

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE INSTALADOS EM CURITIBA COM DIFERENTES TOPOLOGIAS

Joel Claudiano da Silva – joel.claudiano@gmail.com

Jair Urbanetz Junior

Carlos Eduardo Teixeira das Neves

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGSE

Resumo. A crise hídrica agravada no ano de 2020 evidenciou a dependência do Sistema Interligado Nacional de fontes de geração de energia de alto custo para suprir a demanda de energia elétrica em períodos de escassez hídrica. Os principais fatores para o aumento dos custos de energia elétrica foram o despacho de Geração Térmica e importação de Energia Elétrica da Argentina e Uruguai, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Este cenário promoveu um crescimento exponencial da parcela da matriz energética brasileira composta por Geração Fotovoltaica, tanto para o surgimento de fazendas Solares, quanto de sistemas comerciais ou residenciais. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede instalados na cidade de Curitiba, em locais distintos, com diferentes topologias, com inversores e módulos de diferentes características, com orientações e inclinações diversas, de acordo com a disponibilidade de áreas de telhados em cada local. Foram analisadas as projeções iniciais de geração anual e verificado o resultado obtido ao longo de um ano, buscando o aprimoramento da técnica utilizada por projetistas e integradores de sistemas fotovoltaicos, para obter uma estimativa mais assertiva possível, visando para que o dimensionamento dos sistemas obtenha o melhor resultado para a viabilidade técnica e econômica. Foram analisados os Índices de Mérito, Fator de Capacidade e Performance Ratio de sete sistemas fotovoltaicos instalados, com o objetivo de comprovar os estudos já realizados sobre o potencial de geração de energia em Curitiba, a partir da análise dos dados de geração de energia elétrica destes sistemas e dos dados de irradiação obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A escolha do inversor e o modo de instalação dos painéis fotovoltaicos são fatores determinantes para maximizar o desempenho do sistema fotovoltaico.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Índices de Mérito; Geração Distribuída

1. INTRODUÇÃO

A instalação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede (SFVCR) é a opção mais acessível para o consumidor, quer seja residencial, comercial ou industrial. Não depende de outorga ou outra forma de autorização, sendo um processo simplificado, necessitando de uma solicitação de acesso junto à Distribuidora de Energia Elétrica, de acordo com o que estabelece a REN 482/2012 e a LEI Nº 14.300/2022.

A energia elétrica no Brasil é gerada predominantemente a partir de usinas hidrelétricas, uma das fontes de geração de mais baixo custo, mas de impactos ambientais consideráveis, devido à necessidade da formação de grandes reservatórios de água para movimentar as turbinas dos geradores. Em menor escala no país, outras formas de geração de energia elétrica são utilizadas: usinas térmicas, nucleares e eólicas (Urbanetz, 2010).

O Brasil possui um grande potencial de geração fotovoltaica, comparando com a Alemanha, que é um dos líderes mundiais em sistemas fotovoltaicos instalados, em nosso país no local menos ensolarado é possível gerar mais energia elétrica do que no local mais ensolarado do país europeu. Até o início de setembro de 2019, a capacidade instalada foi de 3,38 GWp, sendo 2,25 GWp como grande centrais geradoras e 1,13 GWp como geração distribuída inserida no sistema de compensação. Esses valores se mostram tímidos quando comparados com países como China, Estados Unidos, Japão e Alemanha, os quais possuem em suas respectivas matrizes elétricas 175 GW, 60 GW, 55 GW e 40 GW, demonstrando que o setor no Brasil ainda pode ser muito explorado (Pereira, 2017) (ANEEL, 2019a) (ANEEL, 2019b) (REN 21, 2019).

Para que um sistema fotovoltaico apresente os resultados esperados são necessários vários estudos no local de instalação, a fim de minimizar as perdas (Tonolo, 2019).

A possibilidade de gerar energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos no entorno das edificações só tem a contribuir com a redução dos problemas inerentes às formas convencionais de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica (Urbanetz, 2010).

A instalação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede é uma opção de livre iniciativa do consumidor e que nos últimos anos estão com preços competitivos, diminuindo gradativamente o custo por kWp instalado ao mesmo tempo em que o custo de energia elétrica sobe consideravelmente devido à crise hídrica, com suas as Bandeiras Tarifárias, a crise do Covid-19, com a Conta Covid administrada pela CCEE. Porém a viabilidade técnica não é possível

para todos os telhados nos centros urbanos, o que traz um desafio para os projetistas em encontrar a melhor solução, calcular as possíveis perdas e determinar o tempo de retorno do investimento, que é um ponto determinante para o fechamento da venda do SFVCR.

Atualmente, o consumidor que instala o sistema fotovoltaico em sua residência, escritório ou indústria injeta o excedente de energia, na rede da Concessionária e esse excedente é contabilizado como crédito de energia com validade de 60 meses (ANEEL, 2015).

Porém, não são todos os telhados que oferecem a área e orientação ideal para a instalação de sistemas fotovoltaicos, sendo muitos considerados inviáveis para a instalação de SFVCR. É possível calcular as perdas e a produtividade mesmo em situações em que não se tenha a melhor condição, porém aproveitando da melhor maneira possível de se instalar o SFVCR para um resultado econômico satisfatório.

Desta forma, esse artigo visa analisar comparativamente sete sistemas instalados a mais de um ano e apresentar os resultados que venham a incentivar a instalação, não só em Curitiba, mas também em outras cidades brasileiras, para contribuir com o crescimento da geração distribuída de energia elétrica e o crescimento da matriz solar fotovoltaica. Para cada sistema foi criada uma estação solarimétrica virtual no Software Radiasol, então foi realizado o cálculo da produtividade na condição ótima, sendo a inclinação de 25° de acordo com a latitude de Curitiba e orientação para o norte e comparado com a inclinação e orientação real de cada local.

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA - SFVCR

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica - SFVCR são caracterizados por estarem interligados diretamente a rede de distribuição das concessionárias de fornecimento de energia elétrica. Basicamente a energia elétrica gerada em corrente contínua pelo painel fotovoltaico é convertida pelo inversor em corrente alternada para a instalação e, pelo fato desse equipamento ser conectado em paralelo com a rede elétrica, ele injeta o excedente de energia gerado e, pelo medidor bidirecional, o qual contabiliza a energia injetada na rede da concessionária elétrica (Urbanetz, 2010). Esses sistemas não possuem elementos para armazenamento de energia elétrica, sendo que durante os momentos que não existe geração de energia elétrica vinda do sistema fotovoltaico, o sistema utiliza a rede da concessionária como fonte de energia.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 11704:2008, intitulada Sistemas Fotovoltaicos – Classificação, os sistemas fotovoltaicos podem ser: Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e Sistema fotovoltaico isolado (SFVI). Os SFVCR constituem o sistema mais encontrado mundialmente, que apresenta reduzida complexidade em relação ao SFVI, que necessita de baterias que podem ser consideradas seu elo frágil, devido aos elevados custos em manutenção.

As principais vantagens do SFVCR são a elevada produtividade, pelo fato de que toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada instantaneamente, quer seja localmente ou pelos outros consumidores conectados a rede de distribuição pública.

O SFVCR é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de acordo com o que estabelece a REN 482/2012 e a Lei 14.300/2022, bem como os impostos envolvidos e o modo de funcionamento do sistema de compensação energética, similar ao sistema conhecido como *net metering*. De modo simplificado, o sistema de compensação transforma a sobra da produção de energia fotovoltaica em créditos (quilowatts-hora, kWh) a serem abatidos do consumo total. Para tanto, utiliza-se um medidor bidirecional, o qual é responsável por registrar a energia injetada na rede elétrica, e a consumida da concessionária, ambas em kWh. E com isso, a produção de energia excedente transforma-se em créditos para uso posterior do cliente. A Fig. 1 exemplifica o SFVCR.

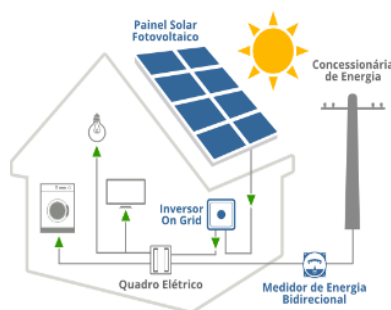


Figura 1. Ilustração de um Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede

3. TECNOLOGIAS EMPREGADAS NOS SFVCR

Os principais equipamentos do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica são: módulo fotovoltaico, inversor e medidor bidirecional. A Fig. 2 mostra esses componentes:



Figura 2. Componentes do Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede

3.1 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é composto pelo conjunto de células fotovoltaicas, no intuito de disponibilizar potências mais elevadas, as células são agrupadas, formando os módulos fotovoltaicos. Por sua vez, os módulos agrupados, formam os painéis ou arranjos fotovoltaicos. Os agrupamentos das células ou dos módulos podem ser efetuados por meio de ligações série, paralelo ou mistas, obtendo-se assim, diferentes valores de corrente e tensão. As conexões em série aumentam a tensão disponibilizada, enquanto que as conexões em paralelo aumentam a corrente do conjunto (Pinho e Galdino, 2014).

Dentre os diversos materiais usados para a fabricação das células fotovoltaicas, destacam-se o silício monocristalino (m-Si), o silício policristalino (p-Si) e os filmes finos, como o silício amorfo (a-Si), o silício microcristalino (μ c-Si), o telureto de cádmio (CdTe), o disseleneto de cobre-índio-gálio (CuInGaSe₂), o disseleneto de cobre-índio (CuInSe₂) e o arseneto de gálio (GaAs). Existem outras tecnologias mais modernas, como as células fotovoltaicas orgânicas, porém sua utilização comercial ainda é limitada (Villalva e Gradella, 2012).

As diferentes tecnologias de células disponíveis no mercado possuem custos e eficiências diferentes. No mercado brasileiro estão homologadas pelo INMETRO três tipos de tecnologia: silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos (Urbanetz, 2010).

Com as novas tecnologias na fabricação e no tratamento dos materiais usados na produção dos módulos, a tendência é que a eficiência dos módulos fotovoltaicos aumente no decorrer dos anos. A Tabela 1 traz uma projeção da eficiência. É importante ressaltar que os custos e a eficiência são fatores relevantes na escolha da tecnologia do painel para um projeto, contudo aspectos como o tipo de estrutura necessária para a fixação do painel, ou o local no qual o mesmo será instalado, também são pertinentes.

Conforme mostrado na Tabela 1, percebe-se que as células e os módulos de silício mono e policristalino são os que apresentam as maiores eficiências de conversão.

Tabela 1 - Eficiências de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos em laboratório (NREL, 2020).

Tecnologias		Eficiência de conversão das células	Eficiência de conversão dos módulos
Silício cristalino	m-Si	26,1%	22,7%
	p-Si	23,3%	20,4%
Filmes finos	CIGS	23,4%	19,2%
	CdTe	22,1%	19,0%

3.2 Inversor

O inversor é o equipamento responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos (FV) em energia de corrente alternada (CA) a ser disponibilizada para as cargas. O inversor deve ser projetado para dissipar o mínimo de potência, evitando assim, perdas e também, deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica a ser conectado e na mesma frequência (Urbanetz, 2010).

Para aplicações de potência inferior a 5 kW, recomenda-se o uso de inversores monofásicos. É importante ressaltar que a escolha do inversor interfere diretamente no desempenho, confiabilidade e no custo do sistema fotovoltaico (ANEEL, 2012).

Os inversores monofásicos fabricados atualmente possuem as seguintes funções:

- Conversão CC – CA
- Ajuste do ponto operacional do inversor MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) do gerador fotovoltaico
- Registro de dados operacionais
- Desconexão automática da rede (Anti-ilhamento)
- Dispositivos de Proteção CA e CC

- Proteção contra Sobrecargas
- Proteção contra Sobretensões
- Proteção contra troca de polaridade
- Proteção contra excessiva elevação de temperatura

A eficiência de conversão do inversor depende do método de conversão e filtragem utilizadas para suavizar e eliminar os harmônicos indesejados, que resultam no processo de conversão. Esta eficiência caracteriza perdas da conversão da corrente CC em CA que são ocasionadas pelo transformador - para os inversores que possuem transformadores - pelos comutadores eletrônicos, pelo controlador e pelos dispositivos de registros operacionais. A eficiência de conversão pode ser calculada pela Equação 1:

$$\eta = \frac{\text{Potência de Saída Efetiva}}{\text{Potência de Entrada Efetiva}} \quad (1)$$

Existem diversas configurações de sistemas monofásicos de processamento de energia fotovoltaica, empregando as mais diversas topologias de conversores estáticos, operando em baixa ou em alta frequência. A Fig. 3 mostra as quatro topologias:

- Único estágio inversor (não isolada) - imagem (a)
- Único estágio inversor (isolada) – imagem (b)
- Múltiplos estágios de conversão (isoladas) – imagem (c)
- Múltiplos estágios de conversão (não – isoladas) – imagem (d)

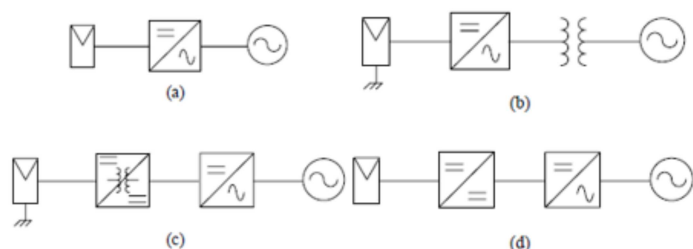


Figura 3. Topologias dos inversores (Rodrigues, 2003)

a) Único estágio inversor (não isolada)

A forma mais simples de condicionar energia a energia fotovoltaica para injetá-la na rede é através da utilização de um inversor que faz diretamente a interface entre o painel fotovoltaico e a rede elétrica. Existem inversores de tensão e inversores de corrente. Essa topologia é caracterizada por ser robusta, simples e de alta eficiência. Porém, apresenta um baixo fator de potência, injetando na rede uma corrente com elevada distorção harmônica e alto fator de deslocamento que precisa ser compensado com a aplicação de filtros.

b) Único estágio inversor (isolada)

Essa topologia apresenta isolamento galvânico entre os painéis fotovoltaicos e a rede elétrica. E, para isso, utiliza-se um transformador de baixa frequência, com núcleo de ferrosilício, na saída do inversor. Além disso, a indutância de dispersão do transformador pode ajudar na filtragem da corrente injetada na rede.

c) Múltiplos estágios de conversão (isolados)

Através do uso de conversores CC-CC isolados com transformadores de alta frequência, com núcleo de ferrite, é possível reduzir o peso e o volume dos equipamentos. As desvantagens do uso de conversores CC-CC isolados estão relacionadas às topologias mais complexas e na existência de perdas devido ao chaveamento em alta frequência. Os sistemas fotovoltaicos, geralmente, são compostos por dois ou mais estágios de processamento de energia em cascata.

d) Múltiplos estágios de conversão (não isolados)

Com a finalidade de reduzir a complexidade e o custo do sistema de condicionamento de energia, essa topologia não utiliza o isolamento galvânico entre os painéis e a rede elétrica. A desvantagem disso é a dificuldade no aterramento dos painéis.

3.3 Medidor Bidirecional

É o equipamento responsável por medir a quantidade de energia que está sendo injetada na rede por meio do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

De acordo com a Resolução 482/12 – ANEEL, o medidor bidirecional deve no mínimo diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede (Rodrigues, 2003).

4. ANÁLISE DE SETE SFVCR INSTALADOS EM CURITIBA

Foram analisados sete sistemas instalados em residências, em bairros distintos na cidade de Curitiba, com topologias diferentes, módulos, inversores, inclinação e orientação. Sua medição da produção de energia compreendeu um período de um ano, entre setembro de 2020 e agosto de 2021. É importante salientar que a escolha dos módulos e dos inversores foi feita de acordo com as condições comerciais da época da sua instalação, como preço e disponibilidade em estoque.

4.1 Sistema 1 – Residência Tingui

O sistema fotovoltaico 1, foi instalado em abril de 2019 no bairro Tingui em Curitiba. É uma residência onde moram um casal e dois filhos, sua Unidade consumidora é atendida com circuito trifásico de 220V. Seu painel fotovoltaico possui 12 módulos BYD, modelo POLI HALF CELL 335W de tecnologia de silício policristalino, conectados em série, com uma potência instalada de 4,02 kWp, conectados à rede através de um inversor monofásico, sem transformador, em 220V de 3.3 kW da ABB, modelo UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB, e seu painel ocupa uma área de 24 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (15 graus de inclinação e 7 graus oeste de desvio em relação ao norte). A Fig. 4 mostra os módulos instalados no telhado da Residência Tingui.



Figura 4. Módulos instalados na Residência Tingui (DO AUTOR)

4.2 Sistema 2 - Residência Boqueirão

O sistema fotovoltaico 2, foi instalado em janeiro de 2020 no bairro Boqueirão. É uma residência onde mora uma família de três pessoas, sua Unidade consumidora é atendida com circuito bifásico de 220V. Seu painel fotovoltaico possui 12 módulos Canadian, modelo CS3U-355P 355W de tecnologia de Silício Policristalino conectados em série, com uma potência instalada de 4,26 kWp, conectados à rede através de um inversor monofásico, sem transformador, em 220 V de 5 kW da marca Canadian, modelo CSI-5KTL1P-GI-FL, e seu painel ocupa uma área de 23,8 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (15 graus de inclinação e 6 graus leste de desvio em relação ao norte). A Fig. 5 mostra os módulos instalados no telhado da Residência Boqueirão.



Figura 5. Módulos instalados na Residência Boqueirão (DO AUTOR)

4.3 Sistema 3 – Santa Felicidade

O sistema fotovoltaico 3, foi instalado em fevereiro de 2020 no bairro Santa Felicidade. É uma residência onde moram um casal e três filhos, sua Unidade consumidora é atendida com circuito trifásico de 220V. Seu painel fotovoltaico possui 12 módulos Canadian, modelo CS3U-355P 355W de tecnologia de Silício Policristalino conectados em série, divididos em dois circuitos de 6 módulos cada, com uma potência instalada de 4,26 kW_p, conectados à rede através de um inversor monofásico, sem transformador, em 220 V de 5 kW da marca Canadian, modelo CSI-5KTL1P-GI-FL, e seu painel ocupa uma área de 23,8 m². A inclinação e orientação dos dois painéis acompanharam a estrutura do telhado (21 graus de inclinação e desvio em relação ao norte de 89 graus oeste para a circuito 1 e 91 graus leste para o circuito 2). A Fig. 6 mostra o inversor e os módulos instalados no telhado da Residência Boqueirão.



Figura 6. Módulos e inversor instalados na Residência Santa Felicidade (DO AUTOR)

4.4 Sistema 4 – Jardim das Américas

O sistema fotovoltaico 4, foi instalado em março de 2020 no bairro Jardim das Américas. É uma residência onde moram um casal e dois filhos, sua Unidade consumidora é atendida com circuito bifásico de 220V. Seu painel fotovoltaico possui 12 módulos Canadian, modelo CS3U-355P 355W de tecnologia de Silício Policristalino, conectados em série e divididos em dois circuitos, sendo um de 7 módulos e um de 5 módulos. Sua potência instalada é de 4,26 kW_p, conectados à rede através de um inversor monofásico, sem transformador, em 220V, de 5 kW da SOFAR, modelo 5KTML-G2, seu painel ocupa uma área de 23,8 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (25 graus de inclinação e desvio em relação ao norte de 106 graus oeste para a circuito 1 e 74 graus leste para o circuito 2). A Fig. 7 mostra os módulos instalados no telhado da Residência Jardim das Américas.



Figura 7. Módulos instalados na Residência Jardim das Américas (DO AUTOR)

4.5 Sistema 5 – Cristo Rei

O sistema fotovoltaico 5, foi instalado em julho de 2020 no bairro Cristo Rei, opera de forma ininterrupta desde então. É uma residência onde moram um casal e dois filhos, sendo um tríplices que no térreo existe um ponto comercial da família, também atendido pelo sistema, sendo uma única Unidade Consumidora, atendida com circuito trifásico de 220V. Seu painel fotovoltaico possui 18 módulos Risen, modelo MONO-PERC RISEN 400W HALF-CELL, de tecnologia de Silício Monocristalino, conectados em série, divididos em dois circuitos de 9 módulos. Sua potência instalada é de 7,2 kW_p, conectados à rede através de um inversor monofásico de 7.5 kW, sem transformador, em 220V, da marca SOFAR, modelo 7.5KTML-G2. Seu painel ocupa uma área de 36,4 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (15 graus de inclinação e desvio em relação ao norte de 78 graus oeste para a circuito 1 e 92 graus leste para o circuito 2). A Fig. 8 mostra os módulos instalados no telhado da Residência Cristo Rei.



Figura 8. Módulos instalados na Residência Cristo Rei (DO AUTOR)

4.6 Sistema 6 – Ahu

O sistema fotovoltaico 6, foi instalado em agosto de 2020 no bairro AHU, opera de forma ininterrupta desde então. É uma residência onde moram um casal e dois filhos, em um condomínio fechado. Seu painel fotovoltaico possui 14 módulos da Canadian, modelo CANADIAN 365W HALF-CELL POLY de tecnologia de Silício Policristalino, conectados em série, divididos em dois circuitos de 7 módulos. Sua potência instalada de 5,11 kW_p, conectados à rede através de um inversor monofásico de 4 kW, sem transformador, conectado em 220 V, da marca SOFAR, modelo 4KTML-G2. Seu painel ocupa uma área de 28,2 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (25 graus de inclinação, orientado ao norte). A Fig. 9 mostra os módulos instalados no telhado da Residência Ahu.



Figura 9. Módulos instalados na Residência Ahu (DO AUTOR)

4.7 Sistema 7 – Bom Retiro

O sistema fotovoltaico 7, foi instalado em setembro de 2020 no bairro Bom Retiro. É uma residência onde moram um casal e dois filhos. Seu painel fotovoltaico possui 10 módulos CANADIAN, modelo HIKU CANADIAN 410W POLY-PERC de tecnologia de Silício Policristalino, conectados em série, divididos em dois circuitos de 5 módulos. Sua potência instalada é de 4,1 kW_p, conectados à rede através de um inversor monofásico de 4,6 kW da ABB, modelo ABB UNO-DM-4.6-TL-PLUS-SB, sem transformador, em 220V. Seu painel ocupa uma área de 20,2 m². A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (19 graus de inclinação e desvio em relação ao norte de 48 graus oeste).



Figura 10. Módulos instalados na Residência Bom Retiro (DO AUTOR)

5. INDICES DE MÉRITO DOS SISTEMAS

A partir da obtenção energia gerada e da irradiação incidente no plano horizontal, é possível calcular os índices de mérito do SFVCR, que são: yield (produtividade); performance ratio (taxa de desempenho) e fator de capacidade. A análise do desempenho dos sistemas utiliza os valores de energia gerada no período de operação de setembro de 2020 a agosto de 2021 e os valores de irradiação incidentes nos módulos fotovoltaicos. A Tabela 2 revela os valores de geração de energia elétrica (kWh/ano) para o período analisado.

TABELA 2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (DADOS DO AUTOR)

SFVCR	Potência (kWp)	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh/ano)
Sistema 1	4,02	5.020
Sistema 2	4,2	5.350
Sistema 3	4,2	4.850
Sistema 4	4,26	4.550
Sistema 5	7,2	7.640
Sistema 6	5,11	5.820
Sistema 7	4,1	4.630

5.1 Yield - 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 (2) apresenta a grandeza em questão.

$$Y = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Potência FV (kWp)}} \quad (2)$$

A Tabela 3 mostra os valores de produtividade de cada um dos sistemas em questão.

TABELA 3. PRODUTIVIDADE DOS SISTEMAS (DADOS DO AUTOR)

SFVCR	Potência (kWp)	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh/ano)	YIELD (kWh/kWp)
Sistema 1	4,02	5.020	1.249
Sistema 2	4,2	5.350	1.274
Sistema 3	4,2	4.850	1.155
Sistema 4	4,26	4.550	1.068
Sistema 5	7,2	7.640	1.061
Sistema 6	5,11	5.820	1.139
Sistema 7	4,1	4.630	1.129

5.2 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 (3) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 4 apresenta a taxa de desempenho dos sistemas.

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

TABELA 4. TAXA DE DESEMPENHO (DADOS DO AUTOR)

SFVCR	Potência (kWp)	YIELD (kWh/kWp)	PR(%)
Sistema 1	4,02	1.249	77,58
Sistema 2	4,2	1.274	78,96
Sistema 3	4,2	1.155	71,42
Sistema 4	4,26	1.068	66,35
Sistema 5	7,2	1.061	65,77
Sistema 6	5,11	1.139	70,76
Sistema 7	4,1	1.129	70,16

5.3 Fator de Capacidade

É a capacidade real de gerar energia em função da energia que seria gerada se operasse em potência nominal durante 24 horas por dia, também expresso em percentual. A Equação (4) apresenta a grandeza em questão, e a Tabela 5 retrata o Fator de Capacidade para os meses de Setembro de 2020 a agosto de 2021.

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV} \cdot 24 \cdot \text{dias}} (\%) \quad (4)$$

TABELA 5. FATOR DE CAPACIDADE (DADOS DO AUTOR)

SFVCR	Potência (kWp)	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh/ano)	FC(%)
Sistema 1	4,02	5.020	14,26
Sistema 2	4,2	5.350	14,54
Sistema 3	4,2	4.850	13,18
Sistema 4	4,26	4.550	12,19
Sistema 5	7,2	7.640	12,11
Sistema 6	5,11	5.820	13,00
Sistema 7	4,1	4.630	12,89

6. CONCLUSÃO

A análise dos índices de méritos apresentados revela que os resultados estão dentro dos valores desejados e aceitáveis, de acordo com as condições dos telhados disponíveis. Verificou-se que os sistemas com o arranjo com apenas uma orientação para o norte, mesmo com desvio azimutal, foram superiores aos sistemas com dois circuitos com orientação e desvio azimutal diferente. Verificou-se que seis sistemas possuem células fotovoltaicas fabricadas a partir do mesmo material, silício policristalino, e mesmo assim, os índices de desempenho destes sistemas apresentaram valores diferentes.

O sistema 1 apresentou o segundo melhor resultado entre os índices de mérito entre os sistemas analisados. Seu módulo fotovoltaico tem uma eficiência de 17%, a utilização de um módulo de maior eficiência traria melhores resultados.

O sistema 2 apresentou os melhores índices de mérito entre os sistemas analisados. Seu o painel fotovoltaico foi instalado nas condições próximas das condições ótimas, que seria orientado para o norte geográfico (teve um pequeno desvio de 6 graus a leste) e uma inclinação igual à latitude de Curitiba de 25° (neste caso a inclinação de 15 graus melhorou o desempenho no verão). Seu módulo fotovoltaico tem uma eficiência de 18,15%.

O sistema 3 apresentou o terceiro melhor índices de mérito entre os sistemas analisados. Seu o painel fotovoltaico foi instalado com duas orientações diferentes, sendo o kit de equipamentos igual ao sistema 2. O que justifica a diferença da produtividade é o modo de instalação.

O sistema 4 apresentou o segundo pior índice de mérito entre os sistemas analisados. Seu o painel fotovoltaico foi instalado com duas orientações diferentes. Os painéis, além da orientação diferente, também ficaram com as

quantidades diferentes em função da área disponível na face leste possuir uma limitação de espaço. Esta diferença promove uma diferença de tensão entre as duas entradas do inversor.

O sistema 5, apesar de ser o de maior potência instalada, apresentou os piores índices de mérito entre os sistemas analisados. Seus dois painéis fotovoltaicos foram instalados acompanhando a inclinação e orientação do telhado, sendo que o desvio a leste foi superior a 90 graus. Ademais, o painel com orientação oeste está fixado rente ao telhado metálico, fato este que reduz a ventilação do painel e com isso faz com que os módulos aqueçam mais do que o necessário e, conseqüentemente reduz a eficiência dos mesmos.

O sistema 6, apresentou bons índices de mérito entre os sistemas analisados. Seu o painel fotovoltaico foi instalado nas condições próximas das condições ótimas, orientado para o norte geográfico e uma inclinação igual à latitude de Curitiba de 25°.

O sistema 7, também apresentou bons índices de mérito entre os sistemas analisados. Seu o painel fotovoltaico foi instalado com um desvio a oeste e seis meses após sua instalação, iniciou-se uma construção no terreno ao fundo que projetou uma sombra ao final da tarde, causando uma perda de produtividade.

Por fim, pode-se afirmar que o principal fator que justifica a diferença no que diz respeito à geração de energia elétrica foi modo de instalação dos painéis fotovoltaicos, mais precisamente a inclinação e o desvio azimutal.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa 482 – ANEEL <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>.
- GERASOL. Sistemas Conectados à rede. <http://www.gerasolbr.com.br/energia-solar.html>, 2016.
- NREL. Q3/Q4 2018 Solar Industry Update: NREL/PR-6A20-73234, 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73234.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2019.
- PINHO, João Tavares. GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. 530 p.
- RODIGUES, M. Uma Visão Topológica Sobre Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede de Energia Elétrica – LABSEL UFJF, Minas Gerais.
- URBANETZ JUNIOR, Jair. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2010. 189 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis – SC, 2010.
- VILLALVA, M.; GRADELLA, M.; GAZOLI, J.; Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações. São Paulo : Érica, 2012. http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed81_fasc_energias_renovaveis_cap9.pdf

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE NETWORK INSTALLED IN CURITIBA WITH DIFFERENT TOPOLOGIES

Abstract. *The water crisis aggravated in 2020 evidenced the dependence of the National Interconnected System (SIN) on high-cost energy generation sources to supply the demand for electricity in times of water scarcity. The main factors for the increase in electricity costs were the dispatch of Thermal Generation and import of Electricity from Argentina and Uruguay, according to the Electric Energy Trading Chamber (CCEE). This scenario promoted an exponential growth of the portion of the Brazilian energy matrix composed of Photovoltaic Generation, both for the emergence of Solar farms, as well as commercial or residential systems. This paper presents a comparative analysis between Network-Connected Photovoltaic Systems (SFVCR) installed in the city of Curitiba, in different locations, with different topologies, with inverters and modules of different characteristics, with different orientations and inclinations, according to the availability of roof areas in each location. The initial projections of annual generation were analyzed and the result obtained over the course of a year was verified, seeking the improvement of the technique used by designers and integrators of photovoltaic systems, to obtain a more assertive estimate possible, aiming at the sizing of the systems to obtain the best result for technical and economic viability. The Merit Indexes, Capacity Factor and Performance Ratio of seven photovoltaic systems installed were analyzed, with the objective of proving the studies already carried out on the potential of power generation in Curitiba, from the analysis of the data of electricity generation of these systems and the irradiation data obtained from the National Institute of Meteorology (INMET). The choice of inverter and the installation mode of photovoltaic panels are determining factors to maximize the performance of the photovoltaic system (TONIN, 2017).*

Keywords: Photovoltaic Solar Energy; Merit Indices; Distributed Generation