp. 119-127.
- Rüther (2004). Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis.
- LF-335WP-US Datasheet da Lifeline Energy, disponível em: <<http://dayandnightsolar.com/wp-content/uploads/Lifeline-Energy-335W-PV-Module.pdf>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2018.