AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA[1]

SILVEIRA, C. O., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: camila.osilveira@hotmail.com; TONOLO, E. A., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: edwintonolo@gmail.com; KRASNHAK, L. B., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: larissabarbosakrasnhak@gmail.com; URBANETZ JR, J., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: urbanetz@utfpr.edu.br

ABSTRACT

Humanity is increasingly dependent on energy and the demand for it is growing every day. Renewable energy sources are consolidated alternatives in the market. Governmental incentives have been created to stimulate the installation of small scale systems. Despite the great advantages of renewable sources, a preliminary study of the locations to be installed the systems is of high importance. Technical and economic studies must be taken into account, so the system will not be installed in a non-beneficial place and may not generate the desired energy and became not profitable. A study in two different photovoltaic (PV) systems will be performed. The figures of merit (Performance Ratio, Yield and Capacity Factor) give the comparison of PV system installed in different places, positions and inclination angle. The economic scenario, calculated by the payback period and discount payback period and also internal rate of return (IRR) and net present value (NPV) can indicate the investment viability. The average monthly energy consumption was considerate, an estimated value for the energy price, in 25 years, had to be calculated, the maintenance and efficiency loss were taken into account. The payback period estimates a smaller time than the discounted payback, in both studied systems.

Keywords: *Distributed generation. Economic viability. Photovoltaic systems.*

1 INTRODUÇÃO

A elevação da dependência de energia elétrica demonstra que os países precisam investir no setor para garantir adequado fornecimento e possibilitar o seu desenvolvimento (SANTOS, 2009).

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca pela diversificação da matriz elétrica, associado com o aumento na demanda por energia e desenvolvimento, impulsionou a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (NASCIMENTO, 2017). Estima-se que até 2050 a projeção de consumo de energia elétrica será de 1,6 TWh, resultado de um aumento de 3,1% ao ano (EPE, 2016).

O interesse pelas fontes alternativas de energia elétrica tem contribuído para o aumento do uso de geradores distribuídos conectados à rede elétrica. A geração distribuída é uma modalidade de geração caracterizada pelo uso

[1] SILVEIRA, C. O., TONOLO, E. A., KRASNHAK, L. B., URBANETZ JR, J. Avaliação do Desempenho e Estudo da Viabilidade Econômica da Geração Distribuída por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

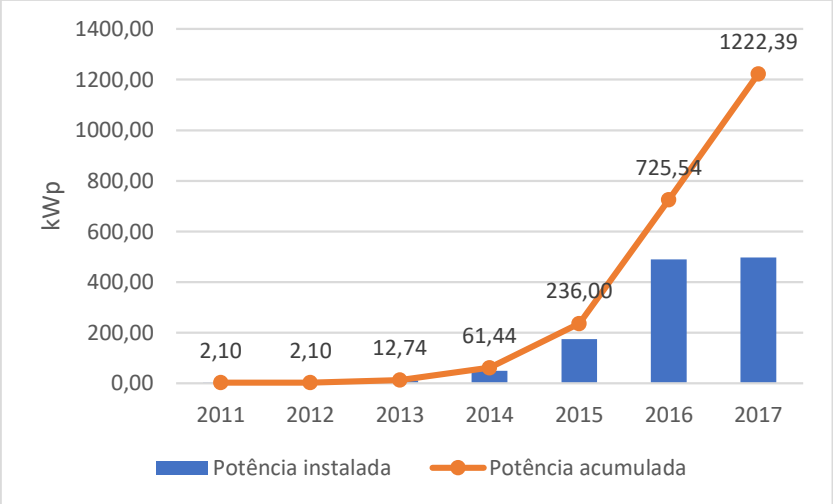
de geradores de pequena e média potências instalados próximos aos locais de consumo (VILLALVA, 2010).

As fontes renováveis, que inicialmente eram mais caras, tornam-se mais competitivas na medida em que se expandem, sendo a competitividade resultante da redução dos custos devido ao ganho de escala, dos avanços tecnológicos e de concorrência no mercado. Incentivos governamentais também auxiliam na consolidação das energias renováveis (NASCIMENTO, 2017). A obtenção de energia elétrica a partir da energia solar pode ser obtida por meio dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR).

No Brasil, para incentivar o uso desta tecnologia, foi aprovada a Resolução Normativa n. 482 de 17 de abril de 2012 da ANEEL, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração ao sistema de distribuição, estabelecendo no Brasil a compensação de energia elétrica. Em 01 de março de 2016, as alterações da Resolução Normativa n. 482 provenientes da Resolução Normativa n. 687 da ANEEL entraram em vigor, tornando o sistema de compensação mais abrangente (ANEEL, 2012) (ANEEL, 2015).

O Gráfico 1 apresenta o crescimento da potência instalada dos SFVCR em Curitiba desde 2011 até 2017, além do respectivo potencial acumulado com base no Registro das Unidades Consumidoras com Geração Distribuída disponibilizado pela ANEEL (ANEEL, 2018).

Gráfico 1 – Potência instalada em Curitiba



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018); URBANETZ *et al.* (2014b)

Ao analisar o Gráfico 1, pode-se perceber que há uma crescente expansão da energia solar fotovoltaica na cidade.

2 OBJETIVOS

Estudar a viabilidade econômica da geração distribuída por SFVCR através do levantamento de dados de irradiação solar e análise de desempenho de

sistemas fotovoltaicos instalados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Curitiba para o ano de 2017.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos Sistemas

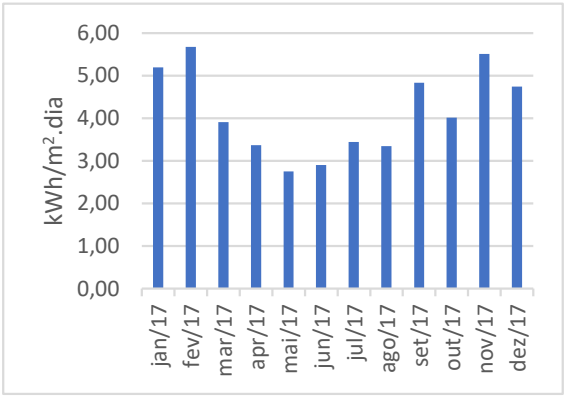
Em dezembro de 2011 foi inaugurado o Escritório Verde (EV) na UTFPR Câmpus Curitiba Sede Centro, uma edificação sustentável que adotou inúmeras estratégias de sustentabilidade, entre elas a geração fotovoltaica para prover energia à edificação em conjunto com o sistema elétrico da concessionária. Este sistema tem um inversor monofásico em 220 V de 2 kW de potência nominal e uma potência instalada de 2,1 kWp, ocupando uma área de 15 m² na cobertura do edifício, instalado seguindo a orientação do telhado. (URBANETZ JR *et al.*, 2016).

Em fevereiro de 2016 entrou em operação no Câmpus Curitiba Sede Neoville o segundo SFVCR da UTFPR. Esse sistema tem potência instalada de 10,2 kWp e um inversor trifásico sem transformador 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 68 m². (URBANETZ JR *et al.*, 2016).

3.2 Índices de Mérito

A fim de avaliar o desempenho e a viabilidade econômica dos SFVCR instalados na universidade, foi necessário coletar os dados de irradiação solar na cidade ao longo dos anos de operação dos sistemas. Esses valores encontram-se disponíveis na base de dados das estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET (INMET, 2018). O Gráfico 2 apresenta os valores de irradiação diária média de 2017, medidos pelo piranômetro localizado na Estação A807 de Curitiba.

Gráfico 2 – Irradiação diária média mensal no plano horizontal em Curitiba



Fonte: Os autores

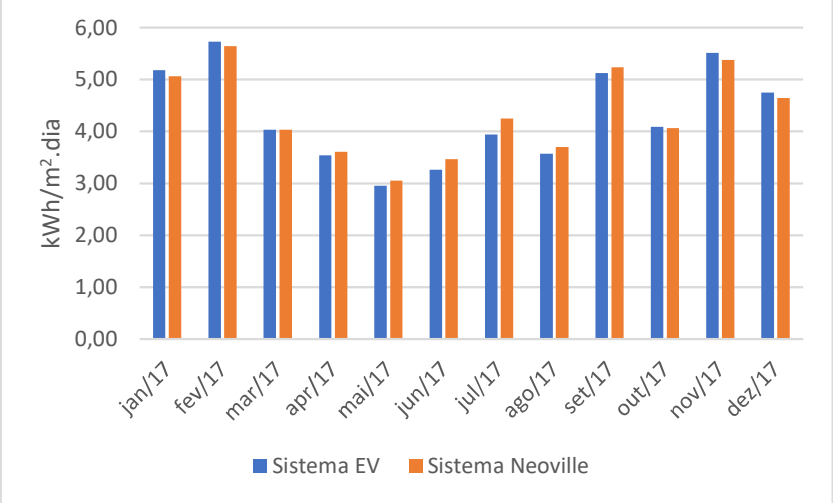
O piranômetro é um instrumento de medição capaz de medir a irradiância solar convertendo a energia térmica em energia elétrica (PEREIRA *et al.*, 2017). Em razão do piranômetro do INMET estar localizado na posição horizontal, é necessário determinar os valores de irradiação incidente sobre os painéis fotovoltaicos dos dois sistemas (ver Gráfico 3) através do *software* RADIASOL, fornecido gratuitamente pela UFRGS. A Tabela 1 apresenta algumas características que determinam a performance dos SFVCR.

Tabela 1 – Características dos SFVCR

	Sistema EV	Sistema Neoville
Início de operação	Dezembro/2011	Fevereiro/2016
Ângulo de inclinação	15°	25°
Desvio azimutal	22° O	0°
Potência instalada	2,1 kWp	10,2 kWp
Geração de energia (em 2017)	209,5 kWh/mês	1.030,22 kWh/mês

Fonte: Os autores

Gráfico 3 - Irradiação diária média mensal no plano inclinado



Fonte: Os autores

Após a verificação dessas características, foi possível determinar os índices de mérito descritos a seguir, permitindo a comparação de desempenho entre dois ou mais SFVCR que operam com potências distintas e estão situados em diferentes localidades.

O Fator de Capacidade (FC) (ver Equação 1) corresponde a proporção entre a energia gerada (kWh) e a produção total máxima de um sistema vinculada a um determinado período (URBANETZ JR *et al.*, 2014a).

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência} * \text{Tempo}} \ (\%) \qquad (1)$$

O índice de produtividade ou *Final Yield* (YF) (ver Equação 2) reflete o desempenho do SFVCR por meio da relação entre a energia gerada (kWh) e a sua potência instalada (kWp). (URBANETZ JR *et al.*, 2014a).

$$YF = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência instalada}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}\right) \qquad (2)$$

A taxa de desempenho ou *Performance Ratio* (PR) (ver Equação 3) representa a real capacidade em converter a energia solar disponível no plano dos

painéis em corrente elétrica alternada, normalmente vinculada a um ano de operação (URBANETZ JR *et al.*, 2014a). Esse índice leva em consideração as perdas ocorridas no processo de conversão da energia solar em eletricidade.

$$PR = \frac{YF}{Irradiação/1000}\ (\%) \qquad (3)$$

3.3 Análise Econômica

Para o estudo econômico referente ao ano de 2017, foram adotadas as seguintes considerações:

- SFVCR com vida útil média de 25 anos;
- Consumo médio de energia elétrica de 2.216,92 kWh/mês e 39.211,92 kWh/mês para os consumidores EV e Neoville, respectivamente;
- Unidades consumidoras trifásicas com custo de disponibilidade mensal de 100 kWh;
- Consumidor EV pertencente ao subgrupo B1, com tarifa convencional de 0,69118 R$/kWh (COPEL, 2017a);
- Consumidor Neoville pertencente ao subgrupo A4 – poder público, com tarifa horária verde de 0,42147 R$/kWh (COPEL, 2017a);
- Valor padrão de 8,13% a.a. para a correção da tarifa de energia elétrica, com base em reajustes anuais de 2010 a 2017 (COPEL, 2017b);
- Custo aproximado de R$ 13.761,65 e R$ 51.042,63 para os SFVCR do EV e Neoville, respectivamente, de acordo com pesquisas no mercado de instaladores em Curitiba;
- Custos com operação e manutenção (O&M) de 1% a.a. sobre o investimento inicial total do SFVCR (EPE, 2012);
- Perda de eficiência do gerador fotovoltaico de 0,65% a.a. (EPE, 2012);
- Reposição de inversor a cada 10 anos, representando 16,09% do investimento inicial total do SFVCR (EPE, 2012);
- Taxa de juros SELIC de 10,83% a.a., referente aos reajustes anuais de 2010 a 2017, para o cálculo do *payback* descontado, VPL e TIR (BCB, 2018).

Com base nos dados coletados, foi possível verificar a viabilidade por meio de ferramentas de engenharia econômica descritas a seguir.

O *payback* simples mede o tempo necessário para recuperar o capital do investimento realizado. O método descontado, apresentado na Equação 4, considera o valor do dinheiro no tempo, trazendo todo o fluxo de caixa (FC) para o valor presente (VP) através de uma taxa de juros (i) em um período (n), diferentemente do método simples, que não leva em conta essa consideração (LEMES, 2015).

$$VP = \frac{FC}{(1+i)^n} \qquad (4)$$

O VPL (Valor presente líquido), apresentado na Equação 5, calcula o valor presente do fluxo de caixa ao longo de um período (n) através de uma taxa de juros (i), descontando o custo inicial do projeto (GITMAN, 2010).

$$VPL = -FC_0 + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \ldots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (5)$$

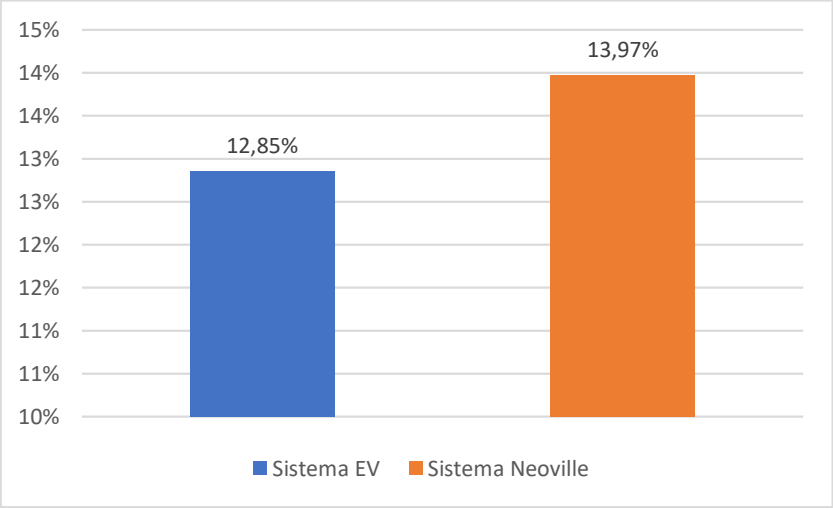
A TIR (Taxa interna de retorno) representa a taxa que iguala o VPL de um projeto à zero, ou seja, quando o *payback* é atingido e o investimento foi pago. A TIR considera o valor do investimento no tempo e essa taxa é comparada com a taxa de retorno esperada para o projeto, indicando sua viabilidade ou não (LEMES, 2015). Por meio da função "TIR" do *software Excel*, obteve-se os resultados para os casos estudados.

4 RESULTADOS

4.1 Índices de Mérito

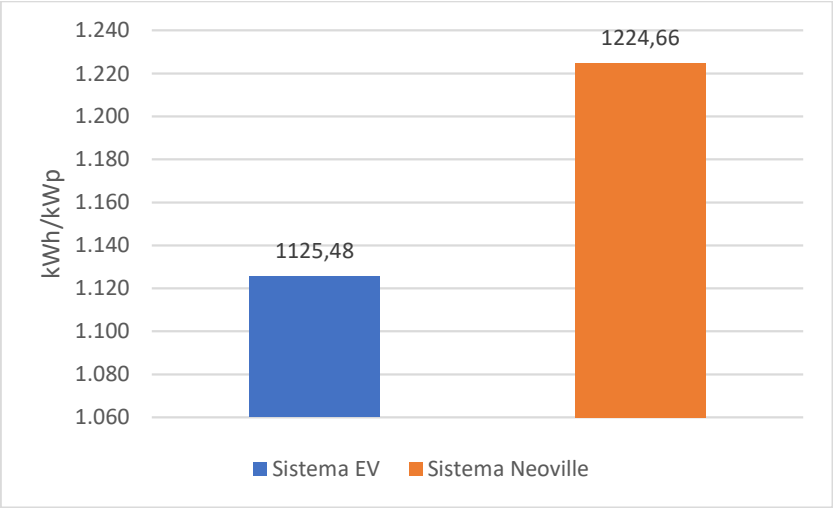
Os Gráficos 4, 5 e 6 apresentam o comparativo dos resultados dos índices de mérito ao longo do período em que os SFVCR encontram-se em operação.

Gráfico 4 - Comparação do Fator de Capacidade



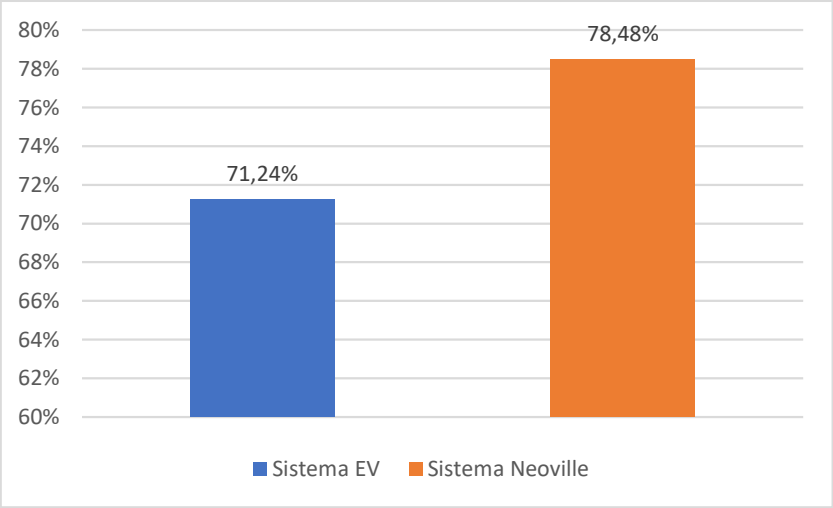
Fonte: Os autores

Gráfico 5 - Comparação da Produtividade



Fonte: Os autores

Gráfico 6 - Comparação da *Performance Ratio*



Fonte: Os autores

4.2 Análise Econômica

Para o cálculo do *payback* foi necessário adotar um fluxo de caixa para controlar os recursos financeiros da instalação dos sistemas. Pode-se perceber que o investimento foi pago quando o fluxo de caixa torna-se positivo. Para os cálculos referentes ao VPL e TIR, considerou-se o investimento inicial e as economias geradas nos 25 anos. Os resultados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise econômica dos SFVCR

	***Payback* simples**	***Payback* descontado**	**VPL**	**TIR**
Sistema EV	6 anos e 11 meses	12 anos	R$ 10.468,51	17,34%
Sistema Neoville	8 anos e 1 mês	15 anos e 3 meses	R$ 22.175,53	14,73%

Fonte: Os autores

5 CONCLUSÕES

A economia à longo prazo pode ser vantajosa ao consumidor que instala o SFVCR devido ao sistema de compensação de energia elétrica. Além de serem sistemas com alta confiabilidade, operam de forma limpa e silenciosa sobre a cobertura das edificações, sendo integrada ao entorno construído.

O levantamento referente aos SFVCR instalados em Curitiba até o ano de 2017 permite analisar o perfil das unidades consumidoras, sendo 95,74% pertencentes ao grupo B de 235 sistemas com microgeração ou minigeração, totalizando 1,22 MWp de potência instalada.

Através do estudo dos dois SFVCR instalados em Curitiba, percebe-se que a geração de energia elétrica é proporcional aos níveis de irradiação solar que incidem sobre o painel fotovoltaico, impactando diretamente nos resultados dos índices de mérito. O comparativo entre eles ressalta que os índices estão adequados e que a planta instalada em 2016 apresenta desempenho superior à instalada em 2011. Fatores como índices de sujidade e sombreamento, condições ótimas de instalação, além da tecnologia dos inversores, interferem no resultado dessa análise.

Na análise econômica, o *payback* nos dois casos foi inferior a 25 anos e ocorre de forma mais rápida quando a tarifa de energia elétrica é maior. O VPL apresentou valores positivos ao final do período analisado e a TIR ficou superior a taxa de juros considerada na análise. Portanto, a viabilidade dos projetos foi comprovada através das quatro ferramentas de engenharia econômica utilizadas.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482**. 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em março de 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687**. 24 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em março de 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída.** 12 de janeiro de 2018. Disponível em: <goo.gl/Rme0Kk>. Acesso em março de 2018.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das Taxas de Juros**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>. Acesso em março de 2018.

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Taxas e Tarifas**. 20 de junho de 2017a. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>. Acesso em março de 2018.

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Alterações Tarifárias**. 06 de julho de 2017b. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F04afb43850ca33c503257488005939b7>. Acesso em março de 2018.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Nota Técnica EPE. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, maio de 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf > Acesso em março de 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Energia 2050.** Nota Técnica DEA 13/15. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2 01315%20Demanda%20de%20Energia%2020 50.pdf>. Acesso em março de 2018.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. São Paulo, SP, 2010.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEREOLOGIA. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em março de 2018.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: Situação e perspectivas.** Estudo Técnico. 2017.

LEMES JR, A. B.; CHEROBIM, A. P. M.; RIGO, C. M. **Fundamentos de finanças empresariais: técnicas e práticas essenciais**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

SANTOS, I. P. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

URBANETZ JR, J.; CASAGRANDE JR, E. F.; TIEPOLO, G. M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Florianópolis, 2014a.

URBANETZ JR, J.; CHINVELSKI, T.; SIMÃO, C. A. F.; MAKISHI, L. M. M. **Primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Homologado pela COPEL**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife, 2014b.

URBANETZ JR, J., TIEPOLO G. M., CASAGRANDE JR, E. F., TONIN F. S., MARIANO, J. D., **Geração Distribuída Fotovoltaica: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR em Curitiba**. In: X CBPE. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2016.

VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 2010.