

ESTUDO DO POTENCIAL DA MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA A PARTIR DOS SFVCR INSTALADOS NA UTFPR - CÂMPUS CURITIBA

*Camila de Oliveira Silveira*¹, *Larissa Barbosa Krasnhak*², *Édwin Augusto Tonolo*³, *Jair Urbanetz Junior*⁴

¹ PPGSE, UTFPR, Curitiba, Brasil, camila.osilveira@hotmail.com

² PPGEC, UTFPR, Curitiba, Brasil, larissabarbosakrasnhak@gmail.com

³ PPGSE, UTFPR, Curitiba, Brasil, edwintonolo@gmail.com

⁴ PPGSE, PPGEC, UTFPR, Curitiba, Brasil, urbanetz@utfpr.edu.br

RESUMO:

A humanidade está cada vez mais dependente da energia, cuja demanda cresce a cada ano. Fontes de energia renováveis são alternativas consolidadas no mercado, antes instaladas em pequena escala, mas agora já pensada como grandes usinas. O correto funcionamento, aproveitando ao máximo o potencial de geração, depende de estudos do local de implantação, como níveis de irradiação, temperatura, latitude, etc. Foram estudados dois sistemas fotovoltaicos instalados na cidade de Curitiba, a fim de acompanhar seus respectivos desempenhos.

Palavras chave: sistema fotovoltaico, capacidade instalada, geração de energia, índices de mérito.

1. INTRODUÇÃO

A constante preocupação com a preservação do meio ambiente aliada a busca pela diversificação da matriz elétrica e o crescente aumento da demanda por energia, impulsionou a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a fonte solar. O Brasil possui expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir da energia solar, contando com níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha [1].

Visando explorar o potencial de energia solar, a Resolução Normativa 482 de 2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, por meio da compensação de energia elétrica [2]. Em 2015 foi lançada a Resolução Normativa 687, atualização da norma anterior. Denominou-se microgeração distribuída qualquer central geradora com potência instalada de até 75 kWp, e minigeração, aquela com potência acima de 75 kWp e menor ou igual a 5 MWp. Caso a geração de energia elétrica seja maior que o consumo, a unidade consumidora ficará com créditos de energia com um prazo de 60 meses de

validade. Implantou-se também a modalidade de autoconsumo remoto, onde um consumidor pode abater o valor do consumo em outra unidade consumidora, desde que seja atendida pela mesma distribuidora [3].

De acordo com o Gráfico 1, a região sudeste se destaca com a maior porcentagem da potência instalada, seguido da região sul. Ambas, juntas, representam quase 70% da potência instalada no Brasil. Analisando a região sul, o estado do Paraná ocupa a última posição. Este fato pode ser explicado pela não isenção do ICMS no Paraná até então.

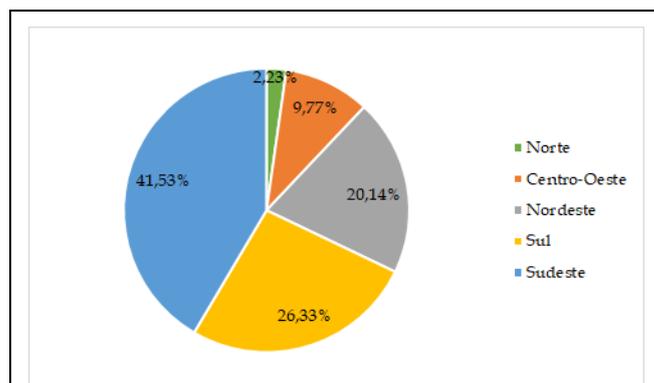


Gráfico 1. Potência instalada por região do Brasil.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na referência [4]

Na análise a nível nacional, o estado de Minas Gerais se destaca como o maior em potência instalada, com aproximadamente 75 MWp, enquanto o segundo colocado, o Rio Grande do Sul, detém aproximadamente 48 MWp. São Paulo, Santa Catarina, Paraná, Ceará, Rio de Janeiro, Goiás, Bahia e Pernambuco completam a lista com os 10 estados de maior potência instalada.

Até o início de agosto de 2018, mais de 35 mil unidades consumidoras com geração distribuída fotovoltaica constavam nos registros da ANEEL, com aproximadamente 330 MWp de potência instalada [4]. Em 2026, estimam-se cerca de 770 mil adotantes de sistemas fotovoltaicos sob o regime da Resolução 482, totalizando 3,3 GWp, suficiente para atender 0,6% do consumo total nacional [5].

O Gráfico 2 apresenta a capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica na cidade de Curitiba, quase 1,9 MWp até julho de 2018. É possível observar a existência de SFVCR (Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica) antes da Resolução 482 de 2012, correspondente ao Escritório Verde (EV), primeiro SFVCR instalado no Paraná na área de concessão da COPEL (Companhia Paranaense de Energia) [6].

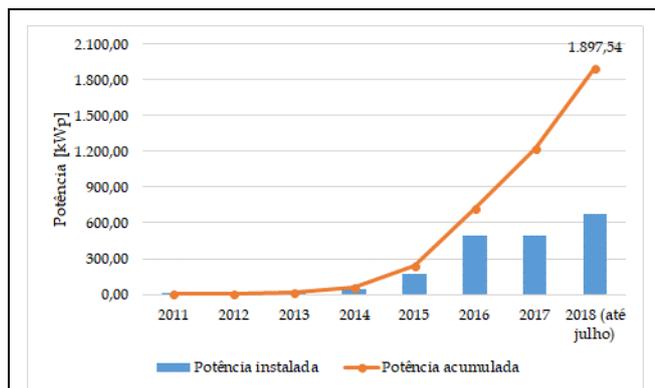


Gráfico 2. Potência instalada e acumulada em Curitiba

Fonte: Elaborado pelos autores com base na referência [4]

2. OBJETIVOS

Acompanhar a capacidade instalada de microgeração e minigeração fotovoltaica em Curitiba e estudar a sua contribuição no cenário nacional por meio dos índices de mérito, índices de irradiação e geração de energia de dois SFVCR instalados na UTFPR.

3. MÉTODOS

3.1. Descrição dos Sistemas

A UTFPR possui dois SFVCR, ambos localizados no Câmpus Curitiba. Um deles está instalado na Sede Centro, na cobertura do Escritório Verde e entrou em operação em dezembro de 2011, anterior à Resolução nº 482/2012 da ANEEL, sendo o primeiro SFVCR do Paraná. Com um inversor monofásico em 220V de 2 kW de potência nominal e uma potência instalada de 2,1 kWp, ocupa uma área de 15 m², acompanha a inclinação do telhado (15°) e possui desvio azimutal de 22° oeste em relação ao norte. O outro sistema entrou em operação em fevereiro de 2016 e está instalado na Sede Neville, possui um inversor trifásico sem transformador em 380V, de alto rendimento com potência nominal de 10 kW e potência instalada de 10,2 kWp, com inclinação de 25° e orientado para o norte [7].

3.2. Irradiação Solar

As médias anuais do total diário da irradiação solar são relativamente altas no Brasil e, apesar do extenso território com diferentes características climáticas, apresenta certa uniformidade na média anual de irradiação global, conforme ilustra a Figura 1.

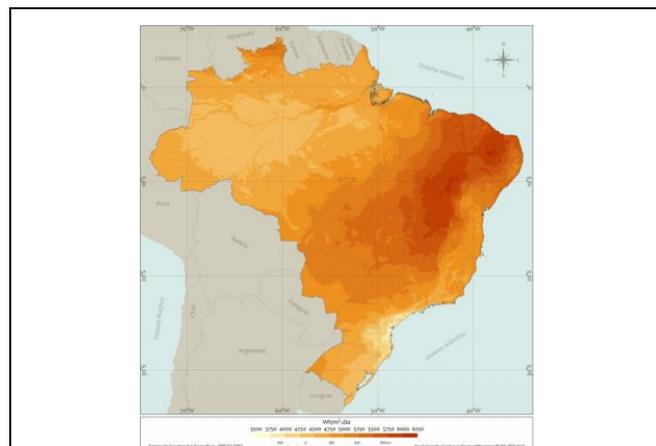


Figura 1. Total diário da irradiação global média anual

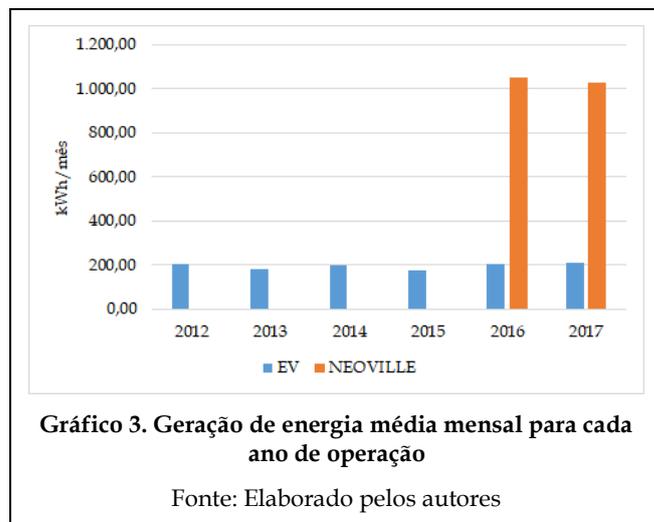
Fonte: [8]

A região Nordeste apresenta a maior média anual do total diário de irradiação global horizontal (5,483 kWh/m²), seguida pelas regiões Centro-Oeste (5,082 kWh/m²) e Sudeste (4,951 kWh/m²). A região Norte possui índice igual a 4,825 kWh/m² e, por fim, a região Sul com irradiação de 4,444 kWh/m² [8].

O estado do Paraná, apesar de pertencer à região com menor média anual de irradiação global, apresenta média total anual de irradiação global horizontal de 1.705 kWh/m².ano e os maiores valores diários são durante o verão (5,88 kWh/m².ano) e a primavera (5,10 kWh/m².ano). Os menores valores são durante o inverno (3,47 kWh/m².ano) e o outono (4,25 kWh/m².ano). Dentre as mesorregiões pertencentes ao Estado do Paraná, Curitiba está inserida na Metropolitana de Curitiba, que apresenta média do total anual de irradiação global horizontal igual a 1.492 kWh/m².ano, irradiação direta normal de 1.105 kWh/m².ano, irradiação difusa de 736 kWh/m².ano e irradiação inclinada na latitude igual a 1.565 kWh/m².ano [8].

3.3. Análise Operacional

Para a análise operacional dos sistemas foi necessário coletar os dados de geração de energia, os quais são disponibilizados mensalmente a partir da memória de massa dos seus respectivos inversores. Os dados apresentados no Gráfico 3 são referentes ao período em que os dois sistemas se encontram em operação. Em uma análise anual, pode-se perceber que a energia gerada no Neville é no mínimo cinco vezes superior quando comparada à do EV.



Considerando a média de produção de energia elétrica de cada sistema, o EV gerou 2.364 kWh/ano no período de 2012 a 2017, enquanto o Neville produziu 12.491 kWh/ano ao longo de 2016 e 2017. Em uma análise mensal, verifica-se que os meses com maior e menor geração de energia se concentram nas estações de verão e inverno, respectivamente, fato que se justifica pela variação da incidência solar nestas épocas do ano, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Geração máxima e mínima de energia dos SFVCR EV e Neville

| | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| Geração mínima | EV | Junho (112 kWh) | Junho (112 kWh) | Junho (133 kWh) | Julho (130 kWh) | Mai (131 kWh) | Mai (139 kWh) |
| | Neoville | - | - | - | - | Agosto (775 kWh) | Julho (753 kWh) |
| Geração máxima | EV | Janeiro (273 kWh) | Outubro (258 kWh) | Janeiro (304 kWh) | Janeiro (249 kWh) | Setembro (258 kWh) | Novembro (258 kWh) |
| | Neoville | - | - | - | - | Abril (1.329 kWh) | Setembro (1.347 kWh) |

Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS

A fim de avaliar o desempenho dos sistemas EV e Neville, adotaram-se os índices de mérito, os quais permitem a comparação de SFVCR instalados em localidades distintas através dos índices de irradiação no plano do painel fotovoltaico e a energia produzida pelo sistema com base na sua potência instalada. Essa análise apresenta um histórico de desempenho anual e é complementar aos estudos realizados por [9], além de confrontá-los com outros SFVCR em operação no país.

4.1. Fator de Capacidade

O Fator de Capacidade (FC) de um SFVCR, indicado na Equação 1, representa a razão entre a energia de fato gerada pelo sistema e a energia que poderia ser gerada caso o sistema operasse 100% do tempo na sua potência nominal em um determinado período, geralmente um ano, ou seja, 8.760 horas [10].

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência} \cdot \text{Tempo}} [\%] \quad (1)$$

Os fatores de capacidade dos sistemas são calculados mensalmente e o Gráfico 4 apresenta as médias anuais deste índice para o EV e o Neville, referente aos anos em que ambos se encontram em operação.

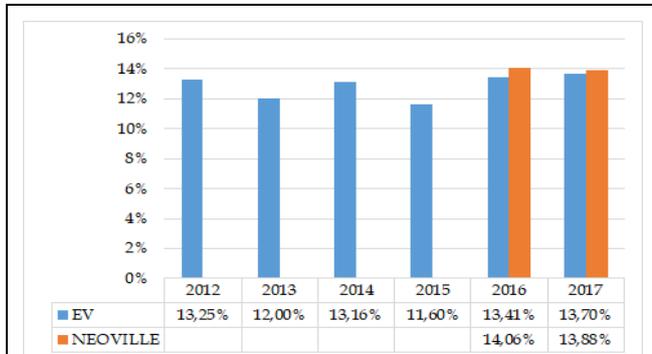


Gráfico 4. Médias anuais de FC para EV e Neville

Fonte: Elaborado pelos autores

Em seis anos de operação, o EV apresentou um FC médio de 12,85%. Para o Neville, a média foi de 13,97%, considerando os anos de 2016 e 2017.

4.2. Produtividade

A Produtividade, ou *Final Yield* (YF), de um SFVCR pode ser calculada conforme a Equação 2 e estabelece a relação entre a energia gerada, em kWh, por cada kWp de potência instalada do sistema [10].

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

As produtividades dos sistemas são calculadas mensalmente e o Gráfico 5 apresenta os resultados anuais deste índice para o EV e o Neville, referente aos anos em que ambos se encontram em operação.

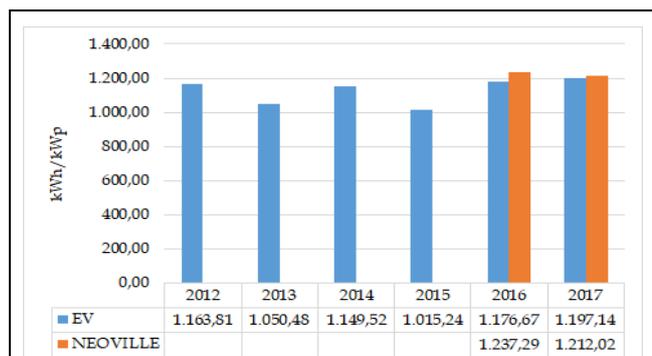


Gráfico 5. Resultados anuais de YF para EV e Neville

Fonte: Elaborado pelos autores

Em seis anos de operação, o EV apresentou uma YF média de 1.125,48 kWh/kWp. Para o Neville, a média foi de 1.224,66 kWh/kWp, considerando os anos de 2016 e 2017.

4.3. Taxa de Desempenho

A Taxa de Desempenho, ou *Performance Ratio* (PR), de um SFVCR corresponde à capacidade do sistema converter a energia solar disponível sobre o plano dos painéis fotovoltaicos em energia elétrica, considerando as perdas ocorridas neste processo de conversão de energia [10]. Este índice é expresso em porcentagem, conforme a Equação 3.

$$PR = \frac{YF}{\text{Irradiação}/1000} [\%] \quad (3)$$

As taxas de desempenho dos sistemas são calculadas mensalmente e o Gráfico 6 apresenta as médias anuais deste índice para o EV e o Neville, referente aos anos em que ambos se encontram em operação.

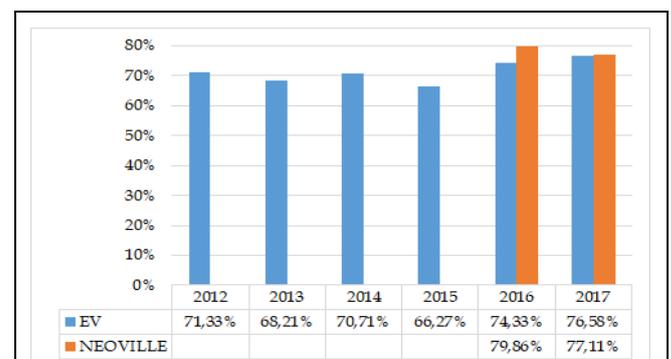


Gráfico 6. Médias anuais de PR para EV e Neville

Fonte: Elaborado pelos autores

Em seis anos de operação, o EV apresentou uma PR média de 71,24%. Para o Neville, a média foi de 78,48%, considerando os anos de 2016 e 2017.

5. DISCUSSÃO

O fator de capacidade esperado no Brasil compreende as porcentagens entre 13% e 18%, variando de acordo com a disponibilidade do recurso solar, da tecnologia empregada no sistema fotovoltaico e do dimensionamento adotado [10]. Existe uma diferença significativa dos índices que avaliam a performance de um SFVCR dependendo da região do Brasil. As estimativas dos fatores de capacidade e das

produtividades para cada região do país estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. FC e YF esperados para cada região do país

| Região | Fator de Capacidade [%] | Produtividade [kWh/kWp] |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Norte | 17,1 | 1.500 |
| Nordeste | 18,1 | 1.580 |
| Centro-Oeste | 16,6 | 1.460 |
| Sudeste | 14,8 | 1.300 |
| Sul | 14,2 | 1.250 |

Fonte: Elaborado pelos autores com base na referência [11]

A diferença de estimativas é justificada pela variação da incidência solar no território brasileiro, onde a região Nordeste apresenta o maior potencial solar, viabilizando a geração de energia por tecnologia fotovoltaica [8]. Foram considerados alguns estudos de caso, um em cada região do país, com o intuito de verificar se os índices de mérito dos SFVCR estão dentro do esperado conforme as suas localidades de instalação. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros de avaliação de desempenho de tais sistemas, todos instalados com módulos policristalinos, a fim de confrontá-los com os resultados obtidos dos SFVCR instalados na UTFPR Câmpus Curitiba.

Tabela 3. Parâmetros de avaliação de SFVCR instalados em diferentes localidades

| Região | Estado | Sistema | Potência instalada [kWp] | Fator de Capacidade [%] | Produtividade [kWh/kWp] | Taxa de Desempenho [%] |
|--------------|--------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Norte | PA | Belém (UFPA) | 2,4 | 20,98 | 1.838 | 74,3 |
| Nordeste | PI | Florianópolis (IFPI) | 171,6 | 17,13 | 1.493 | 74,0 |
| Centro-Oeste | MT | Itiquira | 9 | 17,2 | 1.514 | 74,9 |
| Sudeste | SP | São Paulo (IFSP) | 70 | 13,9 | 1.115 | 65,8 |
| Sul | RS | Aratiba | 9 | 13,8 | 1.214 | 78,7 |

Fonte: Elaborado pelos autores com base nas referências [12], [13], [14] e [15]

Analisando a Tabela 3, pode-se perceber que os resultados referentes ao fator de capacidade e a produtividade estão adequados quando comparados aos índices esperados para cada região do país. As diferenças que ocorrem podem ser justificadas pelas condições de instalação, eficiência dos inversores e pela própria natureza do recurso solar, o qual sofre variações climáticas significativas ao longo do dia, como a presença de nebulosidade, fazendo com que um SFVCR seja capaz de operar em sua potência nominal durante poucas horas [16]. Os resultados da UTFPR Câmpus Curitiba também contribuem para a afirmação dessa discussão, pois apontam fatores de capacidade que variam de 11,60% a 14,06%, e produtividades entre 1.015,24 kWh/kWp e 1.237,29 kWh/kWp. Ambos os índices destes dois SFVCR indicam que as suas operações ocorrem dentro da expectativa, uma vez que o fator de capacidade esperado em Curitiba é de 12,1% [17] e o total anual da produtividade no plano inclinado da latitude compreende a faixa de 1.125 kWh/kWp a 1.200 kWh/kWp [18]. Em relação à taxa de desempenho, o valor de 75% é o mais adotado para efeitos de projeto, sendo utilizado internacionalmente na elaboração de mapas fotovoltaicos [18]. As médias dos SFVCR da UTFPR, bem como as encontradas na Tabela 3, podem ser consideradas adequadas, pois

compreendem valores entre 70 e 80%, exceto a micro usina localizada em São Paulo, que apresentou um valor inferior à média padrão.

6. CONCLUSÃO

A crescente evolução da capacidade instalada por central geradora fotovoltaica no Brasil indica que os SFVCR podem ser amplamente instalados em edificações como opção para produzir eletricidade. No cenário de microgeração e minigeração, o sistema de compensação de energia elétrica garante vantagens ao proprietário da unidade consumidora desde que a Resolução Normativa nº 482 entrou em vigor.

Embora o maior potencial solar para geração de energia fotovoltaica esteja concentrado em regiões onde os índices de irradiação são elevados, o mercado de geração distribuída com fonte solar tem uma representatividade maior em regiões brasileiras que apresentam grande desenvolvimento econômico, como sul e sudeste. Diante do crescimento da energia fotovoltaica gerada a partir de SFVCR em Curitiba, o acompanhamento dos sistemas implantados na UTFPR torna-se relevante à medida que os dados coletados são atualizados a fim de aumentar a confiabilidade do

estudo e manter um histórico desde o início do seu respectivo funcionamento.

Na análise dos índices de mérito, pode-se perceber que o índice de irradiação no local de instalação, as inclinações dos módulos e orientações azimutais têm interferência no recurso solar disponível para os sistemas, ou seja, o plano do painel e a orientação geográfica onde o SFVCR está localizado refletem na sua produtividade final. Além destas justificativas, a tecnologia do inversor e os índices de sombreamento e sujidade são fundamentais na comparação de desempenho entre os SFVCR analisados, em que o Neoville apresenta condições ótimas de instalação, como melhor orientação ao norte geográfico e inclinação dos painéis fotovoltaicos equivalente à da latitude do local.

7. REFERÊNCIAS

- [1] NASCIMENTO, R. L. Energia Solar no Brasil: Situação e perspectivas, Estudo Técnico, 2017.
- [2] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, 2012, [Online]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> [Acesso em: 09 de agosto de 2018].
- [3] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 687, 2015, [Online]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> [Acesso em: 09 de agosto de 2018].
- [4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Unidades Consumidoras com Geração distribuída, 2018, [Online]. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808 [Acesso em: 09 de agosto de 2018].
- [5] MME - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, Brasília, 2017.
- [6] URBANETZ JR, J.; CHINVELSKI, T.; SIMÃO, C. A. F.; MAKISHI, L. M. M. Primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Homologado pela Copel, V CBENS, Recife, 2014.
- [7] 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, X CBPE, Gramado, 2016.
- [8] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; VIROTINO PEREIRA, S.; SOUZA, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2. Ed, São José dos Campos, INPE, 2017.
- [9] SILVEIRA, C. O.; MOREIRA, A. R.; MOREIRA, B. L. P.; URBANETZ JR, J. Estudo de Viabilidade da Geração Distribuída por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba. Anais da IV Conferência Internacional de Energias Inteligentes - Smart Energy CIEI&EXPO, 1. Ed, Curitiba, 2017.
- [10] BENEDITO, R. S. Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório, Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.
- [11] QUAGLIA, R. B. Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: cenários para o setor elétrico brasileiro, Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 2010.
- [12] RAIMO, P. A.; SOBREIRA, R. L.; BUENO, E. A. Análise de Desempenho da Usina Fotovoltaica de 70 Kw. Estudo de Caso: Instituto Federal - Campus São Paulo, VII CBENS, Gramado, 2018.
- [13] TELES, M. B.; RODRIGUES, M. J. S.; CAVALCANTE, R. L.; PINHO, J. T.; MACÊDO, N.; OLIVEIRA, L. G. M. Análise do Desempenho de dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica instalados na Região Norte do Brasil, VI CBENS, Belo Horizonte, 2016.
- [14] LIMA, J. B.; GONÇALVES, J. A. Análise Comparativa de Performance entre Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede instalados no Piauí e na Europa através de Índices De Mérito, VII CBENS, Gramado, 2018.
- [15] DOLLA, R. Comparação de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico composto por seis Tecnologias em Clima Tropical e Subtropical, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.
- [16] ALMEIDA, M. P. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.
- [17] NAKABAYASHI, R. K. Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras, Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2014.
- [18] TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, 1. Ed, Curitiba, 2017.