

DEZ ANOS DE OPERAÇÃO DO SFVCR DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA/PR

Isadora Zanella Zardo – isa_zardo@hotmail.com
Bruno Yoshiake Nakahata - nakahata.bruno@gmail.com
Marianna Aranda Lima - mariannaarandalima@gmail.com
Eloy Fassi Casagrande Junior - eloy.casagrande@gmail.com
Jair Urbanetz Junior - urbanetz@professores.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Curitiba

Resumo. *Este artigo apresenta a análise do desempenho de dez anos de operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR) do Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os SFVCRs podem ser integrados à edificação, não necessitando de área adicional, visto que são normalmente instalados sobre a cobertura, o que possibilita vasta aplicação no ambiente urbano como geradores de energia elétrica junto ao ponto de consumo. Possuem elevada confiabilidade e operam de forma limpa e silenciosa. O EV da UTFPR é a primeira edificação acadêmica sustentável do Brasil, com 150 m² de área construída e diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas. O sistema fotovoltaico adotado no EV possui uma potência de 2,10 kWp como linha mestra para prover energia à edificação, em conjunto com o sistema elétrico da concessionária. Ao longo destes dez anos de operação do SFVCR a geração de energia foi equivalente a 23,66 MWh, com um Fator de Capacidade médio próximo a 13%; Yield anual médio de pouco mais de 1.042 kWh/kWp; e Performance Ratio médio de 72,28%, índices que confirmam a eficácia deste tipo de instalação.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Índices de Mérito.*

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente competitividade para a geração de energia elétrica, a demanda por sistemas fotovoltaicos vem expandindo-se, no ano de 2020 a China (48,2 GW) foi o país com maior crescimento na capacidade instalada, seguido por Estados Unidos (19,2 GW), Vietnã (11,1 GW), Japão (8,2 GW) e Alemanha (4,9 GW) (REN21, 2021). No Brasil, a aplicação de fotovoltaicos ainda é menor se comparada a estes países, porém, apresentou em 2020 um aumento para mais de 3 GW da capacidade instalada, segundo o REN21 (2021). O número de empreendimentos neste setor no Brasil está se ampliando, partindo de cerca de apenas 200 kWp de capacidade instalada em 2010 (Urbanetz Jr, 2010), para mais de 4.768 MWp em 2021 de micro e mini geração distribuída conforme o relatório final do Balanço Energético Nacional (2021). Considerando geração distribuída e geração centralizada, o Brasil ultrapassa 12,5 GW de potência instalada (ANEEL, 2021a) (ANEEL 2021b).

Em dezembro de 2011, foi inaugurado o Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), a primeira edificação acadêmica sustentável do Brasil. O modelo de 150 m² adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas, visando verificar o desempenho destas estratégias, entre elas, a máxima eficiência energética. Além de aproveitar a iluminação natural e o uso de lâmpadas LED, o projeto também optou pela técnica de geração de energia fotovoltaica, em conjunto com o sistema elétrico da concessionária, para fornecer energia ao edifício.

Diversas pesquisas foram realizadas sobre diferentes pontos do sistema instalado no EV, como a estimativa da temperatura das células fotovoltaicas em SFVCR (Yang, 2019), o impacto da nebulosidade na geração de energia (Cremasco, 2020), o efeito do sombreamento na eficiência de um SFVCR (Tortelli, 2016), o impacto da acumulo de sujeiras sobre os módulos (Tonollo, 2017) (Tonollo, 2018), e o impacto da degradação dos módulos (Tonollo, 2020) (Takeuchi, 2020).

2. CARACTERÍSTICAS DO 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 2,1 kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício policristalino, modelo KD210GX-LP ligados em série) e um inversor monofásico em 220 V de 2 kW de potência nominal (PVPOWERED modelo PVP2000), entrou em operação em 14 de dezembro de 2011. O painel está orientado a aproximadamente 15° de inclinação e com desvio azimutal de 22° para oeste (Urbanetz, 2012).

A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de apenas 15 m², porém ele é capaz de gerar energia suficiente para suprir todo o consumo do EV (Mello, 2018) (Krasnhak, 2019). A Fig. 1 mostra a fachada do EV com o painel fotovoltaico na cobertura, já a Fig. 2 mostra o painel e o inversor utilizados no SFVCR do EV da UTFPR.



Figura 1 - Fachada com painel fotovoltaico na cobertura do Escritório Verde.



Figura 2 - Inversor instalado no Escritório Verde.

3. DESEMPENHO DO SFVCR DO EV DA UTFPR

3.1 Irradiação

Os valores de irradiação foram obtidos a partir do banco de dados disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação A807, localizada em Curitiba (INMET, 2021).

Os valores de irradiação diária média no plano horizontal, coletados no banco de dados do INMET, mês a mês, nos 10 anos em que o sistema FV do EV está em operação são apresentados na Fig. 3.

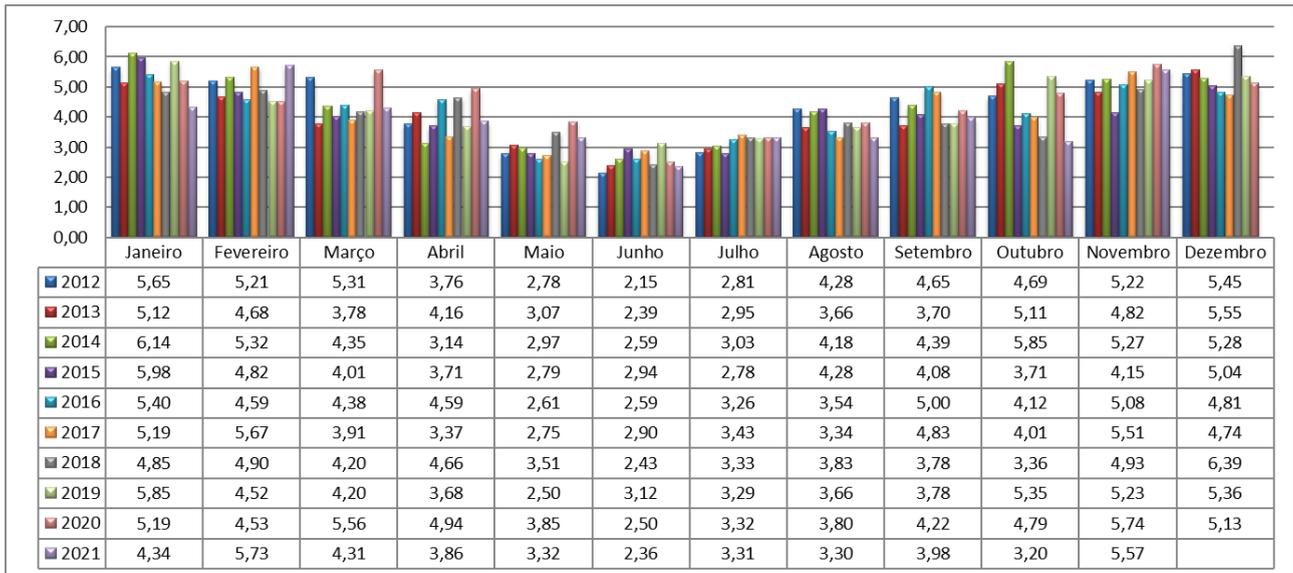


Figura 3 - Irradiação diária média no plano horizontal - Piranômetro do INMET [kWh/m².dia].

Para determinar a irradiação que efetivamente incide sobre o painel FV do EV é utilizado o programa RADIASOL, uma vez que os dados de irradiação do piranômetro do INMET estão no plano horizontal. Utilizando a localização do EV, nas seguintes coordenadas: latitude $-25,44^\circ$ e longitude $-49,26^\circ$, e o seguintes dados do painel FV: inclinação de aproximadamente 15° e 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, 2021), 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 inclinado, mês a mês ao longo dos 10 anos de operação.

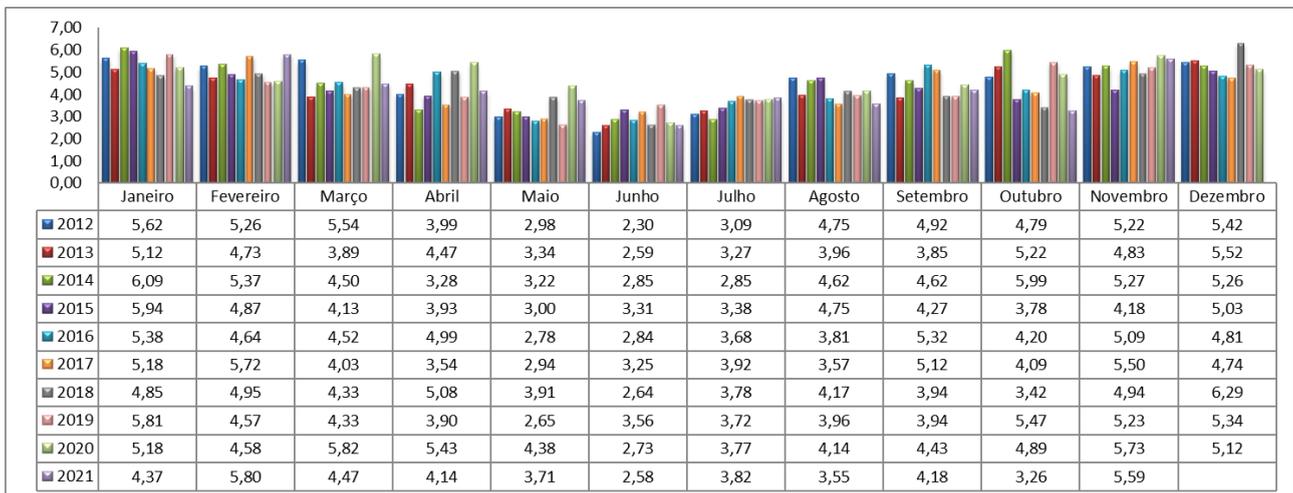


Figura 4 - Irradiação diária média no plano inclinado [kWh/m².dia].

3.2 Geração de energia elétrica

A geração de energia elétrica é proporcional a irradiação incidente no painel FV, onde nos meses com maior incidência solar (verão) há maior geração de energia elétrica e nos meses com menor incidência solar (inverno) há menor. A Fig. 5 apresenta os valores de energia elétrica gerados em cada mês, e a Fig. 6 a geração média de cada ano ao longo dos 10 anos de operação do SFVCR do EV da UTFPR.

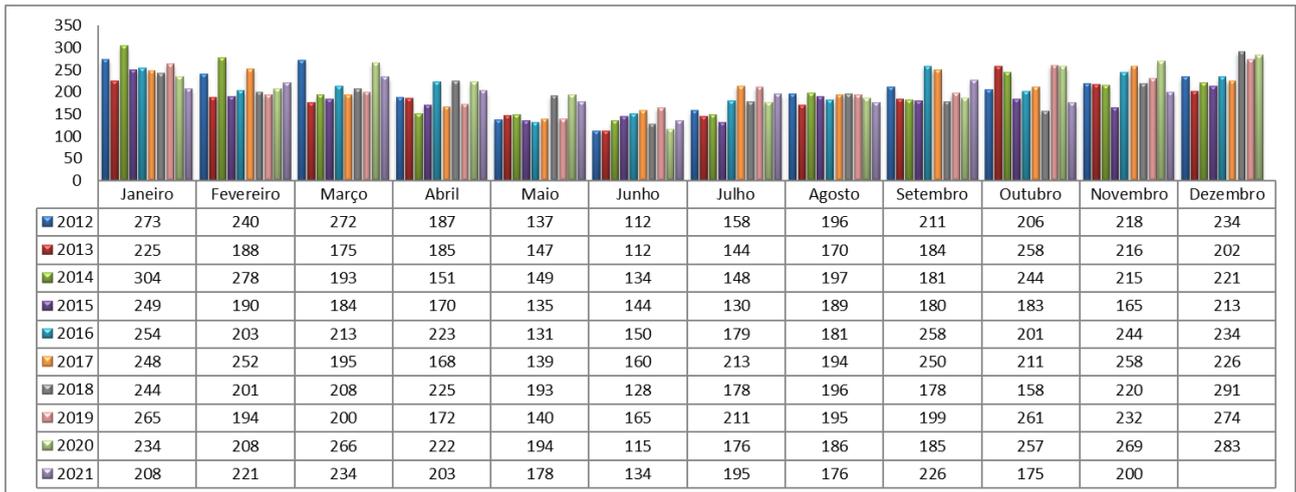


Figura 5 - Geração de energia elétrica [kWh/mês].

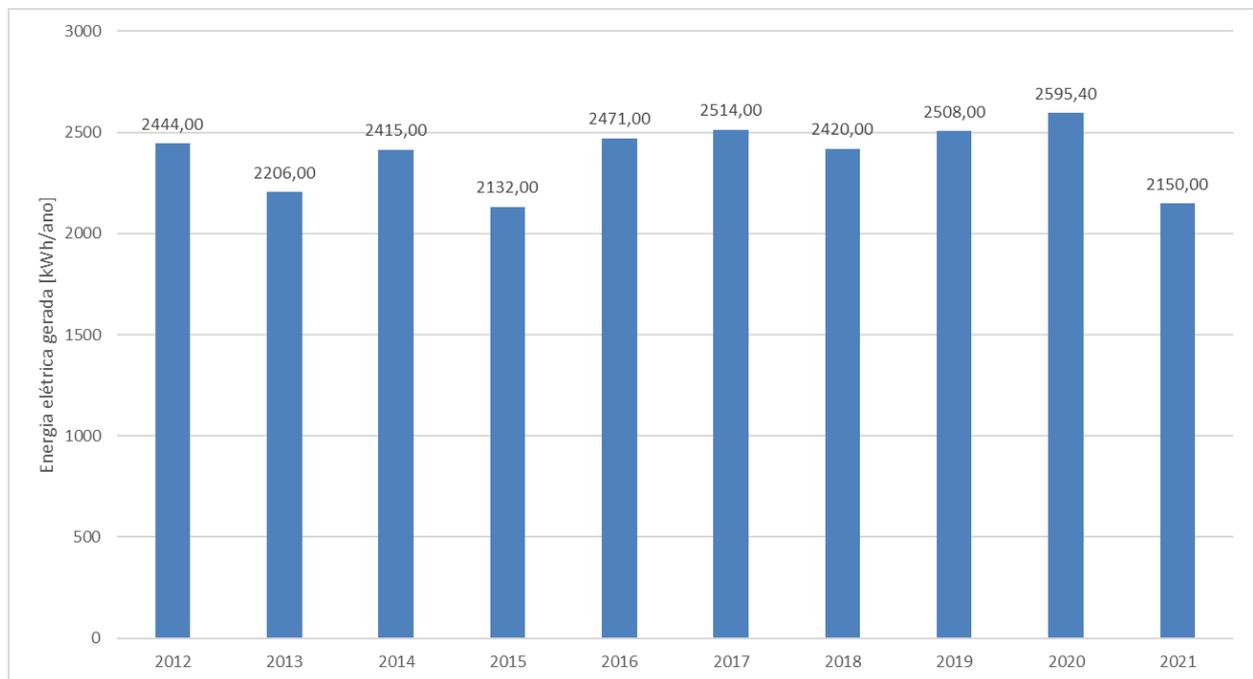


Figura 6 - Geração de energia elétrica total anual [kWh/ano].

A maior geração foi registrada no mês de janeiro de 2014 (304 kWh/mês) e as menores no mês de junho dos anos 2012 e 2013 (112 kWh/mês). Considerando as gerações totais anuais, 2020 teve a maior geração ultrapassando 2.595 kWh/ano, e 2015 foi o ano com menor geração na década com 2.132 kWh/mês.

Tanto os valores de irradiação incidente, quanto os de energia gerada serviram de base para o cálculo dos índices de mérito do sistema FV. A irradiação é utilizada para calcular a taxa de desempenho, e a energia gerada para calcular o fator de capacidade e a produtividade.

3.3 Índices de mérito

Para que seja possível realizar a análise do desempenho de um SFVCR de forma independente do comportamento das condições ambientes onde ele está instalado são utilizados três índices de mérito, o Fator de Capacidade (FC), a Produtividade (YF) e a Taxa de Desempenho (PR) (Urbanetz, 2013).

Fator de Capacidade. O Fator de Capacidade, calculado através da Eq. (1) a seguir, é utilizado para avaliar a capacidade real de geração de energia do sistema em função do que ele seria capaz de produzir se trabalhasse de forma ideal durante 24 horas por dia e é expresso em porcentagem (Urbanetz, 2014a). A Fig. 7 apresenta os valores do Fator

de Capacidade de todos os meses entre os anos 2012 e 2021 e Fig. 8 o gráfico com os fatores de capacidades médio de cada ano.

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada [kWh]}}{\text{Potência nominal [kWp]} * 24 [\text{h}] * \text{dias}} \quad (1)$$

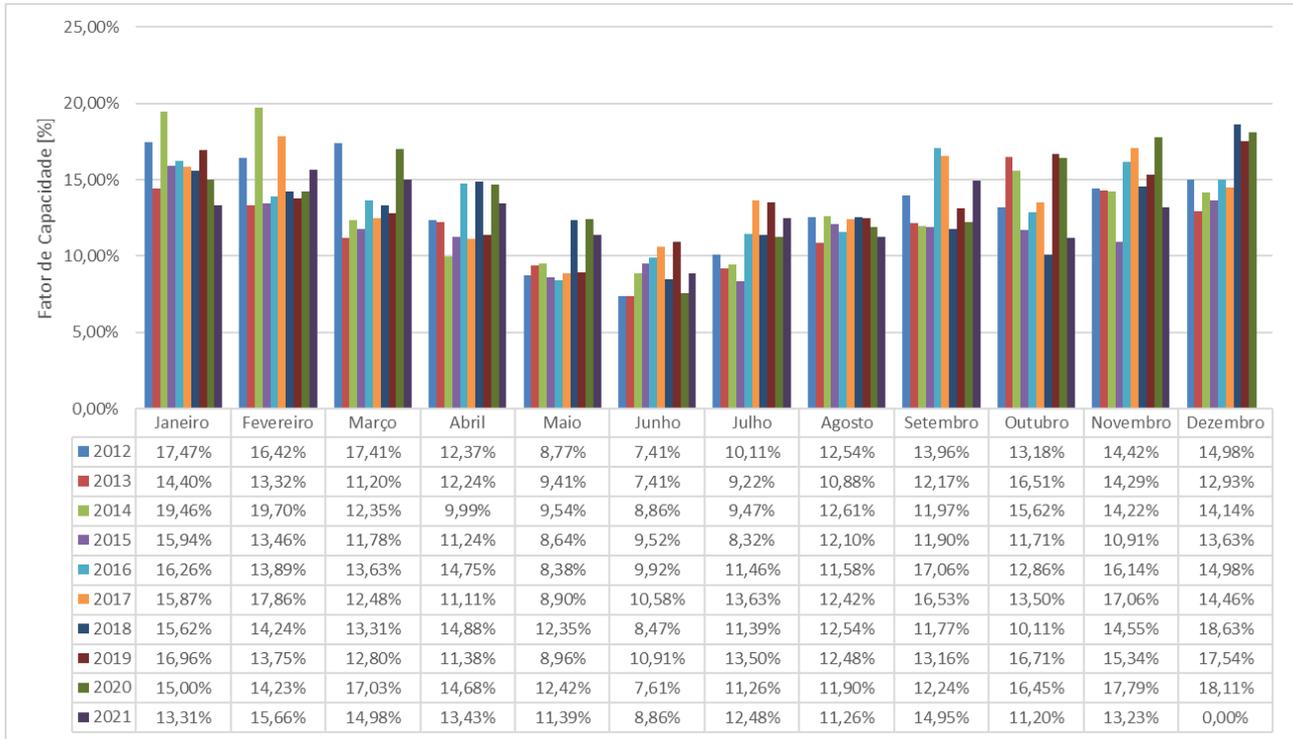


Figura 7 - Fator de capacidade [%].

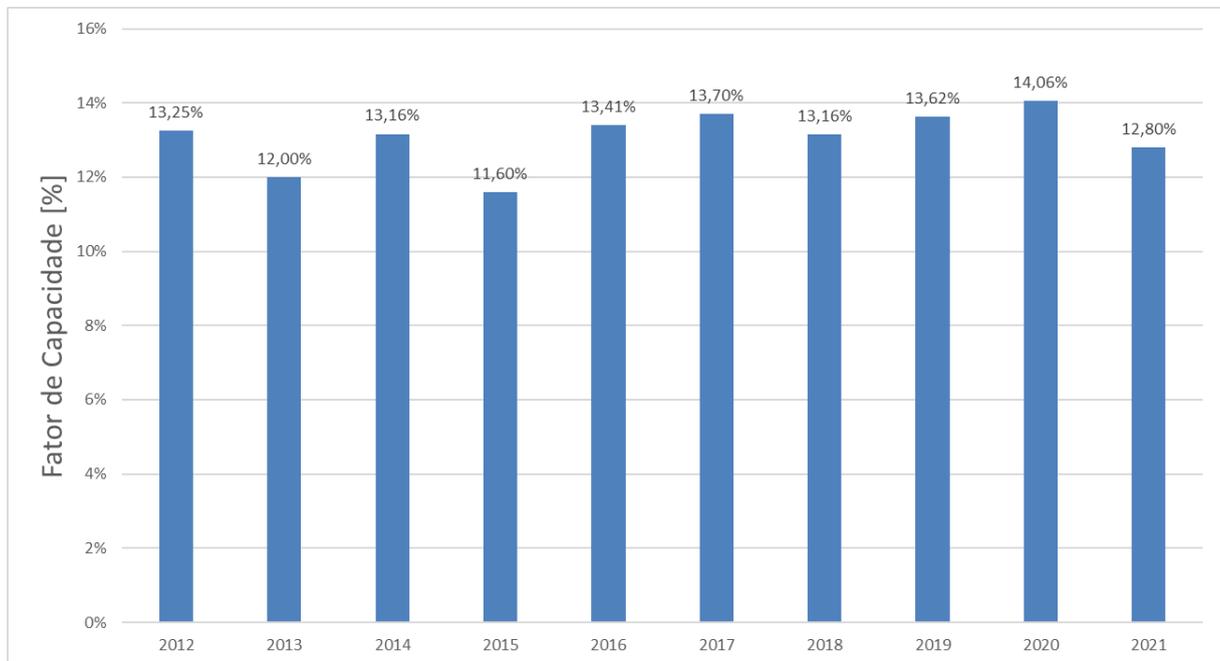


Figura 8 - Fator de capacidade médio anual [%].

O maior valor para o fator de capacidade foi em fevereiro de 2014 (19,70%), enquanto a menor foi no mês de junho nos anos 2012 e 2013. O ano de 2020 registrou a maior produtividade média anual dentre os dez anos, com 14,06%.

Produtividade. A Produtividade, ou *final yield*, é a relação entre a energia gerada e a potência instalada do sistema (Urbanetz, 2015). Este índice pode ser obtido pela Eq. (2) a seguir e tem o seu valor em [kWh/kWp].

$$YF = \frac{\text{Energia Gerada [kWh]}}{\text{Potência nominal [kWp]}} \quad (2)$$

A Fig. 9 apresenta os valores de produtividade de todos os meses entre os anos 2012 e 2021, enquanto a Fig. 10 apresenta o gráfico com as médias anuais de cada um dos dez anos de operação.

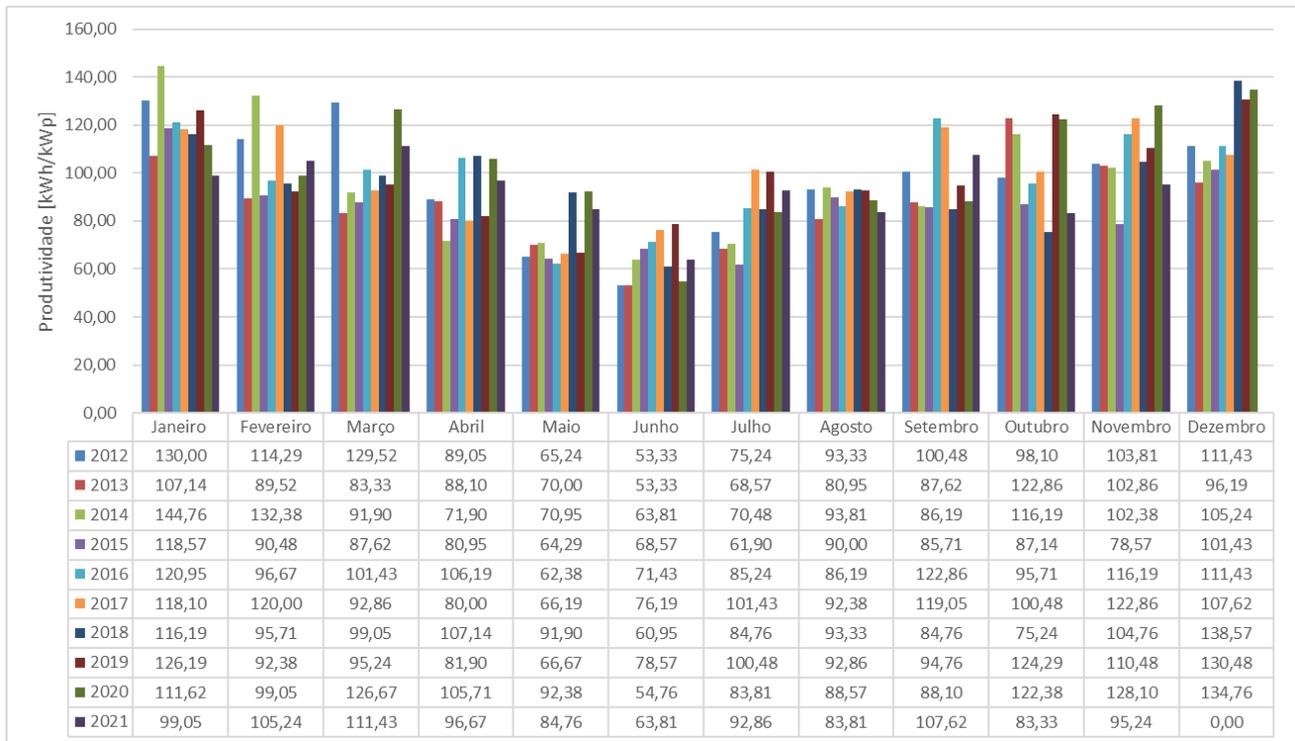


Figura 9 - Produtividade (yield) [kWh/kWp].

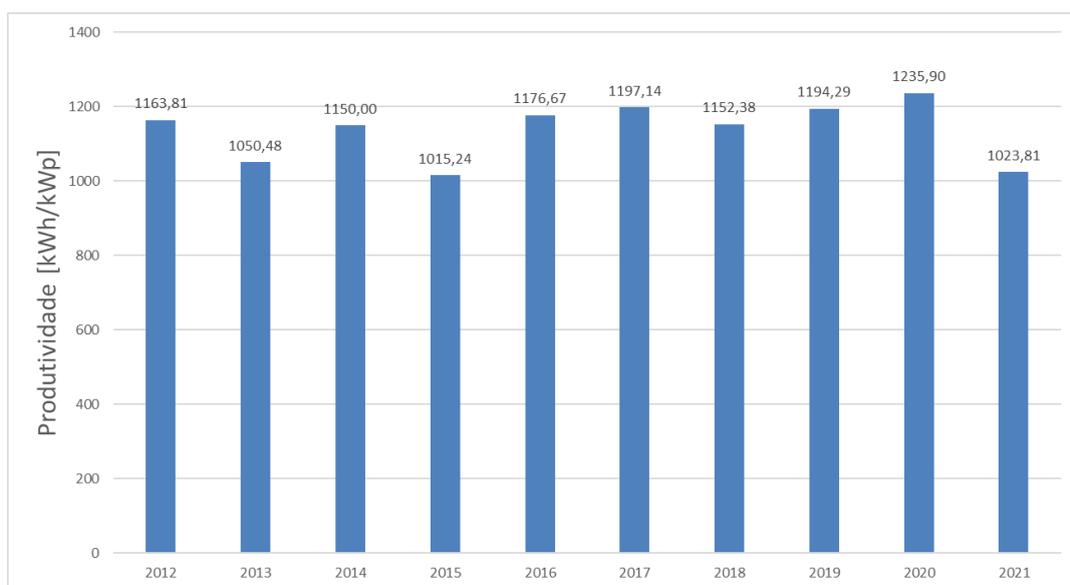


Figura 10 - Produtividade (yield) total anual [kWh/kWp].

A maior produtividade foi em dezembro de 2018 (138,57 kWh/kWp), enquanto a menor foi no mês de junho nos anos 2012 e 2013. O ano de 2020 registou a maior produtividade total anual, de 1235,9 kWh/kWp, um aumento de mais de 6% se comparado com o primeiro ano de operação (2012) do sistema FV que foi de 1163,81 kWh/kWp.

As menores produtividades são nos meses de inverno, em função da menor incidência solar. Analisando o primeiro mês cheio de inverno, julho, os anos de 2017 e 2019 apresentaram produtividade de 101,43 kWh/kWp e 100,48 kWh/kWp, respectivamente. Os valores são acima da média para o mês de julho ao longo dos 10 anos (82,45 kWh/kWp) devido às limpezas que foram realizadas no painel FV neste mês nos respectivos anos.

Taxa de Desempenho. A Taxa de Desempenho, ou *performance ratio*, é a relação entre a produtividade e a energia solar disponível na superfície do painel fotovoltaico (Urbanetz, 2018). Este índice considera perdas provenientes de fatores como a sujidade, o que é importante considerando que os módulos possuem uma baixa inclinação e estão localizados próximos a uma avenida com alto tráfego de veículos (Urbanetz, 2014b). Ele é calculado pela Eq. (3) e é expresso em porcentagem. A Fig. 11 apresenta os valores da Taxa de Desempenho de todos os meses entre os anos 2012 e 2021.

$$PR = \frac{YF}{\text{Irradiação [kWh/m}^2\text{]} / 1 [\text{kWh/m}^2\text{]}} \quad (3)$$

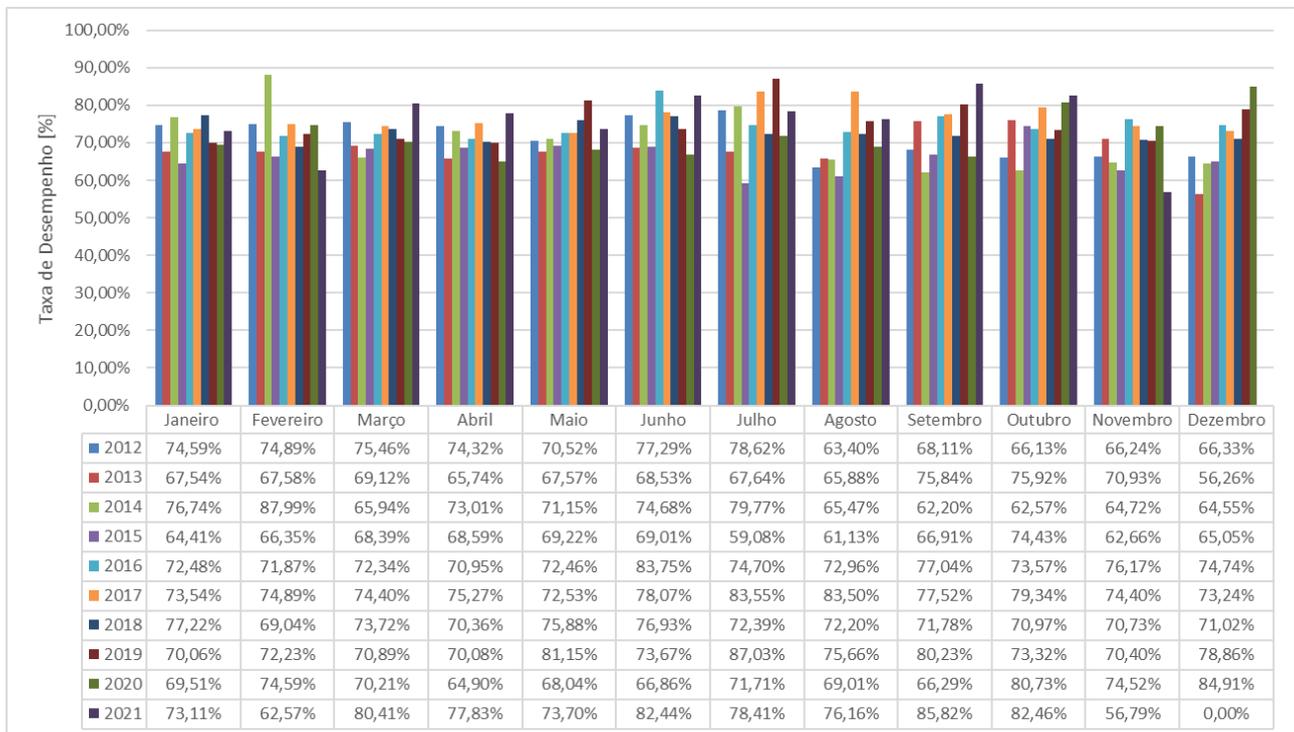


Figura 11 - Taxa de desempenho (performance ratio) [%].

Devido a baixa inclinação do painel deste SFVCR a limpeza dos módulos é um fator importante para garantir o bom desempenho do sistema. É possível perceber a importância deste fator ao observar o grande aumento no PR entre agosto e setembro de 2013, visto que a primeira limpeza dos módulos desde o começo de sua operação foi realizada no último dia de agosto de 2013 (Bittencourt, 2013). Outras datas em que foram realizadas as limpezas dos módulos foram: no final de setembro de 2015, no começo de setembro de 2016, no final de julho de 2017, no final de abril de 2019 e no começo de julho de 2019.

O gráfico da Fig. 12 apresenta as porcentagens médias anuais da performance ratio do sistema.

- BEN - Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2021.
- BITTENCOURT, Cezinando; BASSACO, Rafael L. T.; “Estudo do Desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede: Estudo de Caso – Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2013.
- BOYLE, G., 2004. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, Oxford University, New York.
- CREMASCO, N. P. ; LELUDAK, J. A. ; URBANETZ JUNIOR, J. Study of the Nebulosity Influence in Photovoltaic System Installed in the Green Office of UTFPR. In: 18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ20), 2020, Granada. ICREPQ20. Granada, 2020, v. 18.
- INMET. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/>. Acessado em 2021.
- KRASNHAK, LARISSA BARBOSA; MELLO, ELIS ALMEIDA MEDEIROS DE; JUNIOR, JAIR URBANETZ; Junior, Eloy Casagrande. Edificação de energia positiva: análise de geração e consumo de energia elétrica no escritório verde da utfpr em curitiba. Energia solar e eólica. 1ed.: Antonella Carvalho de Oliveira, 2019, v. , p. 410-421.
- MELLO, E. A. M.; KRASNHAK, L. B.; URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. Edificação de energia positiva: análise de geração e consumo de energia elétrica no escritório verde da UTFPR em Curitiba. In: Conferência Internacional de Energias Inteligentes? Smart Energy CIEI&EXPO 2018, 2018, Curitiba. Smart Energy 2018, 2018.
- REN21. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2021.
- 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.
- TAKEUCHI, R. O. A.; CREMASCO, N. P.; URBANETZ JUNIOR, JAIR. Análise da Degradação Induzida pelo Potencial em Módulos Fotovoltaicos Instalados na UTFPR Câmpus Curitiba. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. VIII CBENS, 2020.
- TONOLO, E. A.; MARIANO, J. D. A.; NEVES, C. E. T. ; SILVA, A. P. M.; URBANETZ JUNIOR, J.. Estudo da redução do desempenho devido ao efeito da sujeira nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR - câmpus Curitiba. In: SMART ENERGY - Conferência Internacional de Energias Inteligentes, 2017, Curitiba. Smart Energy, 2017.
- TONOLO, E. A. ; MARIANO, J. D. A. ; URBANETZ JUNIOR, J.. Análise do Efeito do Acúmulo de Sujeira nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR Câmpus Curitiba. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado. VII CBENS, 2018.
- TONOLO, E. A.; URBANETZ JUNIOR, JAIR. Análise de Perdas por Degradação e Descasamento de Módulos em um Sistema Fotovoltaico da UTFPR Campus Curitiba. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. VIII CBENS, 2020.
- TORTELLI, Carla. O Efeito do Sombreamento na Eficiência do Sistema Fotovoltaico do Escritório Verde da UTFPR. Monografia (Especialização em Construções Sustentáveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- UFRGS, “Programa RADIASOL”, Laboratório de Energia Solar, 2021.
- URBANETZ JUNIOR, 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.
- URBANETZ JUNIOR, J.; TIEPOLO, G. M.; FUSANO, R. H.; CANCEGLIERI JUNIOR, O.. Análise do Desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR. In: XXX International Sodebras Congress, 2012, Curitiba. SODEBRAS, 2012.
- URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR. In: Rodrigo Eduardo Catai; Cezar Augusto Romano; Luiza Helena Fernandes. (Org.). Prospectos Contemporâneos em Engenharia Civil. 1ed.Florianópolis: Pandion, 2013, v. , p. 77-100.
- URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; TIEPOLO, G. M.. Análise do Desempenho de Dois Anos de Operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. V CBENS, 2014.
- URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; TIEPOLO, G. M.. Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR. In: IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2014, Florianópolis. IX CBPE, 2014.
- URBANETZ JUNIOR, J.; MARIANO, J. D. A.; CAMPOS, H. M.; TONIN, F. S.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; TIEPOLO, G. M.. Acompanhamento e Análise de Três Anos de Operação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica da UTFPR. Revista SODEBRAS, v. 10, p. 41-45, 2015.
- URBANETZ JUNIOR, JAIR; TONIN, FABIANNA STUMPF; MARIANO, JULIANA D?ANGELA; TIEPOLO, GERSON MÁXIMO. Analysis of the Operation of Photovoltaic Systems Installed at Federal University of Technology - Paraná in Curitiba. BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY (ONLINE) **JCR**, v. 61, p. 2018000600, 2018.

YANG, RENATA LAUTERT; TIEPOLO, GERSON MÁXIMO; TONOLO, ÉDWIN AUGUSTO; URBANETZ JUNIOR, JAIR ; SOUZA, MURIELE BESTER DE. Photovoltaic Cell Temperature Estimation for a Grid-Connect Photovoltaic Systems in Curitiba. BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY (ONLINE) **JCR**, v. 62, p. 1, 2019.

TEN YEARS OF OPERATION OF THE ON-GRID OF THE GREEN OFFICE OF UTFPR IN CURITIBA/PR

Abstract. *This article presents an analysis of the performance of ten years of operation of the Grid-Connected Photovoltaic Systems (Grid-Connected) of the Green Office (GO) of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR). The Grid-Connected can be integrated into the building, not requiring an additional area, as they are installed on the roof, which allows for wide application in the urban environment as electricity generators at the point of consumption. They have high reliability and operate cleanly and quietly. The UTFPR GO is the first sustainable academic building in Brazil, with 150 m² of built area and diverse sustainability in partnership with more than sixty companies. The photovoltaic system adopted in the EV has a power of 2.10 kWp as the main line to provide energy for the building, together with the utility's electrical system. Over these ten years of operation of the Grid-Connected, the generation of energy equivalent to 23.66 MWh, with an average Capacity Factor close to 13%; Average annual yield of just over 1,042 kWh / kWp; and an average performance index of 72.28%, indices that confirm the effectiveness of this type of installation.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Grid Connected Photovoltaic Systems, Merit Indices.*