Oferta e Demanda de Energia – o papel da tecnologia da informação na integração dos recursos
26 a 28 de setembro de 2016 Gramado – RS

Geração Distribuída Fotovoltaica: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR em Curitiba

Jair Urbanetz Junior
Gerson Máximo Tiepolo
Eloy Fassi Casagrande Junior
Fabianna Stumpf Tonin
Juliana D'Angela Mariano

RESUMO

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Curitiba, possui atualmente dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR), um com 2,1 kWp em operação desde dezembro de 2011, e outro com 10,2 kWp em operação desde março de 2016. Este artigo, além de descrever os dois SFVCR, apresenta a análise do desempenho destes sistemas. O SFVCR de 2,1kWp está instalado no Escritório Verde (EV) da UTFPR e opera de forma ininterrupta, sendo que até maio de 2016 gerou um pouco mais de 10MWh de energia elétrica. O painel fotovoltaico desse sistema foi montado acompanhando a inclinação e orientação do telhado da edificação, o que não lhe confere máximo desempenho. Por sua vez, o SFVCR de 10,2kWp foi projetado e implantado visando maximizar seu desempenho. Esse sistema utiliza um inversor de alto rendimento, e o painel fotovoltaico foi instalado sobre a cobertura da edificação, nas condições ótimas. As primeiras medições apontam desempenho superior ao SFVCR do EV, conforme esperado, produzindo aproximadamente 1,1 MWh já no primeiro mês de operação, valor este, que em termos de produtividade, é cerca de 11% superior ao SFVCR do EV. Além do

acompanhamento da energia elétrica gerada pelos dois sistemas, tem-se um histórico dos denominados índices de mérito dos SFVCRs, que são: Produtividade ou *Yield*; Taxa de Desempenho ou *Performance Ratio*; e Fator de Capacidade. Esses índices permitem avaliar o desempenho dos SFVCRs implantados em locais e regiões distintos. Os valores de irradiação incidentes sobre os dois painéis fotovoltaicos 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 de Meteorologia (INMET) para a estação A807, localizada em Curitiba. Como o piranômetro do INMET está instalado na posição horizontal, é utilizado o programa RADIASOL para determinar a irradiação que efetivamente incide sobre cada painel fotovoltaico. 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), permitindo assim, o cálculo dos índices de mérito dos dois SFVCRs. Esses dois sistemas confirmam a aplicabilidade no ambiente urbano da Geração Distribuída Fotovoltaica, a qual disponibiliza energia elétrica junto ao ponto de consumo e, como são aplicados sobre as coberturas das edificações, não necessitam de área adicional. A Geração Distribuída Fotovoltaica vem se mostrando uma forma eficaz, confiável e sustentável de ampliar a disponibilidade de energia elétrica no ambiente urbano.
Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Geração distribuída, Índices de Mérito

ABSTRACT

The Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba campus, currently has two Photovoltaic Systems Connected to the Grid (SFVCR), with 2.1 kWp in operation since December 2011, and the other with 10.2 kWp in operation since March 2016. This article describes the two SFVCR presents and also the analysis of the performance systems. The SFVCR of 2.1 kWp is installed in the Green Office (EV) UTFPR and operates continuously, and to Mai 2016 generated just over 10 MWh of electricity. The photovoltaic panel system that was set up following the inclination and orientation of the roof of the building, which does not give the maximum performance. In the other hand, the SFVCR of 10.2 kWp was designed and deployed to maximize their performance. This system uses a high performance inverter, and located on the roof of the building, in optimal conditions. The first

measurements show better performance than the EV SFVCR, as expected, producing approximately 1.2 MWh in the first month of operation , an amount that in terms of productivity is about 11 % higher than the EV SFVCR. 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 the Curitiba. As the pyranometer INMET is installed horizontally , the RADIASOL program is used to determine the radiation that effectively focuses on the photovoltaic panel. The RADIASOL 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). 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 photovoltaic generation has proved to be an effective, reliable and sustainable form of distributed generation of electricity in the urban environment.
Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Distributed Generation, Merit Indexes

1. INTRODUÇÃO

O Brasil e, mais especificamente o estado do Paraná, possui um potencial fotovoltaico muito amplo a ser explorado, pelo fato da produtividade média prevista para sistemas fotovoltaicos ser significativamente superior aquela obtida em países como Alemanha, Itália e Espanha, que juntos representam 54% da potência instalada em energia fotovoltaica no mundo (TIEPOLO *et al*., 2014).

Em virtude disso, 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 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 (REBECHI, 2008).

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFVCR) NA UTFPR

Um SFVCR é basicamente composto de um painel fotovoltaico, 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).

A UTFPR campus Curitiba possui dois SFVCR instalados e operando, um de 2,1 kWp (instalado no Escritório Verde – Sede Centro) e o mais recente de 10,2 kWp (instalado na Sede Neoville). Ambos os SFVCRs são fundamentados na interação de dois agentes responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica: a concessionária e o gerador fotovoltaico. Havendo incidência solar sobre o painel fotovoltaico (FV), 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 à 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.

2.1 Escritório Verde - EV

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 m^2 que adotou inúmeras estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas, visando verificar o desempenho destas estratégias, entre elas, a máxima eficiência

energética (ESCRITÓRIO VERDE, 2016). 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. A Figura 1 ilustra a fachada do EV da UTFPR.

Figura 1 - Vista frontal do EV da UTFPR (Acervo dos autores)

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), o qual entrou em operação em 14 de dezembro de 2011. A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de 15m². A Figura 2 ilustra o painel fotovoltaico e o inversor do SFVCR do EV da UTFPR.

Figura 2 - Vista dos painéis do EV e do inversor (Acervo dos autores)

2.2 Sede Neoville

Em 29 de fevereiro de 2016, entrou em operação um SFVCR na sede Neoville do campus da UTFPR, em Curitiba. Esse SFVCR tem potência instalada total de 10,2 kWp, sendo constituído de 2 conjuntos de 17 módulos fotovoltaicos modelo ELCO-A300P, ligados em série, totalizando assim, 34 módulos de silício policristalino de 300 Wp em cada módulo e, um inversor trifásico sem transformador (Chint Power, modelo CPS SCA 10KTL-DO) em 380 V de alto rendimento, com potência nominal de 10 kW. A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de aproximadamente 68m² (excluindo a área de circulação entre os painéis). A Figura 3 mostra os painéis fotovoltaicos e o inversor do SFVCR montados no telhado da UTFPR, sede Neoville. Além disso, vale ressaltar que os painéis foram instalados com inclinação de 25º (mesmo valor da latitude da cidade) e orientados para o norte geográfico com desvio azimutal de 0º, alcançando assim, as condições ótimas de instalação.

Figura 3 - Vista dos painéis do e do inversor (Acervo dos autores)

3. DESEMPENHO DOS SFVCR NA UTFPR

A análise do desempenho dos dois sistemas utiliza os valores de energia gerada o período de operação e os valores de irradiação incidentes nos painéis FV. A partir da energia gerada e da irradiação incidente, calculam-se os índices de mérito do SFVCR, que são: *yield* (produtividade); *performance ratio* (taxa de desempenho) e fator de capacidade.

3.1 Energia Gerada pelo SFVCR do EV e do Neoville

Analisando-se o funcionamento do SFVCR do EV nos anos de 2012, 2013, 2014, 2015 e de janeiro a maio de 2016, observou-se uma geração total de 10,24 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. A Figura 4 apresenta os valores de energia elétrica gerados em cada mês de operação do SFVCR do EV da UTFPR.

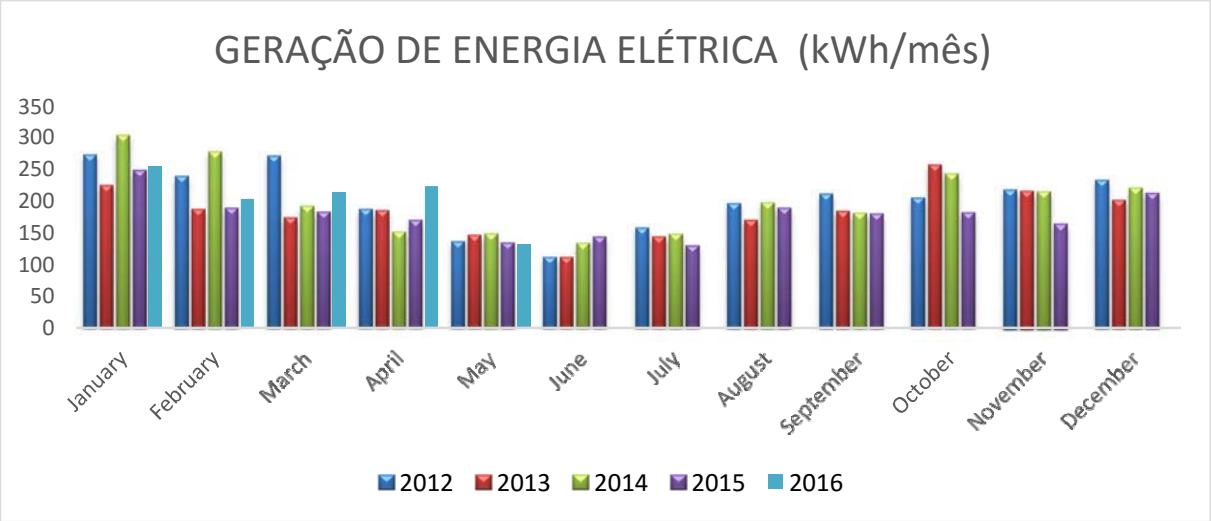

Figura 4 - Geração de Energia Elétrica (kWh/mês) no EV para os anos de 2012 à metade de 2016

Por sua vez, a Tabela 1, revela os dados de geração de energia elétrica (KWh/mês) na sede Neoville e no EV, para os meses de janeiro a maio de 2016. O valor gerado para esse período na sede Neoville é aproximadamente 6 vezes superior ao valor gerado no EV.

Tabela 1 - Geração de Energia Elétrica no ano de 2016

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh/mês)		Ano de 2016
Mês	Neoville	EV
January	----	254
February	50,3	203
March	1100,8	213
April	1329,3	223
May	802,3	131

3.2 Irradiação Incidente no Painel FV dos SFVCR 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 em 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 15º, e com desvio azimutal em relação ao norte geográfico de 22º para oeste. A Figura 5 mostra esses valores. 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).

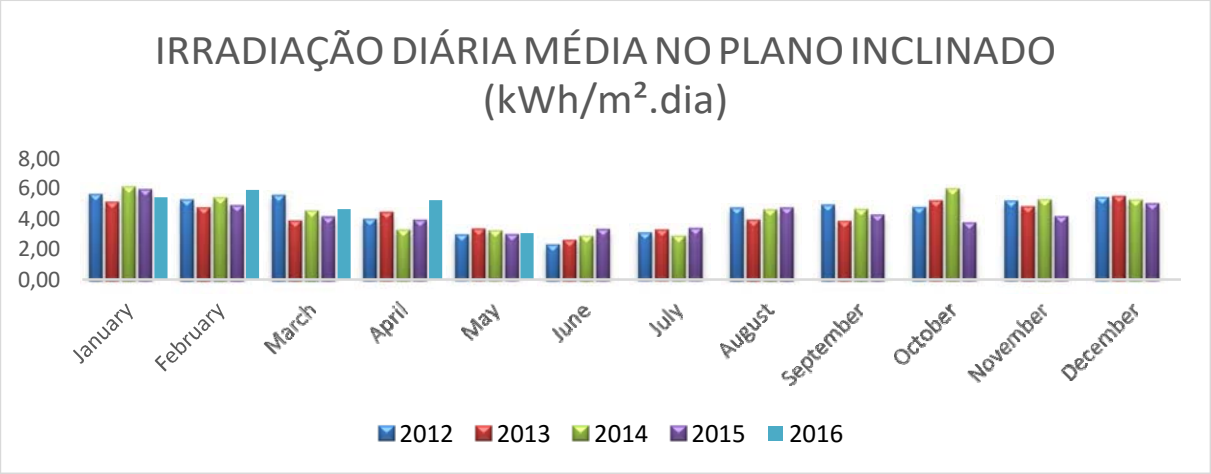

Figura 5 - Irradiação diária média (kWh/m².dia) no plano do painel FV obtida pelo programa RADIASOL para o EV

A Tabela 2 mostra os dados de irradição diária para a sede Neoville e EV. Os valores de irradiação da sede Neoville são, em média, similares ao do EV.

Tabela 2 - Irradiação diária média no plano inclinado

IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO INCLINADO (kWh/m².dia)		Ano de 2016
Mês	Neoville	EV
January	5,25	5,38
February	5,78	5,86
March	4,62	4,60
April	5,43	5,20
May	3,15	3,04

3.3 Índices de Mérito dos SFVCRs

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 3 mostra o *yield* anual dos anos 2012, 2013, 2014 e 2015 do EV e, também revela os valores do *yield* mensal de 2016 do EV e do Neoville. Nota-se que *yield* do período de março a maio do Neoville sempre foi superior ao do EV.

$$Y = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV}} \left(\frac{\text{kMh}}{\text{kMp}}\right) \qquad \text{Equação (1)}$$

Tabela 3 - Produtividade anual do EV e mensal do EV e do Neoville

YIELD (kWh/kWp)		
Ano/Mês	EV	Neoville
2012	1163,80	-----
2013	1050,47	-----
2014	1150,00	-----
2015	1015,24	-----
2016/Jan	120,95	-----
2016/Fev	96,66	-----
2016/Mar	101,43	107,92
2016/Abr	106,19	130,32
2016/Mai	62,38	78,66
Média de Março a Maio	97,52	105,63

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 4 apresenta a Performance Ratio em 2012, 2013 ,2014,2015 e início de 2016 do EV e da sede Neoville da UTFPR.

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

Tabela 4 - Taxa de desempenho anual do EV e mensal do EV e do Neoville

PERFORMANCE RATIO (%)		
Ano/Mês	EV	Neoville
2012	71,33%	-----
2013	68,21%	-----
2014	70,73%	-----
2015	66,27%	-----
2016/Jan	71,99%	-----
2016/Fev	55,93%	-----
2016/Mar	71,13%	75,35%
2016/Abr	68,07%	80,00%
2016/Mai	66,19%	80,55%
Média de Março a Maio	66,96	78,64

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 5 o Fator de Capacidade para 2012, 2013,2014,2015 e início de 2016. Esse valor é 4,3% maior ao do EV para o período de março a maio de 2016.

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

Tabela 5 - Fator de Capacidade anual do EV e mensal do EV e do Neoville

FATOR DE CAPACIDADE (%)		
Ano/Mês	EV	Neoville
2012	13,25%	-----
2013	12,00%	-----
2014	13,16%	-----
2015	11,60%	-----
2016/Jan	16,26%	-----
2016/Fev	13,89%	-----
2016/Mar	13,63%	14,51%
2016/Abr	14,75%	18,10%
2016/Mai	8,38%	10,57%
Média de Março a Maio	13,38	14,39

4. CONCLUSÕES

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 e do Neoville.

Quanto aos índices de mérito: *Yield*, *Performance Ratio* e Fator de Capacidade, nota-se que os resultados do sistema do Neoville são superiores ao do EV. Nos meses de março a maio de operação do sistema do Neoville, observou-se uma produtividade superior ao EV, uma taxa de desempenho 1,17 vezes superior e um fator de capacidade que atingiu o valor de 18,1% no mês de abril. Esses resultados comprovam que a tecnologia de inversor utilizada e o modo de instalação afetam diretamente o desempenho do sistema. O Neoville utiliza um inversor trifásico sem transformador em 380V de alto rendimento, e o painel fotovoltaico instalado nas condições ótimas (orientado para o norte geográfico e com inclinação igual à latitude de Curitiba), ou seja, fatores que maximizam o desempenho do sistema.

O acompanhamento nestes quatro anos de operação do SFVCR do EV em Curitiba confirma que esse sistema é alta confiabilidade, visto que ele opera de forma ininterrupta desde sua instalação, de forma limpa e silenciosa e não necessita de área adicional, pois o painel fotovoltaico está instalado sobre o telhado da edificação. Em vista disso, o propósito da UTFPR é fazer com que o sistema instalado na sede Neoville siga os mesmos passos do EV e futuramente, torne-se referência em geração fotovoltaica, comprovando assim, que essa é a forma mais promissora de geração distribuída para o ambiente urbano.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L., "Distributed generation: a definition", 2001.

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.

ESCRITÓRIO VERDE. Disponível em http://www.escritorioverdeonline.com.br, 2016
INMET. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/. Acessado em 2014.

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.

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.

REBECHI, Samuel. O potencial da geração solar fotovoltaica conectada ao sistema de distribuição urbano: estudo de caso para um alimentador com pico de carga diurno. Florianópolis, 2008.

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.

TIEPOLO, Gerson M.; CANCIGLIERI JR, Osiris; URBANETZ JR, Jair; VIANA, Trajano; PEREIRA, Enio B.. Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no estado do Paraná com Alemanha, Itália e Espanha. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5, 2014, Recife. Anais do 5º Congresso Brasileiro de Energia Solar (V CBENS), Recife, 31 a 3 de abril de 2014.

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.