

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DOIS ANOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Eloy Fassi Casagrande Junior – eloy.casagrande@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Gerson Máximo Tiepolo – tiepolo@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção e Sistemas

Resumo. Este artigo apresenta a análise do desempenho de dois anos de operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR) do Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os SFVCRs têm vasta aplicação no ambiente urbano como geradores de energia elétrica junto ao ponto de consumo. Podem estar integrados à edificação, não necessitando de área adicional, visto que são normalmente instalados sobre a cobertura da edificação. Possuem elevada confiabilidade e operam de forma limpa e silenciosa. O EV da UTFPR é uma edificação sustentável modelo, com 150 m² de área construída e que adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas. A geração fotovoltaica foi adotada no EV como linha mestra para prover energia à edificação, em conjunto com o sistema elétrico da concessionária. Ao longo destes dois anos de operação do SFVCR, foi possível confirmar a eficácia deste tipo de instalação através da avaliação do seu desempenho. A verificação do desempenho de um SFVCR se dá principalmente através de alguns índices conhecidos como índices de mérito, que são: Yield; Performance Ratio; e Fator de Capacidade. A energia elétrica gerada pelo Sistema Fotovoltaico durante este período está em conformidade com os valores esperados, porém houve uma redução gradativa do desempenho do SFVCR devido ao acúmulo de sujeira no painel FV. Após a realização da limpeza no painel FV, houve melhora nos índices de mérito, percebidos principalmente observando-se a evolução do Performance Ratio no período analisado.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Índices de Mérito, Construções Sustentáveis, Geração Distribuída

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCRs) têm apresentado grande crescimento entre as fontes de geração de energias renováveis no cenário mundial, principalmente em países como Alemanha (32,4GWp), Itália (16,3GWp), China (8,3GWp), Estados Unidos (7,8GWp), Japão (6,9GWp) e Espanha (5,2GWp) (EPIA, 2013). No Brasil, sua aplicação ainda é incipiente comparada a estes países, porém, apresenta grande potencial de crescimento nos próximos anos. Muitos empreendimentos estão sendo realizados neste setor no Brasil, partindo de cerca de apenas 200kWp de capacidade instalada em 2010, para mais de 4MWp em 2013. Esta tendência de crescimento é fruto principalmente da regulamentação por parte da ANEEL, que a partir de abril de 2012, trata das relações entre as concessionárias de energia e pessoas físicas ou jurídicas que realizem investimento em energia solar fotovoltaica, estabelecendo no Brasil uma política similar ao sistema *net metering*, aqui chamado de sistema de compensação, onde ao final do mês o excedente de energia do SFVCR injetado na rede elétrica da concessionária é transformado em créditos de energia que podem ser consumidos em outro momento, sem haver a remuneração pela energia, apenas o acúmulo de créditos, que devem ser utilizados em um prazo de até 36 meses (ANEEL, 2012).

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 (Escritório Verde, 2013). 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. O SFVCR é baseado na interação destes 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 na própria edificação, 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. A Fig. 1 ilustra a fachada do EV da UTFPR.



Figura 1 - Vista frontal do EV da UTFPR.

2. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA (SFVCR) DO EV DA UTFPR

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 (Urbanetz Jr, 2010).

Os SFVCRs são uma forma de geração distribuída, pois contribuem com a disponibilidade de energia junto ao ponto de consumo, minimizando as perdas com transmissão e distribuição, e dispensam o uso de banco de baterias, pois a potência gerada é consumida diretamente pelas cargas locais e o excedente é absorvido pela rede elétrica, que a disponibiliza para outros consumidores permitindo a redução da geração pelas fontes convencionais de energia, no caso do Brasil, principalmente as usinas hidroelétricas e térmicas (Boyle, 2004) (Rüther, 2004).

O SFVCR do EV da UTFPR tem uma potência instalada de 2,1kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício policristalino, modelo KD210GX-LP ligados em série) e um inversor monofásico em 220V de 2kW de potência nominal (PVPOWERED modelo PVP2000), entrou em operação em 14 de dezembro de 2011. A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de apenas 15m². A Fig. 2 ilustra o painel fotovoltaico e o inversor do SFCR do EV da UTFPR.



Figura 2 - Painel FV e inversor do EV da UTFPR.

3. DESEMPENHO DO SFCR DO EV DA UTFPR

A análise do desempenho do SFVCR do EV da UTFPR se baseia nos valores de energia gerada durante estes dois anos de operação e nos valores de irradiação incidentes no painel FV. A partir da energia gerada e da irradiação incidente, são apresentados os índices de mérito do SFVCR em análise, que são: *yield* (produtividade); *performance ratio* (taxa de desempenho) e fator de capacidade.

3.1 Energia Gerada pelo SFVCR do EV da UTFPR

Analisando-se o funcionamento do SFVCR do EV nos anos de 2012 e 2013, observou-se uma geração total de 4,7MWh. A geração de energia elétrica é proporcional a 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. A Fig. 3 apresenta os valores de energia elétrica gerados em cada mês de operação do SFVCR do EV da UTFPR.

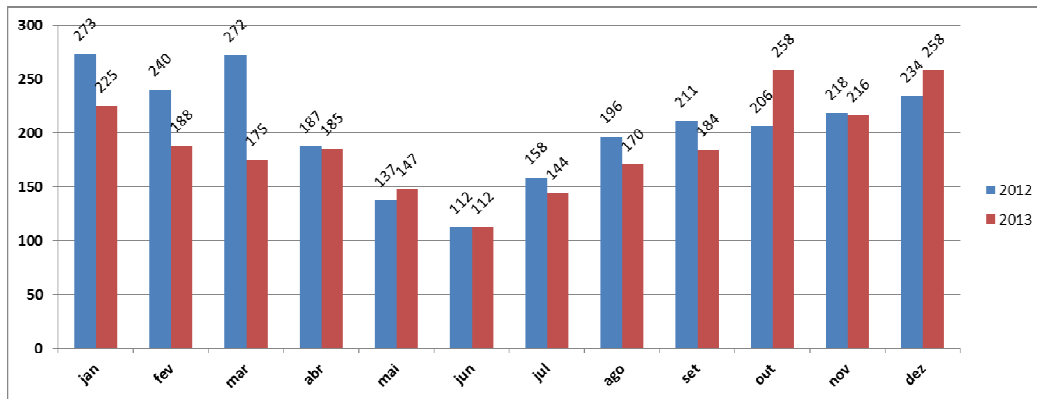


Figura 3 - Geração de Energia Elétrica (kWh/mês) para os anos de 2012 e 2013.

3.2 Irradiação Incidente no Painel FV do SFVCR do EV da UTFPR

Os valores de irradiação incidente no painel FV do EV 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 (INMET, 2013). 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 FV do EV, visto que este se encontra inclinado com aproximadamente 15°, e com desvio azimutal em relação ao norte geográfico de 22° para oeste. O programa RADIASOL é disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2012), e 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). A Fig. 4 apresenta os valores de irradiação diária média no plano horizontal para cada mês do ano para o ponto citado.

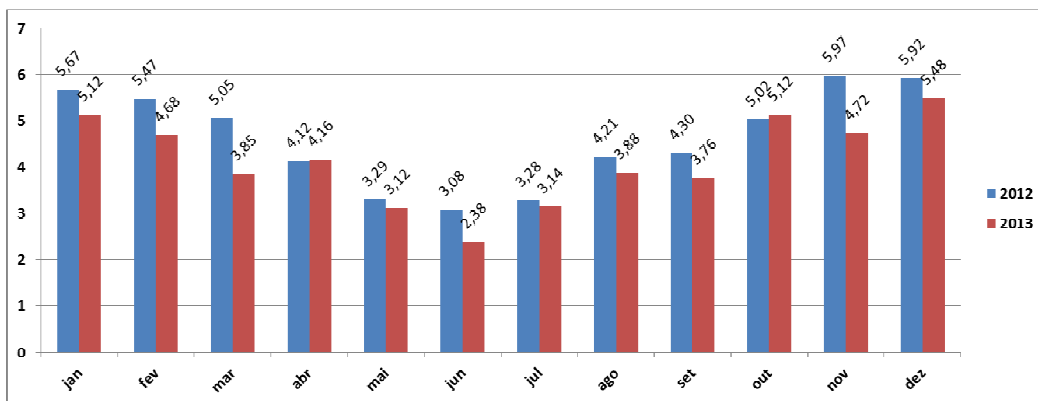


Figura 4 - Irradiação diária média no plano horizontal fornecida pela estação A807 do INMET (kWh/m².dia).

No programa RADIASOL foram criadas as estações “EV_UTFPR_2012” e “EV_UTFPR_2013”, com os valores de irradiação da Fig. 4. A Fig. 5 apresenta a tela onde foram editados os valores de irradiação no plano horizontal para a localidade onde está instalado o painel FV do EV. Ajustando-se a inclinação de 15° e o desvio azimutal de 22° oeste, obtêm-se o gráfico apresentado na Fig. 6 e os valores de irradiação incidentes no plano do painel FV do EV são apresentados na Tab. 1.

Selecione um país e uma estação

País: **Brazil**

Estação: **EV_UTFPR_2013**

Latitude: **25,50** N/S: **S** Longitude: **48,00** E/W: **W**

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,12	4,68	3,85	4,16	3,12	2,38	3,14	3,88	3,76	5,12	4,72	5,48

Radiação em kWh/m²

Figura 5 - Tela de entrada dos dados de irradiação.

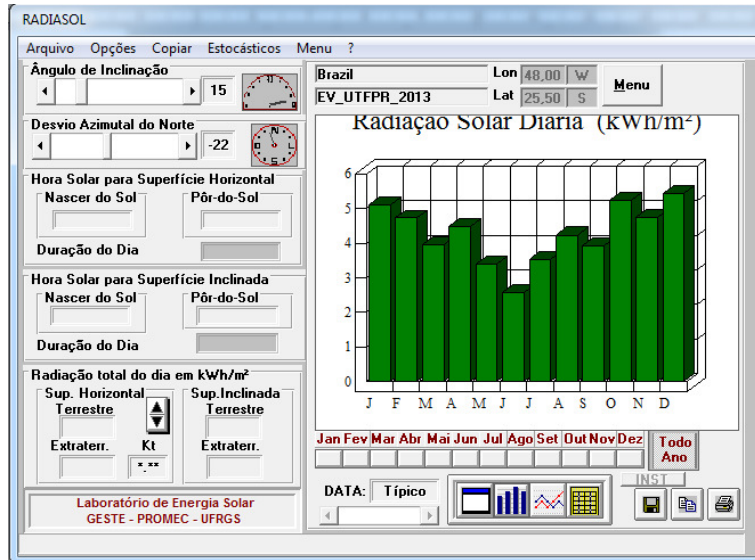


Figura 6 - Tela do RADIASOL com o gráfico de irradiação diária média ao longo do ano no painel FV do EV.

Tabela 1 - Irradiação diária média no plano do painel FV obtida pelo programa RADIASOL. (kWh/m².dia).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2012	5,64	5,53	5,26	4,42	3,63	3,51	3,72	4,66	4,52	5,13	5,95	5,86
2013	5,12	4,73	3,96	4,47	3,41	2,58	3,53	4,24	3,98	5,23	4,74	5,45

3.3 Índices de Mérito do SFVCR do EV da UTFPR

Os índices de mérito são utilizados para comparar a operação de sistemas FV localizados em lugares distintos e com diferentes potências nominais (Oliveira, 2000) (Benedito, 2009) (Marion et al, 2005).

3.3.1 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 Eq. (1) apresenta a grandeza em questão. A Tab. 2 mostra o *yield* mensal e anual em 2012 e 2013.

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

Tabela 2 – Yield mensal e anual do SFVCR do EV da UTFPR.

Mês	Yield 2012 (kWh/kWp)	Yield 2013 (kWh/kWp)
Janeiro	130,00	107,14
Fevereiro	114,29	89,52
Março	129,52	83,33
Abril	89,05	88,10
Maio	65,24	70,00
Junho	53,33	53,33
Julho	75,24	68,57
Agosto	93,33	80,95
Setembro	100,48	87,62
Outubro	98,10	122,86
Novembro	103,81	102,86
Dezembro	111,43	122,86
ANO	1.163,81	1.077,14

A produtividade de 2013 foi inferior a de 2012, por dois motivos: menor incidência solar no ano de 2013 como pode ser observado na Fig. 4 e na Tab. 1, e acúmulo de sujeira sobre o painel FV, que foi limpo em 31/ago/2013. Após a limpeza percebe-se aumento na produtividade, porém somente após avaliar também a irradiação incidente no painel FV é que se pode relacionar a melhora de produtividade à limpeza efetuada, o que é verificado a seguir.

3.3.2 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 Eq. (2) apresenta a grandeza em questão, e a Tab. 3 apresenta a *Performance Ratio* em 2012 e 2013.

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

Tabela 3 – Performance Ratio mensal e anual do SFVCR do EV da UTFPR.

Mês	PR (2012)	PR (2013)
Janeiro	74,35%	67,50%
Fevereiro	71,26%	65,26%
Março	79,43%	67,88%
Abril	67,16%	65,69%
Maio	57,97%	66,22%
Junho	50,65%	68,91%
Julho	65,24%	62,66%
Agosto	64,61%	61,59%
Setembro	74,10%	73,38%
Outubro	61,68%	75,78%
Novembro	58,16%	72,33%
Dezembro	61,34%	72,72%
ANO	65,98%	68,66%

A taxa de desempenho média em 2013 ficou superior a de 2012 e teve melhora expressiva após a limpeza efetuada no painel FV em 31/ago/2013. Analisando-se os meses imediatamente anteriores a limpeza do painel FV percebe-se uma redução gradativa neste índice, e após a limpeza, a taxa de desempenho mensal retornou ao patamar observado nos primeiros meses de operação do SFVCR, mantendo-se superior a 72%.

3.3.3 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 (Oliveira, 2000). A Eq. (3) apresenta a grandeza em questão, e a Tab. 4 o Fator de Capacidade para 2012 e 2013.

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

Tabela 4 – Fator de Capacidade mensal e anual do SFVCR do EV da UTFPR.

Mês	FC (2012)	FC (2013)
Janeiro	17,47%	14,40%
Fevereiro	16,42%	12,86%
Março	17,41%	11,20%
Abril	12,37%	12,24%
Mai	8,77%	9,41%
Junho	7,41%	7,41%
Julho	10,11%	9,22%
Agosto	12,54%	10,88%
Setembro	13,96%	12,17%
Outubro	13,18%	16,51%
Novembro	14,42%	14,29%
Dezembro	14,98%	16,51%
ANO	13,25%	12,26%

O Fator de Capacidade médio em 2013 ficou inferior ao de 2012, também pela menor irradiação solar no ano de 2013 e pelo acúmulo de sujeira sobre o painel FV, porém houve melhora significativa após a limpeza realizada em 31/ago/2013.

4. CONCLUSÕES

O SFVCR do EV da UTFPR, gerou em média aproximadamente 200kWh/mês nestes dois anos de operação, energia superior a necessária para atender as cargas existentes na edificação, tornando a mesma uma edificação de energia zero (*ZEB – zero energy building*). Nos meses de verão (maior incidência solar) a geração chegou a 273kWh, o que permitiu exportar energia para as instalações adjacentes, e nestes momentos, o EV tornou-se uma edificação de energia positiva. Colabora para este desempenho o fato de se planejar a edificação dentro dos princípios da arquitetura bioclimática, para captar o máximo de iluminação natural, com janelas amplas e bem posicionadas, o uso de lâmpadas LEDs para iluminação de todos os ambientes e sistema construtivo *wood framing* utilizando mantas de PET reciclado para isolamento térmico-acústico.

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 SFVCRs, 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 FV do EV.

Nestes dois anos de operação, observou-se uma geração média de 2,35MWh/ano; *Yield* anual médio de 1.120kWh/kWp; *Performance Ratio* médio de 67% e Fator de Capacidade médio próximo a 13%, que são índices regulares para este tipo de instalação. O desempenho durante o primeiro ano e metade do segundo ano foi piorando gradativamente, até que em 31 de agosto de 2013, foi feita uma limpeza do painel FV, e a partir desta data houve uma

melhora significativa onde, por exemplo, o *Performance Ratio* saltou para mais de 73%. O acúmulo de sujeira deve-se ao fato do painel FV estar com pouca inclinação (15°), e também pela edificação estar junto a uma avenida com alto tráfego de veículos na região central de Curitiba. Estes resultados indicaram a necessidade da realização de limpeza no painel FV uma ou duas vezes por ano para manter o desempenho elevado.

O acompanhamento nestes primeiros dois anos de operação do SFVCR do EV em Curitiba confirma ser um sistema de alta confiabilidade (opera de forma ininterrupta desde sua instalação), onde a geração de energia elétrica está em conformidade com os valores esperados, opera de forma limpa e silenciosa e não necessita de área adicional, visto que o painel fotovoltaico foi instalado sobre o telhado da edificação. Estas características fazem da geração fotovoltaica, a forma mais promissora de geração distribuída para o ambiente urbano.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2012. ANEEL aprova regras para facilitar a geração de energia nas unidades consumidoras, Brasília.
- 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.
- Boyle, G., 2004. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, Oxford University, New York.
- EPIA, 2013. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2017.
- Escritório Verde. Disponível em <http://www.escriptorioverdeonline.com.br>, 2013
- INMET. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/>. Acessado em 2013.
- 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.
- 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.
- Rüther, R., 2004. Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública, Editora da UFSC, Florianópolis.
- UFRGS. Programa RADIASOL”, Laboratório de Energia Solar, 2012.
- 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.

PERFORMANCE ANALYSIS OF TWO YEARS OF OPERATION OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM OF OFFICE GREEN OF THE UTFPR

Abstract. *This paper presents the performance analysis of two years of operation of the Grid Connected Photovoltaic System of Green Office of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR). The Grid Connected Photovoltaic System have wide application in the urban environment as generators of electricity close to the point of consumption. Can be integrated into the building, no requiring additional area, which are usually installed on the roof of the building. Have high reliability and operate cleanly and quietly. The Green Office of the UTFPR is a sustainable building model with 150 m² of built area and adopted several strategies for sustainability in partnership with over sixty companies. The photovoltaic generation was adopted in Green Office as a guideline to provide energy to the building, together with the electric utility system. Over these two years of operation of the Grid Connected Photovoltaic System was possible to confirm the effectiveness of this type of installation through the evaluation of their performance. The performance verification of Grid Connected Photovoltaic System occurs mainly through some known as indices of merit, which are: Yield, Performance Ratio, and Capacity Factor. The electricity generated by the PV system during this period is consistent with the expected values, but there was a gradual reduction in performance of the PV system due to accumulation of dirt on PV panel. Upon completion of cleaning the PV panel, there was improvement in the indices of merit, perceived mainly by observing the evolution of the performance ratio in the analyzed period.*

Keywords : Photovoltaic Systems , Indices of Merit , Sustainable Construction , Distributed Generation