

Estudo da influência da temperatura e sombreamento em módulo fotovoltaico monocristalino PERC

Nicole Polityto Cremasco¹

Edwin Augusto Tonolo¹

Jorge Assade Leludak¹

Jair Urbanetz Junior¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

A avaliação da eficiência de módulos fotovoltaicos é realizada por meio das condições de teste, em laboratórios localizados em ambientes fechados, com controle dos parâmetros externos, todavia quando situado em regiões externas o módulo é exposto a condições meteorológicas diferentes das utilizadas nas condições de teste. Como uma das formas de mensurar o comportamento de determinado módulo fotovoltaico é a utilização das curvas I_xV e curvas P_xV , que fornecem as características elétricas dele, a utilização delas em áreas externas possibilita a avaliação dos módulos sobre as condições reais de operação deles. Portanto, este artigo analisa as divergências nos parâmetros elétricos e nas curvas I_xV e P_xV de um módulo fotovoltaico monocristalino PERC, pois devido à diferença de arquitetura de módulo, a tecnologia PERC possui eficiências superiores às convencionais, e além disto não há muitos estudos a respeito do comportamento desta tecnologia sobre diferentes condições de sombreamento e temperatura, em especial no estado do Paraná. Com relação à análise da influência da temperatura, os valores calculados e medidos obtiveram pequenas diferenças percentuais de valores, sendo que em maiores temperaturas as diferenças percentuais entre os valores calculados e medidos foram superiores aos casos de menor temperatura. A diferença percentual entre os valores calculados e medidos de máxima potência variaram entre 4% e 7%, enquanto de corrente de curto circuito foram inferiores a 1% e tensão de circuito aberto variaram entre 6% e 9%. Com relação ao sombreamento, a alteração das curvas I_xV e P_xV se relacionou a quantidade de diodos de *bypass* acionados, e não a quantidade de células sombreadas.

Palavras-chave: Curvas I_xV e P_xV , perdas por temperatura, perdas por sombreamento

ABSTRACT

The evaluation of the efficiency of photovoltaic modules is carried out through the test conditions, in laboratories located in closed environments, with control of the external parameters, however when located in external regions the module is exposed to different meteorological conditions from those used in the test conditions. One of the ways to measure the behavior of a given photovoltaic module is the use of I_xV and P_xV curves, which provide its electrical characteristics. This article analyzes the divergences in the electrical parameters and in the I_xV and P_xV curves of a PERC monocrystalline photovoltaic module, because due to the difference in module architecture, the PERC technology has efficiencies superior to the conventional ones, and furthermore, there are not many studies regarding the behavior of this technology on different shading and temperature conditions, especially in the state of Paraná. Regarding the analysis of the influence of temperature, the calculated and measured values obtained small percentage differences of values, and in higher temperatures the percentage differences between the calculated and measured values were higher than the cases of lower temperature. The percentage difference between the calculated and measured values of maximum power varied between 4% and 7%, while short-circuit current was less than 1% and open-circuit voltage varied between 6% and 9%. With regard to shading, the change in the I_xV and P_xV curves was related to the number of bypass diodes activated, and not the number of shaded cells.

Keywords: I_xV and P_xV curves, temperatures losses, shadowing losses

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Peng et al. (2019), a avaliação da eficiência dos módulos fotovoltaicos é realizada em laboratórios sobre condições específicas de teste denominadas STC (*Standart Test Conditions*), nas quais considera-se a temperatura de célula como 25° C, a massa de ar como 1,5 AM e a irradiância como 1000 W/m².

Todavia, os sistemas fotovoltaicos são instalados em regiões externas com diferentes condições meteorológicas, nas quais os valores de temperatura e irradiância são diferentes do padrão STC. Além disto, nas condições reais dos locais de instalação podem existir obstáculos que causam sombreamento parcial do painel fotovoltaico e, conseqüentemente, podem gerar redução da eficiência. Sendo assim, é importante

realizar medições *in loco*, levando em consideração as diferentes condições meteorológicas.

Segundo Brito(2018), uma das formas para avaliação do módulo em campo é a análise das curvas $I \times V$, e curvas $P \times V$, pois através delas é possível obtenção de valores referentes às características elétricas dos módulos fotovoltaicos, tais quais a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a máxima potência (P_{mp}), corrente de máxima potência (I_{mp}) e tensão de máxima potência (V_{mp}).

Estudos realizados a respeito da análise em campo de módulos fotovoltaicos por utilização das curvas $I \times V$ foram realizados por Hickel(2017) e Brito(2018), todavia não há muitos estudos a respeito desta forma de análise das condições externas no estado do Paraná, especialmente com relação a análise da temperatura juntamente ao sombreamento.

Além disto, não há muitos estudos a respeito da utilização da tecnologia monocristalina com arquitetura PERC. Segundo Ayoub et al. (2017), as células fotovoltaicas com tecnologia PERC possuem como característica a presença de um dielétrico que possibilita maior absorção da luz solar e menores perdas de elétrons, o que faz com que possuam melhor performance em manhãs e tardes nubladas.

Sendo assim, este estudo é uma análise das curvas $I \times V$ e $P \times V$ de um módulo monocristalino PERC, sobre diferentes condições de temperatura e sombreamento, na cidade de Curitiba, no Paraná.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O dia selecionado para a realização das medições foi 31 de julho de 2019, durante o inverno, e tinha como característica o céu claro, com poucas nuvens. O local do ensaio foi a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), localizada em Curitiba, no Paraná.

Para a realização do estudo foi utilizado módulo fotovoltaico da tecnologia monocristalina PERC, da marca QCells, cuja potência era de 365Wp. As características elétricas deste módulo fotovoltaico são descritas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico utilizado.

Característica	Valor
Máxima Potência	365 W
Tensão de Máxima Potência	39,38 V
Corrente de Máxima Potência	9,27 A
Tensão de Circuito Aberto	48,16 V
Corrente de Curto-Circuito	9,75 A
Coeficiente α	0,04 %/°C
Coeficiente β	-0,28 %/°C
Coeficiente γ	-0,39 %/°C

A representação esquemática para a visualização das células do módulo estudado, com a numeração das células e dos diodos de *bypass*, realizada por meio do software *Autocad*, é indicada na Figura 1.

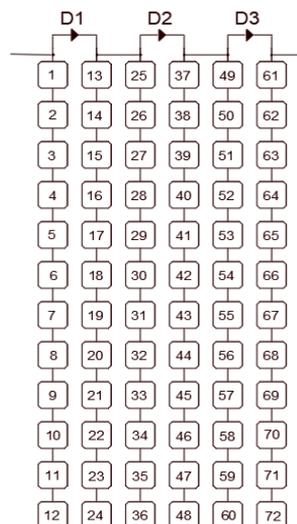


Figura 1 - Representação do módulo fotovoltaico estudado.

Para a realização das medições das curvas I_xV e P_xV e dos valores de irradiância, utilizou-se um traçador de curvas HT-IV modelo IV-500W. Além disto, para as medições da temperatura traseira do módulo fotovoltaico e da temperatura ambiente em um local próximo às medições, em condição de sombra, foram utilizados dois multímetros da marca ICEL, modelo MD 645, que possuíam termopares.

Primeiramente foram realizadas medições sem sombreamento, para avaliação somente do impacto da temperatura nas curvas I_xV e P_xV do módulo e, posteriormente, foram realizadas as medições com sombreamento levando em consideração também a temperatura. Foram realizadas três medições sem sombreamento, sendo que a cada medição houve o aumento de três graus na temperatura traseira do módulo, e após isto

foram realizadas as medições com diferentes condições de sombreamento. A descrição das características de cada medição (descritas por **M#**) é:

Tabela 2 – Células Sombreadas

Número da medição	M#1	M#2	M#3	M#4	M#5	M#6	M#7	M#8	M#9	M#10
Denominação das Células Sombreadas	-	-	-	12	48	72	72	12, 48	60, 72	56, 57, 58, 59, 60, 68, 69, 70, 71 e 72

Para a análise das medições sem condição de sombreamento foi adotada a metodologia proposta por Tonolo (2019), na qual foram utilizadas as Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3), para a análise da potência, tensão e corrente, respectivamente.

$$P_F = \left[\frac{P (100 + \gamma(T_f - T_o))}{100} \right] \quad (1)$$

Em que P_f é a potência a PMP final, P é a potência inicial, T_f é temperatura final, T_o a temperatura inicial, γ o coeficiente de temperatura de potência de PMP.

$$V_{OCF} = \left[\frac{V_{OC} (100 + \beta(T_f - T_o))}{100} \right] \quad (2)$$

Na qual V_{oc} é a tensão de circuito aberto inicial, V_{ocf} é a tensão de circuito aberto final, β é o coeficiente que representa a variação da tensão em função da temperatura, T_f é temperatura final e T_o a temperatura inicial.

$$I_{SCF} = \left[\frac{I_{SC} (100 + \alpha(T_f - T_o))}{100} \right] \quad (3)$$

Em que I_{sc} é a corrente de curto-circuito inicial, I_{scf} é a corrente de curto-circuito final, T_f é temperatura final, T_o a temperatura inicial e α é o coeficiente que relaciona a variação da corrente em relação a temperatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, potência e irradiância foram obtidos por meio do pelo traçador de curvas.

A análise das medições sem sombreamento foi realizada para o estudo da influência da temperatura no módulo fotovoltaico estudado, enquanto as medições com sombreamento foram utilizadas tanto para o estudo da influência do sombreamento nas curvas $I \times V$ e $P \times V$ quanto da influência da temperatura em diferentes condições de sombreamento.

Os resultados foram divididos em análise das medições sem sombreamento e com sombreamento, a partir das seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

3.1 Análise das medições sem sombreamento

Os valores de temperatura encontrados na região traseira dos módulos, temperatura ambiente e irradiância durante as três medições sem sombreamento são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Temperatura e irradiância durante as medições sem sombreamento

	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Módulo (°C)	Irradiância (W/m ²)
Primeira medição	24	42	929
Segunda medição	24	45	940
Terceira medição	25	48	881

As características elétricas medidas para as diferentes condições de temperatura, são indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Alteração dos parâmetros elétricos em função da temperatura

	Pmp (W)	Voc (V)	Isc (A)
Primeira medição	280,19	45,19	8,11
Segunda medição	272,52	44,75	8,10
Terceira medição	266,96	44,34	7,88

Com o aumento da temperatura houve a redução da máxima potência e da tensão de circuito aberto em todas as medições, todavia em decorrência da redução a irradiância na terceira medição foi possível observar também a redução na corrente de curto-circuito.

A diferença percentual entre os valores medidos e os valores calculados por meio de Eq. 1, a Eq. 2 e a Eq. 3 para cada uma das medições é representada pela Tabela 4.

Tabela 4 – Diferença percentual entre valores medidos e calculados

	Pmp (W)	Voc (V)	Isc (A)
Primeira medição	4,76%	6,63%	-0,68%
Segunda medição	5,60%	7,80%	-0,80%
Terceira medição	6,44%	8,97%	-0,92%

O comparativo entre os valores calculados e medidos obteve baixa diferença percentual, sendo que os menores valores foram de corrente de curto-circuito, que foram inferiores a 1%, e os maiores de tensão de circuito aberto, que variaram entre 6,63% e 8,97%. Com relação as medições, a terceira medição obteve as maiores diferenças percentuais em todos os parâmetros elétricos enquanto a primeira medição obteve as menores.

3.2 Análise das medições com sombreamento

3.1.1 - Análise da influência do sombreamento

As medições de curva *IxV* e *PxV* levando em consideração a temperatura e as diferentes condições de sombreamento são representadas por meio das Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8. Nas figuras há representação do módulo à esquerda com a indicação da região sombreada em cinza escuro e o gráfico das curvas *IxV* e *PxV* a direita. As curvas *IxV* de referência são representadas pelas curvas com pequenos círculos, as medidas são ilustradas por curvas com pequenos quadrados, as curvas *PxV* medidas são indicadas em cinza escuro e as curvas de referência em cinza claro.

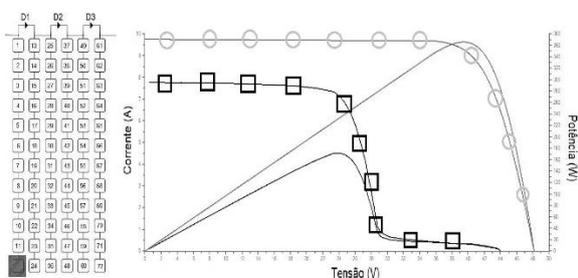


Figura 2 - Curvas *IxV* e *PxV* da medição 4.

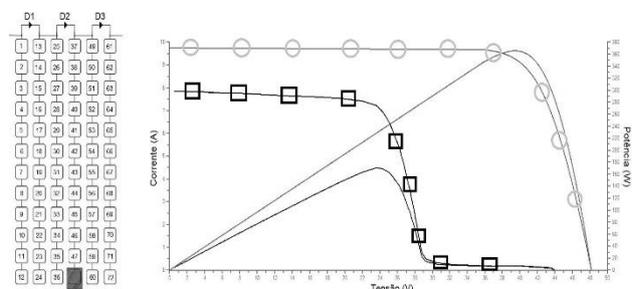


Figura 3 – Curvas *IxV* e *PxV* da medição 5.

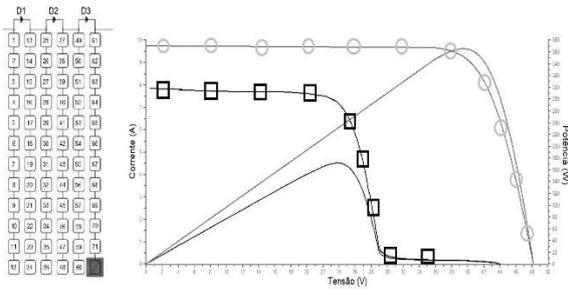


Figura 4 – Curvas I_xV e P_xV da medição 6.

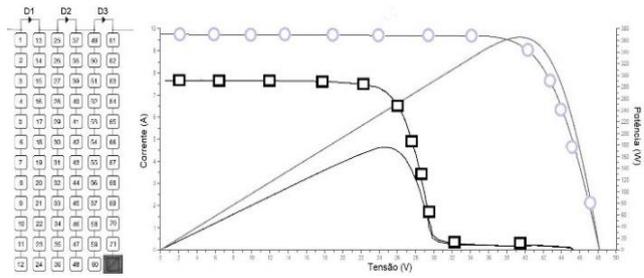


Figura 5 – Curvas I_xV e P_xV da medição 7.

As quatro primeiras medições obtiveram curvas I_xV e P_xV semelhantes, apesar do sombreamento de células de diferentes colunas do módulo, pelo fato de que em todas elas houve somente o bloqueio de um diodo de *bypass*. A diferença entre a medição 6 e a medição 7 foi a temperatura do módulo, que variou em função da passagem de uma nuvem, e que ocasionou maior valor de máxima potência nas curvas da medição 7, assim como é possível observar que as curvas são posicionadas mais à direita do gráfico, indicando maiores valores de tensão e de valores de PMP.

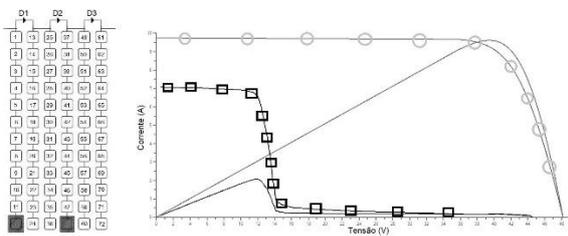


Figura 6 – Curvas I_xV e P_xV da medição 8.

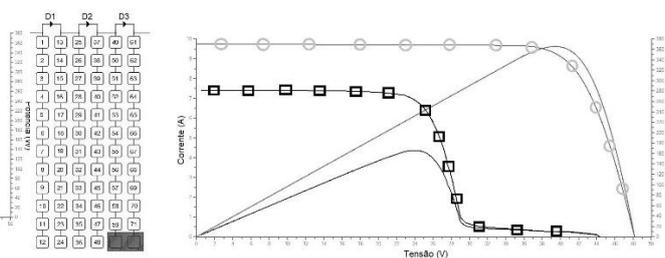


Figura 7 – Curvas I_xV e P_xV da medição 9.

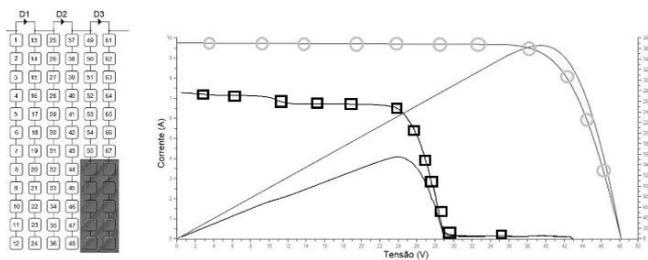


Figura 8 – Curvas I_xV e P_xV da medição 10.

Apesar do fato de que nas medições oito e nove a mesma quantidade de células foi sombreada, elas obtiveram curvas I_xV e P_xV com grande diferença por conta da quantidade de diodos de *bypass* acionados, enquanto na medição oito dois diodos de *bypass* foram acionados, na medição 9 houve o acionamento de somente um. Na medição dez houve o sombreamento de dez células e o acionamento de somente um diodo, o que fez com que a intensidade das curvas fosse semelhante as obtidas na

medição nove. Houve, porém, distorção da curva em função da existência de nuvens nas regiões próximas ao sol durante a realização desta medição.

3.1.2 – Análise da influência da temperatura em condições de sombreamento

Para a realização do estudo da influência da temperatura no módulo fotovoltaico sobre diferentes condições de sombreamento, foram medidas a temperatura ambiente, a temperatura do módulo e a irradiância, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Temperatura e irradiância em medições com sombreamento

	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura do módulo (°C)	Irradiância (W/m ²)
Quarta medição	25	48	847
Quinta medição	25	49	833
Sexta medição	25	49	868
Sétima medição	25	43	822
Oitava medição	25	43	811
Nona medição	25	45	807
Décima medição	23	48	509

As características elétricas durante cada uma das medições são indicadas por meio da Tabela 5.

Tabela 5 - Alteração dos parâmetros elétricos em função da temperatura

	Pmp (W)	Voc (V)	Isc (A)
Quarta medição	171,68	43,99	7,77
Quinta medição	170,54	43,95	7,85
Sexta medição	172,14	43,97	7,85
Sétima medição	176,62	45,29	7,67
Oitava medição	79,05	44,53	7,08
Nona medição	166	44,30	7,41
Décima medição	155,12	42,90	7,29

Houve aumento da temperatura entre a quarta e quinta medições, o que causou diminuição da tensão e da máxima potência, além de aumento do valor da corrente de curto-circuito. Todavia, apesar da sexta medição possuir valor de temperatura no módulo semelhante a quinta medição, houve o aumento da irradiância e, conseqüentemente, aumento da potência.

Entre a sexta e sétima medições ocorreu um período de sombreamento causado por nuvens, o que fez com que na sétima medição houvesse redução da temperatura do módulo e conseqüente aumento da tensão e da potência. Além disto,

por conta do acionamento de dois diodos de *bypass*, a oitava medição obteve o menor valor de máxima potência.

Por conta da existência de um sombreamento na medição 9, ela obteve valor de máxima potência 2,66% inferior a medição cinco e 6,39% inferior a medição 7, nas quais também houve acionamento de somente um diodo de *bypass*.

A décima medição obteve os menores valores em condição de sombreamento com o acionamento de somente um diodo, situação decorrente do fato de que durante esta medição a irradiância foi a menor encontrada e de que a temperatura foi consideravelmente alta. Em comparação com a medição quatro, na qual o mesmo número de diodos foi acionado e a temperatura também era semelhante, a décima medição obteve máxima potência 9,67% menor por conta do baixo valor de irradiância obtido.

3. CONCLUSÕES

A influência da temperatura e do sombreamento nas curvas $I \times V$ e $P \times V$ de um módulo fotovoltaico monocristalino PERC foram estudados neste artigo.

Com relação a análise somente da temperatura, os resultados obtidos ressaltaram a diminuição dos valores de máxima potência e de tensão de circuito aberto com o aumento de temperatura, enquanto o contrário ocorreu com os valores de corrente de curto-circuito. Além disto, a análise comparativa entre os valores medidos e calculados mostrou que há aumento da divergência dos valores com o aumento da temperatura. Nesta condição a divergência de valores calculados e medidos de máxima potência variou entre 4,76% e 6,44%.

Com relação a análise com sombreamento, os valores de máxima potência foram reduzidos de acordo com a quantidade de diodos de *bypass* acionados e a variação nos valores de irradiância, na maior parte dos casos. A diferença no valor de temperatura foi significativa para a análise da sétima medição, pois ela obteve menor temperatura e maior valor de máxima potência, todavia não foi muito significativa na décima medição, em decorrência do fato de que apesar de possuir a mesma temperatura da primeira medição obteve valor de máxima potência inferior, por conta da irradiância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYOUB, J., RAMMAL, R., ASSI, A., ASSI, I., “*Two Techniques Used to Improve the Efficiency of Existing PV Panels: Thermal Management & PERC Technology*”, 2017.

BRITO, T.R., CAVALCANTE, R.L., PINHO, J.T., MACEDO, W.N., “*Análise da Curva I-V de Módulos Multicristalinos à Sol Real*”, 2018.

HICKEL, B. M., “*O Impacto No Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Causado pelo Acúmulo De Sujeira sobre os Módulos FV – Metodologia e Avaliação Através de Curvas IxV em Campo*”, 2017.

PENG, J., LU, L., WANG, M., “*A new model to evaluate solar spectrum impacts on the short circuit current of solar photovoltaic modules*”, 2019.

TONOLO, E. A., “*Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba*”, 2019.