



Políticas Energéticas para a Sustentabilidade
25 a 27 de agosto de 2014
Florianópolis – SC

ACOMPANHAMENTO DO DESEMPENHO DO SISTEMA FOTVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR

Jair Urbanetz Junior¹
Eloy Fassi Casagrande Junior²
Gerson Máximo Tiepolo³

RESUMO

Este artigo apresenta a análise do desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR) do Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) desde a sua instalação em dezembro de 2011. Com uma potência instalada de 2,1kWp, um inversor monofásico em 220V de 2kW de potência nominal e ocupando uma área de apenas 15m² sobre o telhado da edificação, este sistema opera de forma ininterrupta e até abril de 2014 gerou pouco mais de 5,7 MWh de energia elétrica. Além do acompanhamento da energia elétrica gerada, tem-se um histórico dos chamados índices de mérito do SFVCR, que são: Yield; Performance Ratio; e Fator de Capacidade. Estes índices permitem avaliar o desempenho dos SFVCRs e compará-lo com outros, instalados em outras localidades. Os valores de irradiação incidente no painel fotovoltaico do EV da UTFPR que serviram de base para o cálculo de alguns dos índices de mérito, foram obtidos a partir do banco de dados disponibilizado pelo Instituto Nacional

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, urbanetz@utfpr.edu.br, (41) 9833-5729.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, eloy.casagrande@gmail.com, (41) 9982-9747

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Pontifícia Universidade Católica do Paraná, tiepolo@utfpr.edu.br, (41) 3310-4634

de Meteorologia (INMET) para a estação A807, localizada na região metropolitana de Curitiba. 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 fotovoltaico 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, 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). O acompanhamento dos índices de mérito permitiu verificar que após cerca de um ano do início da sua operação, o desempenho do SFVCR do EV da UTFPR começou a declinar, e observou-se um forte acúmulo de sujeira na superfície do painel fotovoltaico. Este fato deve-se a pouca inclinação do painel fotovoltaico (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 fotovoltaico para elevar o desempenho do SFVCR do EV. Em 31 de agosto de 2013 foi feita a lavagem do painel fotovoltaico e verificou-se elevação imediata da energia gerada pelo SFVCR. Este sistema confirma a aplicabilidade no ambiente urbano como gerador de energia elétrica junto ao ponto de consumo e integrado à edificação, não necessitando de área adicional, visto que está instalado sobre a cobertura da edificação. 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 estratégia para prover energia à edificação, em conjunto com o sistema elétrico da concessionária, e mostrou-se uma eficaz, confiável e sustentável forma de geração distribuída de energia elétrica no ambiente urbano.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Índices de Mérito, Construções Sustentáveis, Geração Distribuída.

ABSTRACT

This article presents an analysis of the performance of On Grid Photovoltaic System of the Green Office of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) since its inception in December 2011. With an installed capacity of 2.1 kWp, a single-phase 220V 2kW inverter rated power and occupying an area of only 15m² on the roof of the building, this system operates uninterrupted until April 2014 so generated just over 5.7 MWh of electricity. In addition to monitoring the electricity generated, it has a history of so-called merit indexes of the On Grid, which are: Yield; Performance Ratio; and Capacity Factor. These indices allow assessing the performance of On Grid and compare it with others,

installed in other locations. The amounts of radiation incident on the PV panel Green Office of the UTFPR that served as the basis for the calculation of some indices of merit, were obtained from the database provided by the National Institute of Meteorology (INMET) for the A807 Station, located in metropolitan region of Curitiba. As the pyranometer INMET is installed horizontally, the RADIUSOL program is used to determine the radiation that effectively focuses on the photovoltaic panel, since this is inclined approximately 15 degrees, with azimuthal deviation from true north of 22 west. The RADIUSOL program is available from the Federal University of Rio Grande do Sul, and allows the insertion of values from the irradiation on the horizontal plane, identify the values of irradiation to any plan (different inclinations and azimuthal deviation from north). Monitoring indices of merit has shown that after about a year of the beginning of its operation, the performance of the PV system of the UTFPR began to decline, and there was a strong accumulation of dirt on the surface of the PV panel. This fact is due to the low inclination of the photovoltaic panel, and also by building living along the boulevard with high vehicle traffic in central Curitiba. These results indicated the need to conduct cleaning the PV panel to raise the performance of PV system. On August 31, 2013 washing the photovoltaic panel was taken and there was immediate boost of energy generated by PV system. This system confirms the applicability of the urban environment as an electric generator at the point of consumption and integrated into the building, requiring no additional area, which is installed on the roof of the building. The Green Office of the UTFPR is a sustainable building model with 150 m² of built area and that adopted various strategies for sustainability in partnership with over sixty companies. The photovoltaic generation was adopted as a strategy to provide energy to the building, together with the electric utility system, and proved to be an effective, reliable and sustainable form of distributed generation of electricity in the urban environment.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Indices of Merit, Sustainable Construction, Distributed Generation.

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 e 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 8MWp em meados de 2014. 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, 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 Figura 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 Figura 2 ilustra o painel fotovoltaico e o inversor do SFVCR do EV da UTFPR.



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

3. DESEMPENHO DO SFVCR 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 e quatro meses 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, 2013 e de janeiro a abril de 2014, observou-se uma geração total de 5,6 MWh neste período. 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 Figura 3 apresenta os valores de energia elétrica gerados em cada mês de operação do SFVCR do EV da UTFPR.

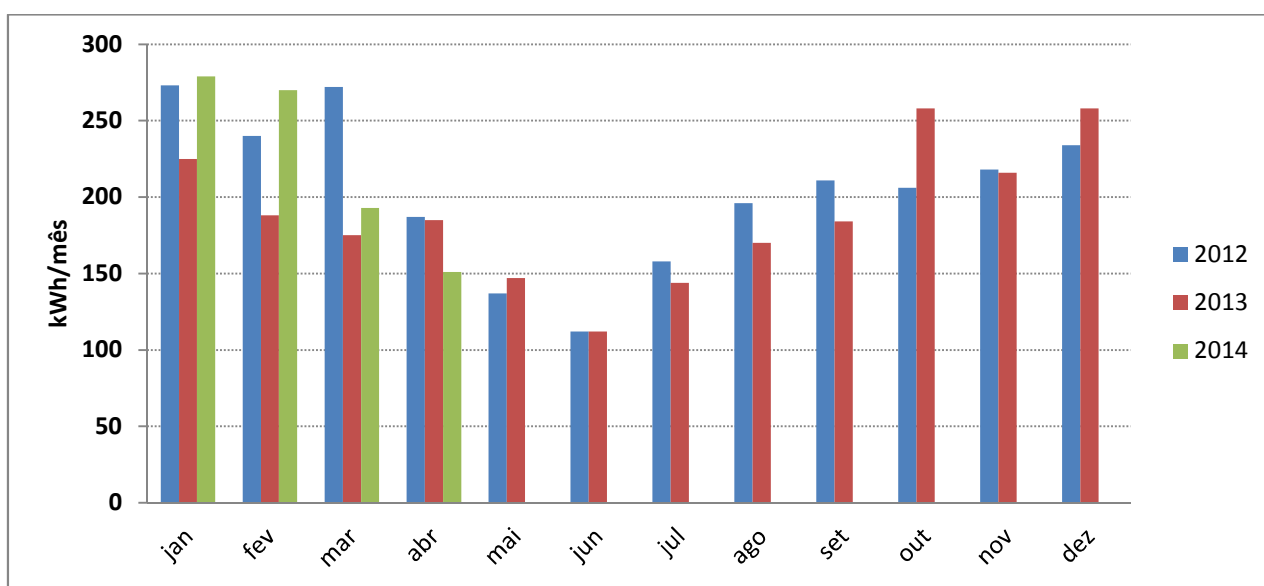


Figura 3 - Geração de Energia Elétrica (kWh/mês) para os anos de 2012, 2013 e início de 2014.

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, 2014). 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 Figura 4 apresenta os valores de irradiação diária média no plano horizontal para cada mês do ano para o ponto citado.

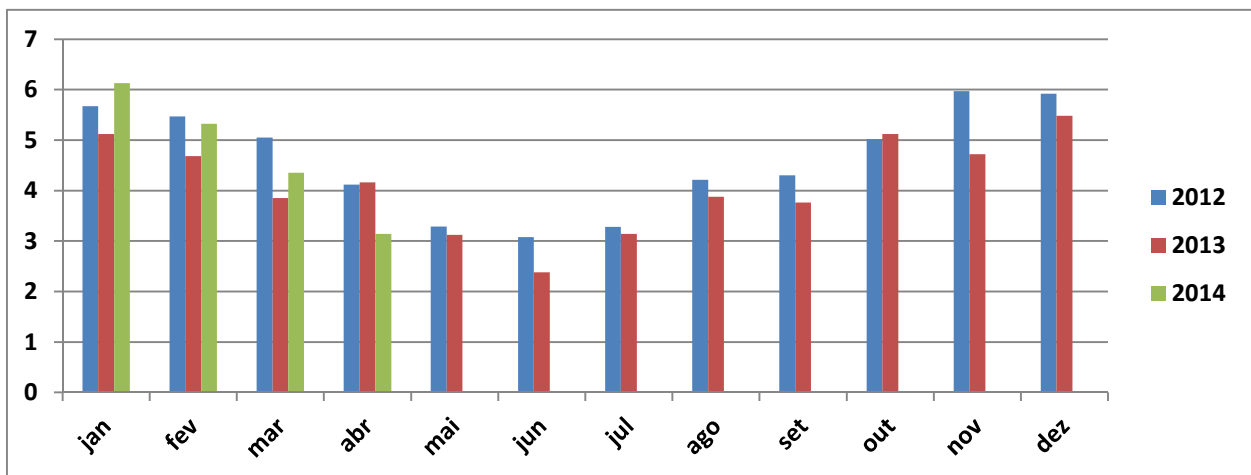


Figura 4 - Irradiação diária média no plano horizontal fornecida pela estação A807 do INMET (kWh/m².dia).

No programa RADIASOL foram criadas as estações “EV_UTFPR_2012”, “EV_UTFPR_2013” e “EV_UTFPR_2014”, com os valores de irradiação da Figura 4. A Figura 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 Figura 6 e os valores de irradiação incidentes no plano do painel FV do EV são apresentados na Tabela 1.

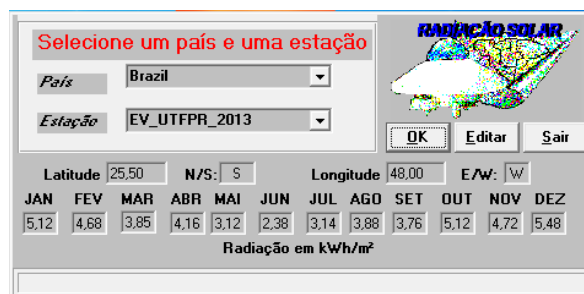


Figura 5 - Tela de entrada dos dados de irradiação.

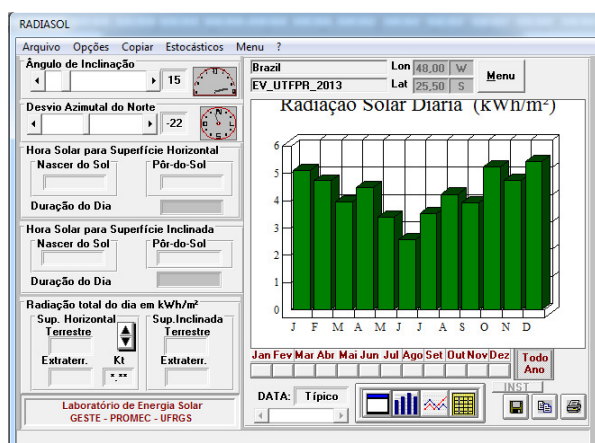


Figura 6 - Tela do RADIASOL com o gráfico de irradiação diária média ao longo do ano no painel FV do EV.

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
2014	6,08	5,38	4,50	3,28								

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 Equação (1) apresenta a grandeza em questão. A Tabela 2 mostra o *yield* mensal e anual em 2012, 2013 e início de 2014.

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

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

Mês	Yield 2012 (kWh/kWp)	Yield 2013 (kWh/kWp)	Yield 2014 (kWh/kWp)
Janeiro	130,0	107,1	132,9
Fevereiro	114,3	89,5	128,6
Março	129,5	83,3	91,9
Abril	89,1	88,1	71,9
Mai	65,2	70,0	
Junho	53,3	53,3	
Julho	75,2	68,6	
Agosto	93,3	81,0	
Setembro	100,5	87,6	
Outubro	98,1	122,9	
Novembro	103,8	102,9	
Dezembro	111,4	122,9	
ANO	1.163	1.077	1.275

A produtividade de 2013 foi inferior a de 2012, por dois motivos: menor incidência solar no ano de 2013 como pode ser observado na Figura 4 e na Tabela 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. Já nos dois primeiros meses de 2014 a produtividade foi superior aos dois anos anteriores, devido aos elevados índices de irradiação obtidos neste período.

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 Equação (2) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 3 apresenta a *Performance Ratio* em 2012, 2013 e início de 2014.

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

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

Mês	PR (2012)	PR (2013)	PR (2014)
Janeiro	74,4%	67,5%	70,5%
Fevereiro	71,3%	65,3%	82,4%
Março	79,4%	67,9%	65,9%
Abril	67,2%	65,7%	73,1%
Maiο	58,0%	66,2%	
Junho	50,7%	68,9%	
Julho	65,2%	62,7%	
Agosto	64,6%	61,6%	
Setembro	74,1%	73,4%	
Outubro	61,7%	75,8%	
Novembro	58,2%	72,3%	
Dezembro	61,3%	72,7%	
ANO	66,0%	68,7%	73,0%

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%. Já no início de 2014 a taxa de desempenho mantém-se elevada também pelos altos índices de irradiação neste período.

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 Equação (3) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 4 o Fator de Capacidade para 2012, 2013 e início de 2014.

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

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

Mês	FC (2012)	FC (2013)	FC (2014)
Janeiro	17,5%	14,4%	17,9%
Fevereiro	16,4%	12,9%	18,5%
Março	17,4%	11,2%	12,4%
Abril	12,4%	12,2%	10,0%
Mai	8,8%	9,4%	
Junho	7,4%	7,4%	
Julho	10,1%	9,2%	
Agosto	12,5%	10,9%	
Setembro	14,0%	12,2%	
Outubro	13,2%	16,5%	
Novembro	14,4%	14,3%	
Dezembro	15,0%	16,5%	
ANO	13,3%	12,3%	14,7%

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. Já em 2014, pelos altos índices de irradiação observados, também obteve Fator de Capacidade elevado.

4. CONCLUSÕES

O SFVCR do EV da UTFPR, gerou em média aproximadamente 200kWh/mês nestes dois anos e quatro meses 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 279kWh, 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 e quatro meses de operação, observou-se uma geração média de 2,4MWh/ano; *Yield* anual médio de 1.172kWh/kWp; *Performance Ratio* médio de 69% e Fator de Capacidade médio superior 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 (15º), 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 pelo menos uma vez por ano para manter o desempenho elevado.

O acompanhamento nestes primeiros dois anos e quatro meses 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.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.escriorioverdeonline.com.br>, 2013

INMET. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/>. Acessado em 2014.

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.