

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CARPORTS COM DIFERENTES TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Fausto Batista Felix Silva – faustosilva@unibrasil.com.br

Nicolli Sperança Silveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo. Este trabalho apresenta uma comparação da geração de energia e índices de mérito de dois carports com diferentes tecnologias, construídos na cidade de São José dos Pinhais/PR sob as mesmas condições de instalação. Os carports possuem uma potência instalada de 8,64kWp sendo divididos por um carport instalado por módulos fotovoltaicos (15 módulos Qcells 380Wp - 5700 Wp) e um carport com telhas solares (98 Telhas Solares 30 Wp - 2940 Wp). A análise foi feita com a produção de energia ao longo de 10 meses e mostra uma melhor eficiência de produção com um painel fotovoltaico de telhas solares construído a partir de módulos de filme fino (CIGS) chegando a ser 3,6% superior ao módulo de silício. O trabalho mostra também que módulos de silício, são levemente superiores à telha solar, porém com a análise feita, observa-se que módulos de filme fino apesar de terem um valor monetário superior ao módulo de silício, compensam sua utilização pelo ganho em geração de energia, menor impacto em áreas de sombreamento e flexibilidade de integração à estrutura devido aos aspectos construtivos.

Palavras-chave: Avaliação de desempenho de tecnologias FV, Índices de Mérito, Filme Fino

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), a geração fotovoltaica pode estar presente de forma centralizada, como em usinas de grande porte, ou de forma distribuída, integrada em telhados e coberturas de edificações por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR). No Balanço Energético Nacional 2020 (BEN-2020) o Brasil apresentou um crescimento significativo desta geração em sua matriz, a energia solar fotovoltaica era representada por 0,5% no ano de 2018 e em 2019 subiu para 1%, sendo representada por 6.655 GWh.

O Brasil possui grande potencial para a utilização desta fonte para geração de energia elétrica, por apresentar uma série de características naturais favoráveis, como os altos níveis de insolação. Estes fatores potencializam a atração de investidores e o desenvolvimento desta tecnologia, permitindo uma importante representatividade na matriz elétrica nacional.

O cenário da geração distribuída atinge crescimento exponencial, por sua demanda estar atrelada a uma expressiva redução dos custos de geradores solares fotovoltaicos e uma alta na tarifa de energia.

A Empresa de Pesquisa Energética exemplifica que a energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, o efeito fotovoltaico. Sendo este, o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura composta por um material semicondutor, produzida após absorção da luz. Esta geração possui flexibilidade locacional e facilidade de instalação, quando analisado o tempo necessário para execução dos projetos. Além de apresentar benefícios durante a conversão de eletricidade, na qual não ocorre emissão de gases poluentes, como materiais particulados e gases de efeito estufa.

O SFCR é composto basicamente pelos módulos fotovoltaicos, responsáveis pela geração fotovoltaica e um inversor, que irá realizar a conversão de corrente contínua em corrente alternada. O módulo fotovoltaico representa a unidade básica de um gerador fotovoltaico. Esse equipamento é formado por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014). Existem diversas tecnologias para a fabricação de módulos fotovoltaicos. Atualmente, as tecnologias mais comuns encontradas no mercado são as provenientes de silício, do tipo monocristalino e policristalino (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

As principais tecnologias de células fotovoltaicas são classificadas em três gerações. A primeira geração é constituída por duas principais tecnologias: células de silício monocristalino (m-Si) e células de silício policristalino (p-Si). A segunda geração, também conhecida como filmes finos, é constituída por 3 tecnologias: Sílico amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre e índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Já a terceira geração, é dividida em 3 tecnologias: células de multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV), células sensibilizadas por corante (DSSC) e células orgânicas ou poliméricas (OPV). (PINHO; GALDINO, 2014).

Em termos de viabilidade econômica e energética, é importante verificar a eficiência de conversão de energia solar em elétrica para cada tecnologia de células fotovoltaicas. Além disso, a localidade geográfica onde o SFCR está inserido, as condições de instalação, bem como os índices de irradiação no local são fundamentais para garantir a otimização do sistema.

2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Camila et al. 2020 apresenta um estudo onde demonstra que o desempenho de células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral e temperatura de operação da célula nas condições padrão de ensaio (STC). O estudo apresenta dentre as tecnologias desenvolvidas para células como silício cristalino e filmes finos um comparativo em termos de viabilidade econômica e energética em laboratório, no qual pode ser visualizada na Tab. 1.

Tabela 1 - Eficiências, em laboratório, de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos.

TECNOLOGIAS		Eficiência de conversão das células	Eficiência de conversão dos módulos
Cristalino	m-Si	26,1%	22,7 – 24,4%
	p-Si	22,3%	19,9%
Filmes Finos	CIGS	23,4%	16,6 – 19,2%
	CdTe	22,1%	18,6%

2.1 Índice de Mérito

Os índices de mérito nos permitem realizar um diagnóstico ao longo do tempo de como foi o desempenho do sistema fotovoltaico, comparando o realizado com o esperado. Esses índices são obtidos por meio de equações matemáticas que envolvem, basicamente, potência e energia. Dentre os índices destacam-se três que são utilizados para definir a eficiência global do sistema fotovoltaico conectado à rede, no que se refere ao aproveitamento da radiação solar, produção de energia e perdas do sistema. Com os índices calculados também é possível comparar o sistema em análise com outros sistemas que apresentem os mesmos cálculos (SILVA, 2019).

2.2 Avaliação da Irradiação Solar

Foi levantada para essa análise, uma avaliação da irradiância solar no local da instalação para que se possa obter as variáveis utilizadas nos índices de mérito, assim é possível calcular o desempenho de acordo com o recurso solar de cada mês. O software utilizado foi o Radiasol que é utilizado para calcular a irradiação (kWh/m².dia) para diferentes ângulos de inclinação e de desvio azimutal, a partir dos valores de irradiação global horizontal. As informações são alimentadas a partir do banco de dados do projeto SWERA. Essa análise coletou dados da irradiação global, direta, difusa e inclinada como pode ser observado na Fig. 1.

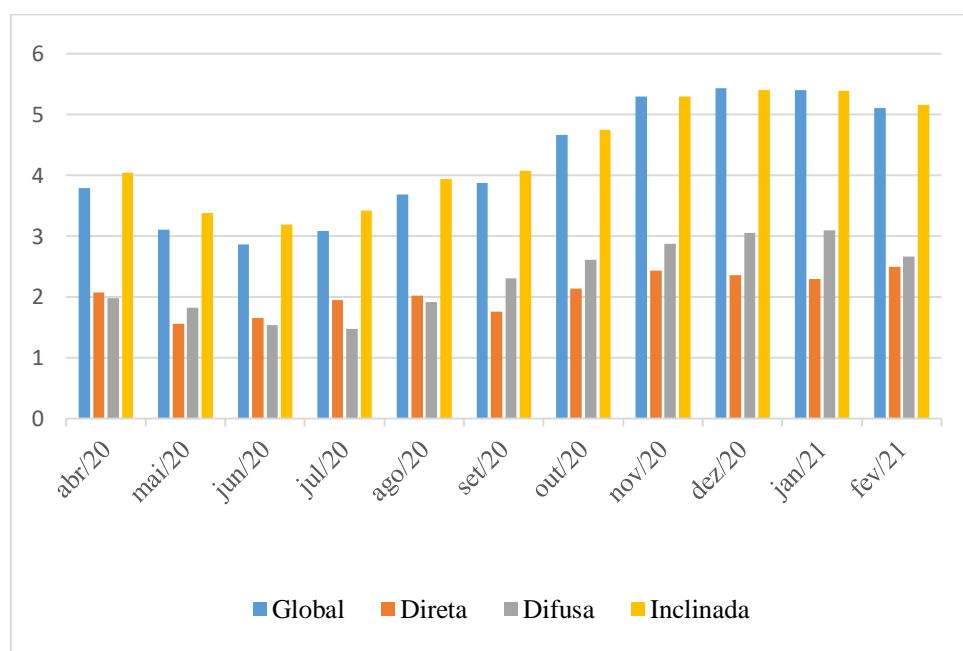


Figura 1 - Avaliação da Irradiação Solar

3. DESCRIÇÃO DO CARPORT INSTALADO

O sistema analisado está localizado na região de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba. O sistema possui uma potência instalada de 8,64kWp sendo dividido por duas estruturas do tipo carport onde cada uma possui duas vagas de garagem. Uma estrutura de carport é composta por 15 módulos de 380Wp da fabricante QCells, divididos em 2 *strings*, totalizando uma potência de 5,7kWp conectado em 1 inversor Fimer 5 kW (220 Vca) e a outra estrutura possui 98 telhas solares de 30Wp com tecnologia de filme fino (CIGS) do fabricante Hanergy com potência de 2,94kWp, divididas em 2 *strings*, formando um arranjo conectado em 1 inversor Fimer 3kW (220 Vca). A Fig. 2, demonstra a divisão destas tecnologias sobre a cobertura do carport.



Figura 2 – Instalação do Carport

3.1 Produção de Energia do Carport

Os dados para a comparação entre as diferentes tecnologias do carport, foram coletados com medições feitas entre Abril/20 e Fevereiro/21 através do sistema de monitoramento do inversor. O módulo QCells utilizado é composto por células monocristalinas com uma eficiência de 19,3%, já a telha solar é composta por células de filme fino (CIGS) com eficiência de 17% e embora a eficiência do módulo seja maior do que a da telha, deve-se levar em consideração que são tecnologias diferentes. Em 10 meses o sistema todo produziu pouco mais de 11.000kWh (11MW/h) de energia, somando tanto a produção dos módulos quanto da telha solar como pode-se ver na Fig. 3 e a Fig. 4 apresenta a produção de energia dos dois sistemas separadamente.

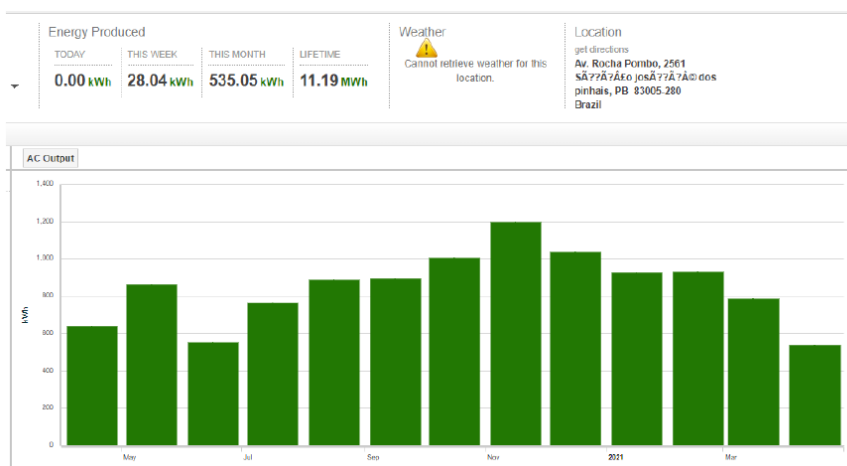


Figura 3 – Produção de energia do Carport

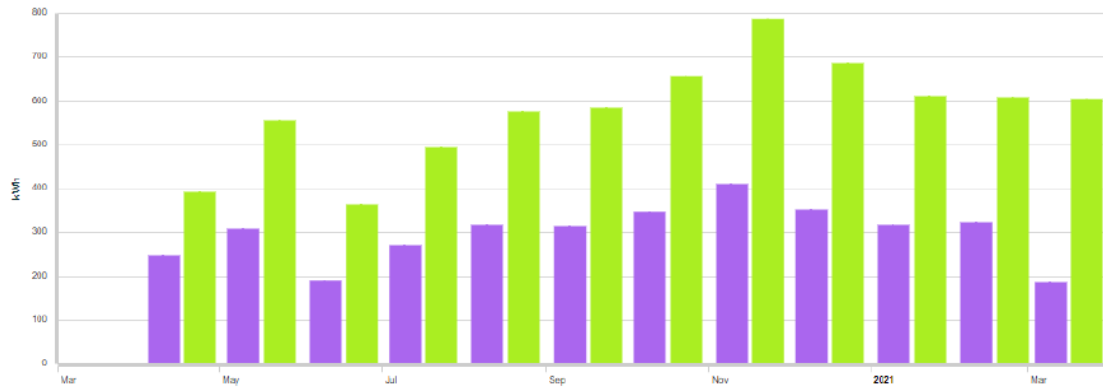


Figura 4 – Produção de energia dos dois sistemas separadamente.

3.2 Comparativo de desempenho com módulo policristalino e Filme Fino

Sabendo-se a potência do painel instalado e obtendo os dados de irradiação através dos do LABREN é possível calcular a energia a ser produzida por cada sistema pela Eq.1.

$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_{TOT} \cdot PR}{G} \quad (1)$$

Onde:

E : é a energia diária a ser gerada (kWh)

P_{FV} : é a potência instalada = 5,7kWp (módulos) e 2,94kWp (telha solar)

G : é a irradiação na condição STC = 1000W/m²

H_{TOT} : é a irradiação diária = 4410 Wh/m²

PR : é a performance ratio do SFVCR (0,7 a 0,8)

Sendo assim o cálculo da energia diária para cada instalação fica:

Energia produzida pelos módulos $E = 20, 1kWh/dia$

Energia produzida pelas telhas $E = 10, 37kWh/dia$

Dessa forma, para estimar a produção de geração de energia mensal do carport, deve-se multiplicar a geração diária de energia por 30, assim a geração média de energia produzida pelos módulos e pelas telhas são respectivamente 623,1 kWh/mês e 321,47 kWh/mês. A partir desses dados, é possível comparar a produção de energia elétrica dos dois sistemas independentes para verificar a produtividade e comparar as duas tecnologias. A Tab. 2 a seguir mostra a produção mensal dos dois sistemas mostrando a produtividade mês a mês fazendo a relação de quanto deveria produzir e quanto foi produzido.

Tabela 2 – Produção mensal dos carport

Sistema	Carport Telha Solar		Carport Módulos	
	Pot. Instalada	Energia Estimada	Pot. Instalada	Energia Estimada
	2,94kW	321,47	5,7kW	623,1
Mês	Kilowatt-hours	Eficiência	Kilowatt-hours	Eficiência
Abril/20	244,53	76,07%	389,77	62,55%
Mai/20	305,03	94,89%	553,95	88,90%
Junho/20	189,25	58,87%	360,15	57,80%
Julho/20	269,97	83,98%	490,74	78,76%
Agosto/20	313,07	97,39%	571,57	91,73%
Setembro/20	311,40	96,87%	582,12	93,42%
Outubro/20	345,13	107,36%	654,72	105,07%
Novembro/20	407,83	126,86%	784,04	125,83%
Dezembro/20	350,27	108,96%	684,94	109,92%
Janeiro/21	312,49	97,21%	609,99	97,90%
Fevereiro/21	320,73	99,77%	607,82	97,55%

3.3 Análise dos Índices de Mérito

3.3.1 Produtividade (Yield)

O índice de produtividade representa a produção do sistema, em um determinado intervalo de tempo, em função da potência instalada. A Eq. 2 abaixo calcula este índice por meio de uma divisão do total de energia gerada pela potência total do sistema (BENEDITO, 2009).

$$Yf = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência instalada}} \quad (2)$$

Dessa forma é possível calcular a produtividade dos dois carports fazendo uma comparação entre o módulo monocristalino e a telha solar como é apresentado na Tab.3.

Tabela 3 – Produtividade

Pot. Instalada (kWp)	2,94	5,7
Mês	Telha Solar	Módulo
abril / 2020	83,173	68,381
maio / 2020	103,752	97,184
junho / 2020	64,371	63,184
julho / 2020	91,827	86,095
agosto / 2020	106,486	100,275
setembro / 2020	105,918	102,126
outubro / 2020	117,391	114,863
novembro / 2020	138,718	137,551
dezembro / 2020	119,139	120,165
janeiro / 2021	106,289	107,016
fevereiro / 2021	109,092	106,635

3.3.2 Fator de Capacidade

O fator de capacidade representa a razão entre energia entregue pelo sistema e a energia que seria entregue partindo do princípio que o sistema opera o tempo inteiro com potência nominal. Este índice é calculado para um dia, porém seria a energia entregue dividida pela energia caso o sistema operasse as 24 horas em potência nominal. A Eq.3 apresenta como é calculado este índice e suas variáveis, em termos práticos o fator de capacidade pode ser calculado dividindo a energia gerada pela potência nominal, vezes 24 horas do dia, vezes a quantidade de dias) (BENEDITO, 2009).

$$FC = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência nomina} * 24 * \text{dias}} \quad (3)$$

Os resultados da Tab. 4 apresentam o fator de capacidade do sistema comparando o painel solar do carport utilizando os módulos fotovoltaicos com o painel utilizando a telha solar.

Tabela 4 – Fator de Capacidade

Pot. Instalada (kWp)	2,94	5,7	-
Mês	Telha Solar	Módulo	Nº dias
abril / 2020	11,5519	9,4973	30
maio / 2020	13,9451	13,0624	31
junho / 2020	8,9404	8,7756	30
julho / 2020	12,3423	11,5719	31
agosto / 2020	14,3127	13,4779	31
setembro / 2020	14,7109	14,1842	30
outubro / 2020	15,7784	15,4386	31
novembro / 2020	19,2663	19,1043	30
dezembro / 2020	16,0134	16,1512	31
janeiro / 2021	14,2862	14,3838	31
fevereiro / 2021	16,2339	15,8683	28

3.3.3 Desempenho Global (*Performance Ratio*)

O Desempenho Global determina se o sistema está operando conforme o desejado, indicando o efeito das possíveis perdas na saída do sistema. Analisando o sistema é possível diagnosticar possíveis defeitos em alguns de seus componentes, sujeira ou a própria degradação do sistema caso o valor de desempenho esteja abaixo do esperado. A Eq. 4 apresenta o cálculo em porcentagem, a capacidade do sistema em converter a energia solar disponível em energia elétrica, em outras palavras é a relação entre produtividade e a quantidade de horas de Sol a 1000 W/m² (MARION et al., 2005).

$$PR = \frac{Y_f}{H(t)/G_{ref}} = \frac{Y_f}{H(t)/1000} \quad (4)$$

A Tab. 5 apresenta o desempenho global dos dois carport onde foi calculada a partir da produtividade de cada mês e a irradiação solar do sistema.

Tabela 5 – Desempenho Global

Pot. Instalada (kWp)	2,94	5,7	-
Mês	Telha Solar	Módulo	Nº dias
abril / 2020	68,625	56,420	30
maio / 2020	99,019	92,751	31
junho / 2020	67,263	66,023	30
julho / 2020	86,612	81,206	31
agosto / 2020	87,184	82,099	31
setembro / 2020	86,747	83,642	30
outubro / 2020	79,722	78,006	31
novembro / 2020	87,244	86,510	30
dezembro / 2020	71,171	71,783	31
janeiro / 2021	63,612	64,047	31
fevereiro / 2021	75,507	73,806	28

4. CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados é possível fazer algumas comparações entre as tecnologias. A média de eficiência de geração de energia da telha solar é de 95,3% e a média de eficiência de geração de energia do módulo é de 91,7%, com isso é possível estimar que a tecnologia de filme fino nesse sistema ao longo do ano obteve uma eficiência de 3,6% maior do que módulos monocristalino. Comparando dois módulos de mesma potência (380W), porém com tecnologias diferentes (monocristalino e filme fino) dentro da diferença de ganho apresentada (3,6%), um módulo de filme fino teria uma potência de 13,7W a mais (393,7W), isso em uma instalação contendo 100 módulos, a tecnologia de filme fino corresponde a quase 4 módulos a mais, gerando assim mais energia.

Em termos de índices de mérito, os valores apresentados pelos módulos de silício, são levemente superiores à telha solar, porém é possível com a análise feita, demonstrar que módulos de filme fino apesar de terem um valor monetário superior ao módulo de silício, compensam sua utilização pelo ganho em geração de energia, menor impacto em áreas de sombreamento e flexibilidade de integração à estrutura devido aos aspectos construtivos.

REFERÊNCIAS

- BENEDITO, R. D. S. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009
- DE OLIVEIRA SILVEIRA, Camila et al. DESEMPENHO DIÁRIO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE OPERANDO COM DIFERENTES TECNOLOGIAS. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2020.
- MARION, B., ADELSTEIN, J., BOYLE, K. E., HAYDEN, H., HAMMOND, B., FLETCHER, T., ... & RICH, G. (2005, January). Performance parameters for grid-connected PV systems. In Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005. (pp. 1601-1606). IEEE.
- PINHO, T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014. 529 p.
- SILVA, Fausto Batista Felix et al. Automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos através do mapeamento da trajetória do sol. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2012

PERFORMANCE ANALYSIS OF CARPORTS WITH DIFFERENT PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

Abstract. *This work presents a comparison of energy generation and merit indices of two cars with different technologies, built in the city of São José dos Pinhais/PR under the same installation conditions. The garages have an installed power of 8.64kWp and are divided by a garage installed by photovoltaic modules (15 Qcells modules 380Wp - 5700 Wp) and a garage with solar tiles (98 Solar Tiles 30 Wp - 2940 Wp). The analysis was carried out with an energy production over 10 months and shows a better production efficiency with a photovoltaic panel of solar tiles built from thin film modules (CIGS) reaching 3.6% higher than the thin film n. The superior work that silicon modules, are also light, with analysis modules made, if that modules of thin modules, despite a gain in value, however, show superior value to the film, compensating its use by the generation generation module. energy, less impact in shading areas and flexibility of integration into the structure due to constructive aspects.*

Key words: *Performance evaluation of PV technologies, Merit Indices, Thin Film*