

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, EM CURITIBA

Jair Urbanetz Junior ¹; Fabianna Stumpf Tonin ², Juliana D'Angela Mariano ³; Gerson
Máximo Tiepolo ⁴

Resumo

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) configuram-se como uma alternativa sustentável de produção de energia elétrica para os centros urbanos, pois permitem a geração de energia de modo distribuído, ou seja, no próprio local onde esta será consumida e, permitem também, com que o excedente de energia produzido seja injetado na rede, colaborando assim com o desempenho da rede elétrica em que se encontram conectados. Além disso, esses sistemas não necessitam de novas áreas para instalação, pois estes fazem uso de espaços já existentes, como as coberturas das edificações para as quais gerarão energia elétrica. No que concerne SFVCR, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, possui um SFVCR de 2,1 kWp no Escritório Verde (EV), que está em operação desde dezembro de 2011, e que até setembro de 2017 gerou pouco mais de 13,64 MWh e um SFVCR de 10,2 kWp, em operação desde fevereiro de 2016. O painel fotovoltaico do sistema de 2,1 kWp foi montado acompanhando a inclinação do telhado da edificação, o que não lhe confere máximo desempenho. Em contrapartida, o painel do sistema de 10,2 kWp no Neoville foi instalado nas condições ótimas, ou seja, orientado para o norte e com inclinação igual à latitude de Curitiba e, até setembro de 2017 gerou mais de 20,65 MWh. Este artigo apresenta o acompanhamento da energia elétrica gerada pelos sistemas e também um histórico dos chamados índices de mérito dos SFVCR, que são: Produtividade (Yield); Taxa de Desempenho (Performance Ratio); e Fator de Capacidade. Estes índices permitem avaliar o desempenho dos SFVCR e fazer uma comparação entre eles. Por fim, a geração fotovoltaica de ambos os SFVCR mostraram-se como uma sustentável e eficaz forma de geração distribuída de energia elétrica no ambiente urbano.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Fotovoltaica. Geração Distribuída. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.

Introdução

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) têm apresentado grande crescimento entre as fontes de geração de energias renováveis no cenário mundial.

No ano de 2016, 75GW foram instalados no mundo, o que corresponde a instalação de mais de 31.000 módulos fotovoltaicos por hora. Além disso, mais capacidade fotovoltaica foi instalada em 2016 do que a capacidade fotovoltaica mundial acumulada nos cinco anos anteriores. O ano de

1 Doutor – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná – urbanetz@utfpr.edu.br

2 Mestre – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná – fstonin@gmail.com

3 Mestre – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná – julianadangela@gmail.com

4 Doutor – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná – tiepolo@utfpr.edu.br

2016 registrou uma capacidade fotovoltaica total de 303GW, ao passo que 2015 obteve 228GW (48% menos que 2016), o ano de 2014 somou 177GW instalados (71% inferior a 2016) e, 2013 acumulou 137GW (220% inferior a 2016) [1].

Um SFVCR é basicamente composto de um painel FV, que converte a energia do sol em energia elétrica em corrente contínua, e um inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada, com tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica da concessionária ao qual o sistema está interligado. As principais vantagens desse tipo de sistema são: elevada produtividade, ausência de banco de baterias e desligamento automático no caso de falta de energia da rede, evitando o fenômeno de ilhamento [2].

Em dezembro de 2011, foi inaugurado o Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), uma proposta única no Brasil de uma edificação sustentável modelo de 150 m² que adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas, visando verificar o desempenho destas estratégias, entre elas, a máxima eficiência energética [3]. Além de tirar partido da iluminação natural e do uso de lâmpadas LEDs, o projeto também optou pela técnica de geração fotovoltaica como linha mestra para prover energia à edificação, em conjunto com o sistema elétrico da concessionária. Na Figura 1 é ilustrada a fachada do EV da UTFPR.



Figura 1. Vista frontal do EV da UTFPR.

Fonte: Acervo dos autores, 2017.

Por sua vez, em fevereiro de 2016, foi instalado o SFVCR na sede Neville do campus Curitiba da UTFPR, o qual foi doado pela empresa ELCO Engenharia. O sistema fotovoltaico apresenta potência instalada total de 10,2 kWp, sendo constituído de 2 conjuntos de 17 módulos fotovoltaicos ligados em série, e o inversor empregado no sistema tem potência nominal de saída de 10 kW [4]. Na Figura 2 é ilustrada a vista do SFVCR instalado na Neville.



Figura 2. Vista do SFVCR Neville

Fonte: Acervo dos autores, 2017.

Esses SFVCR são baseados na interação de dois agentes responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica: a concessionária e o gerador fotovoltaico. Havendo incidência solar sobre o painel fotovoltaico, há geração de energia elétrica, e esta é disponibilizada diretamente na rede elétrica do próprio consumidor onde está localizado o gerador fotovoltaico. No caso da energia fotogerada ser superior a consumida, a mesma é enviada à rede elétrica para ser consumida nas adjacências. Nos momentos de baixa ou nenhuma incidência solar, a concessionária é quem supre o consumidor [5].

Metodologia

A. Local do trabalho – dados colhidos diretamente dos SFVCR da UTFPR instalados na cidade de Curitiba.

B. Procedimento – Com os dados de irradiação disponibilizados pelo piranômetro o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [6] para a estação A807 localizada em Curitiba e, com o auxílio do programa RADIASOL, disponibilizada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul [7] é possível determinar irradiação que efetivamente incide sobre o painel fotovoltaico de cada sistema, visto que os dados de entrada desse programa são os dados de irradiação no plano horizontal e os dados de saída são os valores de irradiação no plano do SFVCR (de acordo com a respectiva inclinação e desvio azimutal).

C. Análise dos Dados – Foram realizados cálculos dos índices de méritos dos sistemas, usando as equações universais para Produtividade, Taxa de Desempenho e Fator de Capacidade [8, 9, 10].

Resultados e Discussões

A análise do desempenho desses SFVCR é fundamentada nos valores de energia gerada durante todo o período de operação e nos valores de irradiação incidentes nos painéis FV. A partir

da energia gerada e da irradiação incidente, são apresentados os índices de mérito dos SFVCR em estudo, que são: yield (produtividade); performance ratio (taxa de desempenho) e fator de capacidade.

Energia Gerada pelos SFVCR da UTFPR

Analisando-se o funcionamento do SFVCR do EV desde 2012 até setembro de 2017, observou-se uma geração total de 13,64 MWh neste período. A geração de energia elétrica é proporcional à irradiação incidente no painel FV, onde nos meses de verão (maior incidência solar) há maior geração de energia elétrica e nos meses de inverno, (menor incidência solar) há menor geração. Na Figura 3 é apresentado os valores de energia elétrica gerados em cada mês de operação do SFVCR do EV da UTFPR.

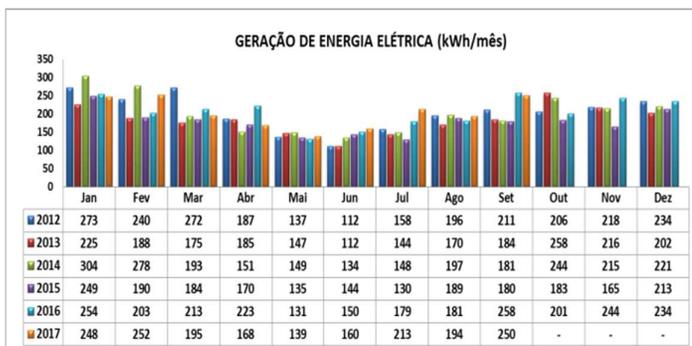


Figura 3. Geração de Energia Elétrica (kWh/mês) do EV

Por sua vez, na Figura 4 é retratada a geração de energia elétrica do SFVCR Neville da UTFPR. Desde que esse sistema entrou em operação, ele gerou mais de 20,65 MWh.

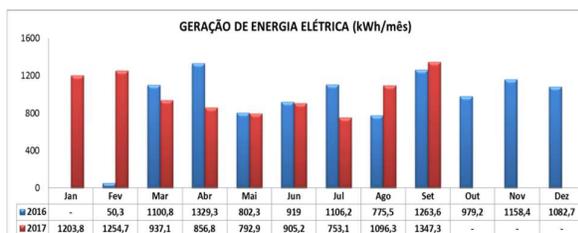


Figura 4. Geração de Energia Elétrica (kWh/mês) do Neville

Irradiação Incidente no Painel Fotovoltaico do SFVCR da UTFPR

Os valores de irradiação incidente nos painéis fotovoltaicos da UTFPR que serviram de base para o cálculo de alguns dos índices de mérito do sistema FV, foram obtidos a partir do banco de dados disponibilizado pelo

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação A807, localizada na região metropolitana de Curitiba [6].

Como o piranômetro do INMET está instalado na posição horizontal, é utilizado o programa RADIASOL para determinar a irradiação que efetivamente incide sobre o painel de cada sistema. No caso do EV a inclinação do painel é de 15° e o desvio azimutal de 22° oeste, ao passo que o painel do Neville se encontra inclinado 25° e desvio azimutal de zero. Esse programa disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul [7] permite, a partir da inserção dos valores de irradiação no plano horizontal, identificar os valores de irradiação para qualquer plano (diferentes inclinações e desvio azimutal em relação ao norte).

Em posse dos valores de irradiação disponibilizados pelo INMET, foram criadas as estações - para o período de 2012 a 2017 - EV_UTFPR_2012, EV_UTFPR_2013, EV_UTFPR_2014, EV_UTFPR_2015, EV_UTFPR_2016 e EV_UTFPR_2017, no programa RADIASOL, da UFRGS. A Figura 7 apresenta a tela da EV_UTFPR_2016, na qual foram editados os valores de irradiação, para o ano de 2016, no plano horizontal para a posição geográfica (-25,440418, -49,268610) onde o painel fotovoltaico do EV está instalado e, na sequência foram ajustados os valores de inclinação e do desvio azimutal, obtendo-se assim, o gráfico apresentado na Figura 5 com os valores de irradiação incidentes no plano do painel fotovoltaico. De forma análoga, esse mesmo procedimento foi realizado para obter os valores de irradiação incidentes no painel do Neville.

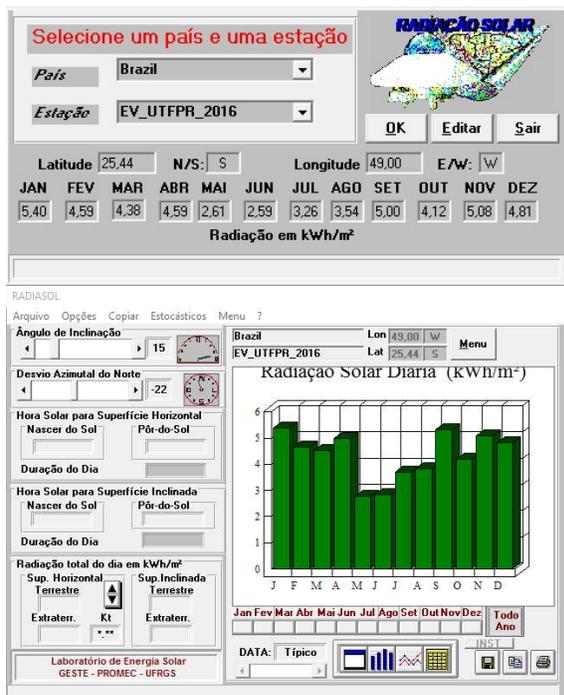


Figura 5. Tela do RADIASOL com o gráfico de irradiação diária média ao longo do ano no painel FV do EV.

Fonte: Adaptado de [7].

Índices de Mérito dos SFVCR da UTFPR

Os índices de mérito são utilizados para comparar a operação de sistemas FV localizados em lugares distintos e com diferentes potências nominais [8, 9, 10].

YIELD ou produtividade

É a relação entre a energia gerada (kWh) e a potência FV instalada (kWp), normalmente vinculada a um ano de operação, yield anual, porém pode ser também considerado o yield mensal. A Equação (1) apresenta a grandeza em questão. A Tabela 1 mostra o yield mensal e anual dos dois SFVCR.

$$Y = \frac{\text{Energia Gerada} \quad [\text{kWh}]}{\text{Potência FV} \quad [\text{kWp}]} \quad \text{Eq. (1)}$$

Tabela 1. Produtividade anual e mensal dos SFVCR da UTFPR

Mês	YIELD (kWh/kWp)									
	EV						Neoville			
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2016	2017		
Jan	130	107,14	144,76	118,57	120,95	118,1	--	118		
Fev	114,29	89,52	132,38	90,48	96,67	120	--	123		
Mar	129,52	83,33	91,9	87,62	101,43	92,86	107,92	91,87		
Abr	89,05	88,1	71,9	80,95	106,19	80	130,32	84		
Mai	65,24	70	70,95	64,29	62,38	66,19	78,66	77,74		
Jun	53,33	53,33	63,81	68,57	71,43	76,19	90,1	88,75		
Jul	75,24	68,57	70,48	61,9	85,24	101,4	108,45	73,83		
Ago	93,33	80,95	93,81	90	86,19	92,38	76,03	107,5		
Set	100,48	87,62	86,19	85,71	122,86	119	123,88	132,1		
Out	98,1	122,86	116,19	87,14	95,71		96			
Nov	103,81	102,86	102,38	78,57	116,19		113,57			
Dez	111,43	96,19	105,24	101,43	111,43		106,15			
Ano	1.163,81	1.050,48	1.150,00	1.015,24	1.176,67	553,3	1.243,21	583,4		

Nota-se que o valor da produtividade, que é resultado da relação da energia gerada dividido pela potência fotovoltaica instalada, apresentou resultados próximos durante todo o período de operação do SFVCR do EV. Evidencia-se que acúmulo de sujeira afeta diretamente a produtividade do sistema, visto que após as limpezas realizadas em 31/08/2013, 26/09/2015 e 01/09/2016 a produtividade volta a subir.

Por sua vez, os resultados do SFVCR do Neoville retratam uma maior produtividade nos meses de março a julho.

Performance Ratio ou Taxa de Desempenho

É a relação entre a produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000W/m² incidentes no painel FV, também normalmente vinculada a um ano de operação, performance ratio anual, porém, pode ser também considerada a performance ratio mensal. Esta grandeza é expressa em porcentagem. A Equação (2) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 2 apresenta a Performance Ratio dos SFVCR.

$$PR = \frac{\text{Yield}}{\text{Irradiação}/1000} [\%] \quad \text{Eq. (2)}$$

Tabela 2. Performance Ratio mensal e anual dos SFVCR da UTFPR

TAXA DE DESEMPENHO (%)								
Mês	EV						Neoville	
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2016	2017
Jan	74,59%	67,54%	76,74%	64,41%	72,52%	73,54%	--	73,64%
Fev	74,89%	67,58%	87,99%	66,35%	71,99%	74,93%	--	77,89%
Mar	75,46%	69,12%	65,94%	68,39%	72,39%	74,33%	75,03%	73,54%
Abr	74,32%	65,74%	73,01%	68,59%	71,08%	75,33%	83,70%	77,56%
Mai	70,52%	67,57%	71,15%	69,22%	72,65%	72,63%	88,72%	82,49%
Jun	77,29%	68,53%	74,68%	69,01%	83,54%	78,14%	97,83%	85,50%
Jul	78,62%	67,64%	79,77%	59,08%	74,72%	95,39%	75,40%	56,57%
Ago	63,40%	65,88%	65,47%	61,13%	72,97%	83,47%	60,56%	93,96%
Set	68,11%	75,84%	62,20%	66,91%	77,12%	77,50%	71,44%	84,19%
Out	66,13%	75,92%	62,57%	74,43%	73,69%		74,26%	
Nov	66,24%	70,93%	64,72%	62,66%	76,24%		75,71%	
Dez	66,33%	56,26%	64,55%	65,05%	74,73%		72,85%	
Ano	71,33%	68,21%	70,73%	66,27%	74,49%	74,82%	77,55%	77,02%

Analisando-se os meses imediatamente anteriores às limpezas do painel FV do EV nota-se uma redução gradativa neste índice, e após as limpezas, a taxa de desempenho mensal retornou ao patamar observado nos primeiros meses de operação do SFVCR, mantendo-se superior a 70%.

Já o Neoville apresenta taxas de desempenho superiores a 71% em todos os meses. É interessante notar que a taxa de desempenho do Neoville para o ano de 2016, foi 4% superior ao do EV para esse mesmo ano.

Fator de Capacidade

É sua capacidade real de gerar energia em função da energia que ele geraria se operasse em potência nominal durante 24 horas por dia, também expresso em percentual [8]. A Equação (3) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 3 o Fator de Capacidade para 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e até setembro de 2017 para o SFVCR do EV. Também é mostrado essa grandeza para o SFVCR do Neoville para 2016 e até setembro de 2017.

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV} \times 24 \times \text{dias}} [\%] \quad \text{Eq. (3)}$$

Tabela 3. Fator de Capacidade mensal e anual dos SFVCR da UTFPR

FATOR DE CAPACIDADE (%)								
Mês	EV						Neoville	
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2016	2017
Jan	17,47%	14,40%	19,46%	15,94%	16,26%	15,87%	--	15,86%
Fev	16,42%	13,32%	19,70%	13,46%	13,89%	17,86%	--	18,31%
Mar	17,41%	11,20%	12,35%	11,78%	13,63%	12,48%	14,51%	12,35%
Abr	12,37%	12,24%	9,99%	11,24%	14,75%	11,11%	18,10%	11,67%
Mai	8,77%	9,41%	9,54%	8,64%	8,38%	8,90%	10,57%	10,45%
Jun	7,41%	7,41%	8,86%	9,52%	9,92%	10,58%	12,51%	12,33%
Jul	10,11%	9,22%	9,47%	8,32%	11,46%	13,63%	14,58%	9,92%
Ago	12,54%	10,88%	12,61%	12,10%	11,58%	12,42%	10,22%	14,45%
Set	13,96%	12,17%	11,97%	11,90%	17,06%	16,53%	17,21%	18,35%
Out	13,18%	16,51%	15,62%	11,71%	12,86%		12,90%	
Nov	14,42%	14,29%	14,22%	10,91%	16,14%		15,77%	
Dez	14,98%	12,93%	14,14%	13,63%	14,98%		14,27%	
Ano	13,25%	12,00%	13,16%	11,60%	13,41%	12,80%	14,06%	13,49%

O Fator de Capacidade médio do EV em 2015 ficou inferior aos demais anos, devido à menor irradiação solar nesse ano. O Fator de Capacidade médio do Neoville, para o ano de 2016, foi 5% superior ao valor do EV.

Conclusões

O acompanhamento nesses cinco anos e nove meses de operação do SFVCR do EV em Curitiba e no primeiro ano e seis meses de operação do SFVCR do Neoville confirmam a aplicabilidade urbana da geração fotovoltaica distribuída, de forma limpa, silenciosa e que não necessita de área adicional para ser instalada, visto que os painéis fotovoltaicos estão instalados sobre os telhados das edificações. Ambos os SFVCR se mostram como sistemas de alta confiabilidade, visto que operam de forma ininterrupta desde as respectivas instalações, sem nenhuma substituição de equipamento, sendo a limpeza dos módulos fotovoltaicos a única intervenção que foi realizada.

Quanto aos índices de mérito: Yield, Performance Ratio e Fator de Capacidade, os valores estão adequados e similares aos divulgados por outras Universidades que desenvolvem pesquisas com SFVCR, como UFSC e USP. Os valores de irradiação considerados para o cálculo do Performance Ratio, foram obtidos através da estação meteorológica do INMET (A807), que possui um piranômetro instalado na horizontal, fornecendo os valores de irradiação no plano horizontal, logo, com o uso do programa RADIASOL, obteve-se a irradiação no plano do painel fotovoltaico do EV e do Neoville.

Nos cinco anos e nove meses de operação do EV, observou-se uma geração média de 2,25MWh/ano; Yield anual médio de 1.070kWh/kWp; Performance Ratio médio de 71,57% e Fator de Capacidade médio superior a 12,78%, que são índices regulares para este tipo de instalação. Já, para o primeiro ano e seis meses de operação do Neoville tem-se uma geração média de 9,86 MWh/ano; Yield anual médio de 966,4kWh/kWp; Performance Ratio médio de 78,05% e Fator de Capacidade médio superior a 13,90%. Nota-se que o SFVCR do Neoville apresentou resultados superiores ao do EV. Para tanto, é importante citar que o SFVCR Neoville, de 10,2 kWp, utiliza um inversor trifásico sem transformador em 380V de alto rendimento e com rendimento máximo de 98%, ao passo que o SFVCR EV, de 2,1 kWp, emprega um inversor monofásico com transformador de baixa frequência e com rendimento máximo de 92%. O inversor sem transformador tem menos perdas do que o inversor com transformador e em virtude disso, o rendimento do inversor sem transformador é superior ao outro. Além disso, esses inversores são mais leves, mais compactos e usam componentes com mais tecnologia que os inversores com transformador. Essa é a principal tendência do mercado de energia fotovoltaica no que diz respeito aos inversores, ou seja, utilizar inversores sem transformador com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema.

Além disso, o painel fotovoltaico do sistema Neoville foi instalado nas condições ótimas, ou seja, orientado para o norte geográfico e com inclinação igual à latitude de Curitiba (25°) – sem desvio azimutal, ao passo que o painel fotovoltaico do EV foi instalado acompanhando a inclinação e orientação dos respectivos telhados. Ademais, o painel do sistema EV está fixado bem rente ao telhado, fato este que reduz a ventilação do painel e com isso, faz com que os módulos aqueçam mais do que os módulos dos demais SFVCR que possuem uma maior ventilação e consequentemente reduz a produtividade dos mesmos.

Por fim, nota-se que a escolha do inversor e o modo de instalação dos módulos

fotovoltaicos são fatores determinantes para maximizar o desempenho do sistema fotovoltaico e por isso, devem ser escolhidos cuidadosamente durante a fase do projeto do sistema.

Referências

- [1] REN21. **Global Status Report**, 2016. Disponível em: http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_02/chapter_02/#ref-SPV_1 Acessado em 22 jun 2017.
- [2] URBANETZ JR, J., 2010. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade**, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis.
- [3] **ESCRITÓRIO VERDE**, 2013. Disponível em: <http://labens.ct.utfpr.edu.br/projetos/>, Acessado em 20 jun 2017.
- [4] TONIN, F.S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na cidade de Curitiba**, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2017.
- [5] URBANETZ JR, J.; TIEPOLO, G. M.; FUSANO, R. H.; CASAGRANDE JR, E.F.; CANCIGLIERI JR, O. **Análise do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**, Revista SODEBRAS, Volume 8, N° 88, abril 2013.
- [6] **INMET**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acessado em 22 jun 2017.
- [7] UFRGS. **Programa “RADIASOL”**, Laboratório de Energia Solar, 2017.
- [8] OLIVEIRA, S. H. F., 2002. **Geração Distribuída de Eletricidade; Inserção de Edificações Fotovoltaicas à Rede no Estado de São Paulo**, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- [9] BENEDITO, R. S., 2009. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.
- [10] MARION, B., ADELSTEIN, J., BOYLE, K., HAYDEN, H., HAMMOND, B., FLETCHER, T., CANADA, B., NARANG, D., SHUGAR, D., WENGER, H., KIMBER, A., MITCHELL, L., RICH, G., TOWNSEND, T., 2005. **“Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems”**, 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Florida.