

# ESTIMAÇÃO DA TAXA DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE EM DIFERENTES MESORREGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ

**Matheus Bitcheriene Angelo** – matb.angelo@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Gerson Máximo Tiepolo** – tiepolo@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

**Resumo.** O estado do Paraná conta com sua matriz energética formada principalmente por fonte hidráulica, contudo com maior parte do potencial já explorado, como alternativa o estado detém um grande potencial energético a partir de energia solar fotovoltaica, com índices de irradiação superiores aos apresentados pela Alemanha, maior país em capacidade instalada na Europa. Para maximizar o desempenho de sistemas fotovoltaicos deve-se diminuir as perdas ao máximo buscando condições favoráveis à instalação e, através dos índices de mérito, é possível mensurar o desempenho de um sistema. A taxa de desempenho permite contabilizar as perdas de desempenho que podem ser por sujidade, temperatura, descasamento, sombreamento entre outros. Neste estudo, um sistema conectado à rede semelhante a um sistema real de 3 kWp foi simulado através do software SAM (System Advisor Model) em nove das dez mesorregiões do estado do Paraná, com valores de perdas associadas fixas e variando sua inclinação de 0 a 90° e orientação de 0° a 350° para obter a melhor posição de instalação. Os resultados simulados foram dispostos em mapas de calor para facilitar a visualização e as cidades foram classificadas por sua taxa de desempenho. Os municípios que apresentaram a melhor taxa de desempenho foram Inácio Martins, Curitiba e Castro, todos localizados mais ao sul do estado, com altitudes superiores a 900 metros e temperaturas médias abaixo de 18 °C. As menores taxas de desempenho ocorreram em Icaraíma, Maringá e Cidade Gaúcha, municípios localizados ao Norte do estado, com temperaturas médias acima de 22 °C. O sistema apresentou um desvio de 6% em comparação com um sistema real com as mesmas características, o que pode ser justificado devido a parametrização de perdas utilizadas no modelo simulado serem diferentes das apresentadas pelo sistema real.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Taxa de Desempenho, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis de energia não hidráulicas é crescente nos últimos anos no Brasil. Dentre elas, começa a se destacar a fonte solar fotovoltaica que obteve crescimento de 44,7% em 2016 em relação a 2015, seguida pela energia eólica com 54,9% (EPE, 2017). Esse aumento na utilização da energia solar fotovoltaica está de certa forma relacionado a resolução nº 482/2012, que estabelece condições para a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica através do sistema de compensação da energia elétrica.

O estado do Paraná tem sua matriz energética formada principalmente por energia hidráulica com 90,47% da capacidade instalada, com cerca de 66% do seu potencial já explorado (EPE, 2017). O estado é detentor de grande potencial energético a partir de energia solar fotovoltaica, onde os níveis de irradiação solar no Paraná, mesmo no inverno, são superiores à média anual apresentada pela Alemanha, 5º país no mundo em geração de energia solar fotovoltaica (TIEPOLO, 2015)(EPIA, 2017).

Em comparação com outras fontes de energia elétrica, a solar fotovoltaica destaca-se por ser uma geração silenciosa de dimensionamento e instalação mais simples, tempo de vida longo, que é facilmente transportada e que requer menor manutenção em relação a outros sistemas (PINHO e GALDINO, 2014). Um sistema fotovoltaico conectado à rede é constituído basicamente por arranjos fotovoltaicos, condicionadores de potência, inversores e dispositivos para controle e proteção (PINHO e GALDINO, 2014).

Para a maximização anual de energia gerada e desempenho, os módulos devem estar, de forma geral, orientados em direção à linha do equador, no hemisfério Sul devem ser orientados ao Norte, e o ângulo de inclinação do módulo com o solo deve ser igual a latitude da região, estas condições podem variar conforme as peculiaridades do clima do local, como neblinas matutinas (GASPARIN, 2016). Existem vários fatores que podem influenciar o desempenho de um SFVCR, entre eles: a eficiência do painel fotovoltaico relacionada à tecnologia utilizada, o sombreamento, a posição geográfica, inclinação, sujidade, temperatura e irradiação solar a que o sistema está submetido.

Os índices de mérito são indicadores que permitem analisar e comparar sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes localidades ou em condições de operação diferentes, e também comparar sistemas fotovoltaicos com outras fontes de energia. Um deles é a taxa de desempenho ou performance ratio (PR), que é a relação, expressa em porcentagem, entre a produtividade (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000 W/m<sup>2</sup> incidentes no painel

fotovoltaico, normalmente vinculada a um ano de operação (MARION et al., 2005). A taxa de desempenho de um sistema contabiliza toda as perdas de eficiência considerando o aumento da temperatura do módulo, variação da irradiação, sujidade, perdas nas conexões, descasamento, perdas de conversão no inversor e outras perdas (IEA, 2014), permitindo uma análise de eficiência global do sistema fotovoltaico instalado.

Para realizar a análise da taxa de desempenho do estado do Paraná, foi utilizada a divisão do estado em mesorregiões, sendo estas: Noroeste paranaense, Centro Ocidental paranaense, Norte Central paranaense, Norte Pioneiro paranaense, Centro Oriental paranaense, Oeste paranaense, Sudoeste paranaense, Centro-Sul paranaense, Sudeste paranaense e Metropolitana de Curitiba (IBGE,1990). As mesorregiões possuem diferenças de localização e diferenças climáticas, variando regimes de chuva, velocidade do vento, altitude e temperatura, fatores que influenciam diretamente na operação de um sistema fotovoltaico pois representam de forma geral, os diferentes microclimas no estado.

Neste trabalho foi utilizado o software System Advisor Model (SAM) de modelagem de desempenho e financeira de energias renováveis, contemplando energia solar fotovoltaica, solar térmica, geotérmica, biomassa e eólica em sua biblioteca interna. Esta ferramenta é desenvolvida e disponibilizada pela National Renewable Energy Laboratory (NREL), onde foi simulado um sistema de 3 kWp em vinte cidades do Paraná: Castro, Cidade Gaúcha, Clevelândia, Diamante do Norte, Dois Vizinhos, Foz do Iguaçu (Cataratas), General Carneiro, Ibaiti, Icaraíma, Paranaguá (Ilha do Mel), Inácio Martins, Ivaí, Joaquim Távora, Londrina, Marechal Candido Rondon, Maringá, Nova Fátima, Paranaipoema e Planalto. Estas cidades contemplam nove das dez mesorregiões do estado do Paraná, com exceção apenas da mesorregião Centro Ocidental onde não haviam dados disponíveis para a simulação.

## 2. METODOLOGIA

As simulações deste trabalho foram baseadas primeiramente na recriação do processo descrito em um artigo apresentado no VI Congresso Brasileiro de Energia Solar (CEBENS) pelo Dr. Fabiano Perin Gasparin e Dr. Arno Krenzinger, da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e Universidade Federal do Rio Grande do Sul respectivamente. Entretanto neste trabalho, ao invés de fornecer a taxa de desempenho (PR) como feito anteriormente, serão informados os parâmetros de perdas ao software, no qual a taxa de desempenho será o dado de saída desta simulação. Todas as cidades escolhidas são pertencentes ao estado do Paraná e com dados meteorológicos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O SAM utiliza banco de dados climatológicos no formato TMY3, que fornece latitude, longitude, altitude de cada localidade, dados horários acumulados de vários anos de irradiação global horizontal, irradiação direta, irradiação difusa, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento, direção do vento e irradiação de albedo. Outros formatos de dados climatológicos são aceitos, como TMY2, SRW, CSV e EPW, todos semelhantes ao TMY3 variando a sua organização e separação dentro do arquivo. Para cidades paranaenses apenas Curitiba possui dados já nativos dentro do SAM, tornando necessário a inserção de dados externos ao software. O INMET fornece os dados das estações automáticas no formato EPW, compatível com TMY3, das vinte cidades escolhidas.

O banco de dados foi importado para o SAM e através de uma ferramenta Macro Solar Resource File Checker do próprio software, foi realizada a validação da consistência dos novos dados para evitar valores não compatíveis, muito discrepantes ou escritos errados, entretanto neste trabalho nenhuma inconsistência foi encontrada.

Foi escolhido o modelo Fotovoltaico Detalhado sem Modelo Financeiro para a simulação de um sistema conectado à rede, com um arranjo de 10 módulos de silício multicristalino de 300 Wp em série conectados a um inversor 3 kW. Esta configuração é a mesma que a utilizada em um sistema real em operação na cidade de Curitiba (arranjo, módulos e inversor) (Tonin, 2017), cujos os dados reais de desempenho foram utilizados para a validação dos resultados obtidos pela simulação. O módulo escolhido foi o ELCO A300P considerando a montagem em rack e inversor Solar Energy SE-TL3KA, que através das especificações do fabricante no datasheet, foram inseridos nos modelos CEC Performance Model with user Entered Specifications e Inverter Datasheet respectivamente no software utilizado. O modelo de Albedo considerado foi o modelo Perez com valores fixos em 0,2.

As perdas percentuais associadas ao sistema utilizado para a simulação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Perdas percentuais parametrizadas.

Perdas (%)	
Sombreamento	-
Sujidade	5,00
Descasamento – Mismatch	2,00
Diodos e Conexões	0,50
Na fiação DC	2,00
Otimizador de potência DC – MPPT	0,50
Total de perdas DC	4,918
Na fiação AC	1,00

A Tab. 2 apresenta de forma resumida os dados de localização, altitude, temperatura média, velocidade do vento média e irradiação de cada cidade simulada.

Tabela 2 - Dados das cidades simuladas.

Cidade	Mesorregião	Localização	Altitude (m)	Temp. Média (°C)	Vel. do vento média (m/s)	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> .dia)		
						Global Horizontal	Direta	Difusa
Castro	Centro Oriental	-24,79 °N -50,01 °O	1008	16,90	1,80	4,27	1,57	2,11
Cidade Gaúcha	Noroeste	-23,36 °N -52,93°O	381	22,80	2,00	4,84	1,96	2,20
Clevelândia	Centro-Sul	-26,42 °N -52,35 °O	980	17,60	2,90	4,59	1,81	2,12
Curitiba	Metropolitana de Curitiba	-25,43 °N -49,27 °O	924	17,40	2,20	4,08	1,42	2,12
Diamante do Norte	Noroeste	-22,64 °N -52,89°O	362	22,80	3,00	5,19	2,26	2,17
Dois Vizinhos	Sudoeste	-25,69 °N -53,09 °O	520	20,00	2,80	4,92	2,10	2,12
Foz do Iguaçu - Cataratas	Oeste	-25,60 °N -54,48°O	231	21,50	2,70	4,43	1,71	2,09
General Carneiro	Sudeste	-26,40 °N -51,35 °O	1018	15,80	1,40	3,82	1,32	1,97
Ibaiti	Norte Pioneiro	-23,77 °N -50,18 °O	930	20,20	2,50	4,74	1,89	2,17
Icaraíma	Noroeste	-23,40 °N -53,61°O	385	22,40	3,10	4,93	2,15	2,06
Inácio Martins	Centro-Sul	-25,57 °N -51,08 °O	1260	16,30	2,70	4,29	1,63	2,07
Ivaí	Sudeste	-25,01 °N -50,86°O	808	19,10	1,80	4,45	1,66	2,15
Joaquim Távora	Norte Pioneiro	-23,50 °N -49,90°O	522	20,50	2,80	4,87	1,96	2,20
Londrina	Norte Central	-23,38 °N -51,18°O	566	21,80	2,30	4,12	1,27	2,32
Marechal Candido Rondon	Oeste	-24,56 °N -54,06°O	392	21,40	3,40	4,86	2,00	2,16
Maringá	Norte Central	-23,42 °N -51,94°O	542	23,00	2,20	4,96	2,01	2,22
Nova Fátima	Norte Pioneiro	-23,43 °N -50,56 °O	668	20,80	3,10	5,06	2,13	2,16
Paranaguá - Ilha do Mel	Metropolitana de Curitiba	-25,57 °N -48,32 °O	1	21,10	2,70	4,05	1,50	2,00
Paranapoema	Noroeste	-22,49 °N -52,13°O	311	22,90	3,00	5,10	2,16	2,20
Planalto	Sudoeste	-25,72 °N -53,75°O	346	21,30	2,90	4,77	1,97	2,12

Todas as 20 cidades foram simuladas com todas inclinações variando a inclinação de 0° a 90° e desvio de orientação de 0° até 350°.

### 3. RESULTADOS

As três cidades que obtiveram os melhores resultados de taxa de desempenho, obtidos através das simulações, foram Inácio Martins, Curitiba e Castro respectivamente. As taxas de desempenho para cada combinação de inclinação e desvio de orientação estão em forma de mapa de calor para facilitar a visualização da variação do resultado. Os dados de geração de energia anual e taxa de desempenho para todos os municípios são expostos na Tab. 3 após os mapas de calor.

O município de Inácio Martins, pertencente a mesorregião Centro-Sul paranaense obteve a melhor taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de 0,82244 e a mínima de 0,787764, apresentando uma variação de 4,21%.

O município está localizado a uma latitude de -25,57 °N, porém sua máxima geração de energia anual foi de 3184,85 kWh.ano na inclinação de 20° e desvio de 10° em relação ao Norte.

A Fig.1 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, situado entre 40° e 50° de inclinação 340° e 20° de desvio de orientação.

azimute (°)	Sul			Oeste						Norte							Leste		
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135	
ângulo de inclinação (°)	0	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	
	5	0,816	0,816	0,816	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,816	0,816
	10	0,816	0,816	0,817	0,817	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,817	0,817	0,817
	15	0,816	0,816	0,817	0,818	0,818	0,818	0,818	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,818	0,818	0,818	0,818	0,817	0,816
	20	0,815	0,815	0,817	0,818	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,819	0,818	0,817	0,816
	25	0,813	0,814	0,817	0,818	0,819	0,819	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,819	0,819	0,818	0,817
	30	0,811	0,813	0,816	0,818	0,819	0,820	0,820	0,820	0,821	0,821	0,821	0,820	0,820	0,820	0,819	0,818	0,817	0,814
	35	0,809	0,811	0,816	0,818	0,819	0,820	0,821	0,821	0,821	0,821	0,821	0,821	0,821	0,820	0,820	0,818	0,817	0,812
	40	0,807	0,809	0,815	0,817	0,819	0,820	0,821	0,821	0,822	0,822	0,822	0,821	0,821	0,820	0,820	0,818	0,816	0,811
	50	0,803	0,805	0,813	0,816	0,818	0,820	0,821	0,822	0,822	0,822	0,822	0,821	0,821	0,820	0,820	0,818	0,815	0,807
	60	0,797	0,801	0,810	0,813	0,817	0,818	0,819	0,820	0,821	0,821	0,821	0,821	0,821	0,820	0,819	0,816	0,813	0,804
70	0,788	0,799	0,806	0,810	0,813	0,814	0,815	0,816	0,816	0,816	0,816	0,817	0,817	0,817	0,816	0,814	0,812	0,802	
80	0,788	0,796	0,802	0,804	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,808	0,810	0,811	0,811	0,809	0,806	0,799	
90	0,797	0,794	0,797	0,798	0,798	0,798	0,798	0,797	0,797	0,798	0,799	0,800	0,802	0,803	0,804	0,804	0,803	0,796	

Figura 1- Taxa de desempenho para Inácio Martins.

O município de Curitiba, capital do estado, pertencente a mesorregião Metropolitana de Curitiba, é questionada sobre a viabilidade da geração de energia fotovoltaica por apresentar poucos dias de céu limpo. Ainda assim, obteve a segunda melhor taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de 0,818486 e mínima de 0,783723, apresentando uma variação de 4,24%.

O município está localizado a uma latitude de -25,43 °N, porém sua máxima geração de energia anual foi de 3033,33 kWh.ano na inclinação de 20° e desvio de 10° em relação ao Norte.

A Fig. 2 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, situado entre 30° e 50° de inclinação 330° e 20° de desvio de orientação em relação ao Norte Geográfico.

azimute (°)	Sul			Oeste						Norte							Leste		
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135	
ângulo de inclinação (°)	0	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	
	5	0,812	0,812	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,812	0,812
	10	0,812	0,813	0,814	0,814	0,814	0,814	0,815	0,815	0,815	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,813	0,813	0,812
	15	0,811	0,812	0,814	0,815	0,815	0,815	0,815	0,816	0,816	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,814	0,814	0,813	0,812
	20	0,810	0,812	0,814	0,815	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,815	0,815	0,814	0,813	0,811
	25	0,808	0,811	0,814	0,815	0,816	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,817	0,816	0,816	0,816	0,815	0,814	0,813	0,810
	30	0,806	0,809	0,814	0,815	0,817	0,817	0,817	0,818	0,818	0,818	0,817	0,817	0,816	0,816	0,815	0,814	0,812	0,809
	35	0,804	0,807	0,813	0,815	0,817	0,817	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,817	0,817	0,816	0,815	0,814	0,812	0,807
	40	0,803	0,805	0,813	0,815	0,817	0,817	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,817	0,816	0,815	0,813	0,811	0,806
	50	0,800	0,802	0,811	0,814	0,816	0,817	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,817	0,816	0,815	0,813	0,810	0,803
	60	0,796	0,799	0,808	0,811	0,814	0,815	0,816	0,816	0,817	0,817	0,817	0,816	0,816	0,815	0,814	0,811	0,808	0,800
70	0,788	0,796	0,804	0,808	0,810	0,811	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,811	0,810	0,808	0,806	0,798	
80	0,784	0,793	0,800	0,802	0,804	0,804	0,805	0,804	0,804	0,803	0,804	0,805	0,805	0,806	0,806	0,804	0,801	0,795	
90	0,790	0,789	0,793	0,795	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,797	0,796	0,796	0,797	0,798	0,799	0,798	0,797	0,791	

Figura 2 - Taxa de desempenho para Curitiba.

O município de Castro, pertencente a mesorregião Centro Oriental paranaense, obteve a terceira melhor taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de 0,815183 e mínima de 0,780207, apresentando uma variação de 4,29%.

O município está localizado a uma latitude de -24,79 °N, porém sua máxima geração de energia anual foi de 3142,38 kWh.ano na inclinação de 20° e desvio de 10° em relação ao Norte.

A Fig. 3 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, situado entre 40° e 50° de inclinação 330° e 10° de desvio de orientação.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste		
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135	
ângulo de inclinação (°)	0	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808
	5	0,809	0,809	0,809	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810	0,810
	10	0,809	0,809	0,810	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,810	0,810	0,810	0,810
	15	0,808	0,809	0,811	0,811	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,811	0,811	0,811	0,811	0,810	0,810	0,810	0,810
	20	0,807	0,809	0,811	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,812	0,811	0,811	0,810	0,810	0,810
	25	0,806	0,808	0,811	0,812	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,812	0,812	0,812	0,811	0,810	0,810	0,810
	30	0,804	0,807	0,811	0,812	0,813	0,813	0,814	0,814	0,814	0,814	0,813	0,813	0,812	0,812	0,811	0,810	0,810	0,810
	35	0,801	0,805	0,810	0,812	0,813	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,813	0,813	0,812	0,811	0,810	0,810	0,810
	40	0,800	0,803	0,810	0,812	0,813	0,814	0,815	0,815	0,815	0,815	0,814	0,814	0,813	0,812	0,812	0,810	0,810	0,810
	50	0,798	0,800	0,808	0,811	0,813	0,814	0,815	0,815	0,815	0,815	0,815	0,814	0,813	0,812	0,811	0,810	0,810	0,810
	60	0,793	0,796	0,806	0,808	0,811	0,812	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,812	0,811	0,810	0,810	0,810	0,810
70	0,785	0,794	0,802	0,806	0,808	0,808	0,808	0,809	0,808	0,808	0,808	0,809	0,808	0,808	0,807	0,805	0,803	0,803	
80	0,780	0,791	0,798	0,800	0,802	0,802	0,802	0,801	0,800	0,799	0,800	0,800	0,801	0,802	0,803	0,803	0,801	0,798	
90	0,790	0,787	0,792	0,793	0,793	0,793	0,793	0,792	0,793	0,794	0,793	0,793	0,794	0,795	0,796	0,796	0,795	0,789	

Figura 3 - Taxa de desempenho para Castro.

As três cidades que obtiveram os piores resultados de taxa de desempenho, obtidos através das simulações, foram Cidade Gaúcha, Maringá e Icaraíma respectivamente. O município de Icaraíma, pertencente a mesorregião Noroeste paranaense, obteve a terceira pior taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de apenas 0,79925 e mínima de 0,751987, apresentando uma variação de 5,91%.

O município está localizado a uma latitude de  $-23,40^{\circ}\text{N}$ , porém sua máxima geração de energia anual foi de 3597,59 kWh.ano na inclinação de  $30^{\circ}$  e desvio de  $50^{\circ}$  em relação ao Norte.

A Fig. 4 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, situado entre  $35^{\circ}$  e  $50^{\circ}$  de inclinação  $0^{\circ}$  e  $20^{\circ}$  de desvio de orientação. Nota-se que o quadrante com as melhores taxas de desempenho de Icaraíma é deslocado para leste.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792
	5	0,792	0,792	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,793
	10	0,792	0,791	0,792	0,793	0,794	0,794	0,794	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,794	0,794
	15	0,791	0,790	0,791	0,792	0,794	0,794	0,795	0,795	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,795	0,795	0,794
	20	0,789	0,788	0,790	0,792	0,793	0,794	0,795	0,796	0,796	0,797	0,797	0,797	0,796	0,796	0,796	0,795	0,794
	25	0,787	0,786	0,789	0,791	0,793	0,794	0,795	0,796	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797	0,796	0,795	0,794	0,791
	30	0,784	0,783	0,788	0,791	0,793	0,794	0,795	0,796	0,797	0,798	0,798	0,798	0,798	0,797	0,796	0,795	0,793
	35	0,781	0,781	0,787	0,790	0,793	0,794	0,796	0,797	0,798	0,798	0,799	0,798	0,798	0,797	0,796	0,795	0,793
	40	0,778	0,778	0,786	0,789	0,793	0,794	0,795	0,797	0,798	0,799	0,799	0,799	0,798	0,798	0,796	0,794	0,792
	50	0,774	0,774	0,784	0,788	0,791	0,793	0,794	0,796	0,798	0,799	0,799	0,799	0,798	0,797	0,796	0,793	0,790
	60	0,767	0,770	0,780	0,784	0,788	0,789	0,791	0,793	0,795	0,796	0,797	0,798	0,797	0,796	0,795	0,791	0,788
70	0,756	0,767	0,777	0,780	0,783	0,784	0,786	0,787	0,789	0,790	0,792	0,793	0,793	0,793	0,792	0,789	0,785	
80	0,752	0,766	0,771	0,774	0,776	0,777	0,777	0,778	0,779	0,780	0,782	0,785	0,787	0,788	0,788	0,785	0,781	
90	0,763	0,764	0,768	0,769	0,768	0,768	0,768	0,769	0,771	0,774	0,774	0,775	0,778	0,780	0,780	0,779	0,776	

Figura 4 - Taxa de desempenho para Icaraíma.

O município de Maringá, cidade com grande importância econômica para o estado, pertencente a mesorregião Norte Central, obteve a segunda pior taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de apenas 0,798825 e mínima de 0,762269, apresentando uma variação de 4,57%.

O município está localizado a uma latitude de  $-23,42^{\circ}\text{N}$ , porém sua máxima geração de energia anual foi de 3537,05 kWh.ano na inclinação de  $20^{\circ}$  e desvio de  $20^{\circ}$  em relação ao Norte.

A Fig. 5 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, situado entre  $50^{\circ}$  e de inclinação  $0^{\circ}$  e  $20^{\circ}$  de desvio de orientação.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste		
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135	
ângulo de inclinação (°)	0	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792
	5	0,792	0,792	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
	10	0,792	0,792	0,793	0,793	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794
	15	0,792	0,792	0,793	0,794	0,794	0,794	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,794	0,794	0,793
	20	0,790	0,791	0,793	0,794	0,794	0,795	0,795	0,795	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,795	0,795	0,795	0,794	0,792
	25	0,788	0,789	0,792	0,793	0,795	0,795	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,796	0,795	0,795	0,794	0,791	
	30	0,785	0,787	0,791	0,793	0,795	0,795	0,796	0,796	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797	0,796	0,796	0,795	0,794	0,790
	35	0,782	0,785	0,790	0,793	0,795	0,796	0,796	0,797	0,797	0,798	0,798	0,798	0,797	0,797	0,796	0,795	0,794	0,788
	40	0,780	0,782	0,790	0,792	0,795	0,796	0,797	0,797	0,798	0,798	0,798	0,798	0,797	0,797	0,796	0,795	0,793	0,787
	50	0,777	0,778	0,787	0,791	0,794	0,795	0,796	0,797	0,798	0,799	0,799	0,799	0,798	0,798	0,797	0,795	0,793	0,783
	60	0,773	0,775	0,785	0,788	0,792	0,793	0,795	0,796	0,797	0,797	0,798	0,798	0,798	0,797	0,797	0,794	0,792	0,781
70	0,766	0,773	0,782	0,786	0,788	0,789	0,790	0,791	0,792	0,793	0,794	0,795	0,795	0,795	0,795	0,793	0,790	0,779	
80	0,762	0,772	0,778	0,780	0,782	0,783	0,783	0,784	0,784	0,784	0,786	0,786	0,788	0,789	0,790	0,791	0,789	0,786	0,777
90	0,772	0,770	0,774	0,775	0,774	0,774	0,775	0,775	0,777	0,779	0,779	0,780	0,781	0,783	0,784	0,784	0,783	0,775	

Figura 5 - Taxa de desempenho para Maringá.

O município de Cidade Gaúcha, pertencente a mesorregião Noroeste, obteve a pior taxa de desempenho de todo o estado, com máxima de apenas 0,794858, e mínima de 0,757765, apresentando uma variação de 4,66%.

O município está localizado a uma latitude de -23,36 °N, porém sua máxima geração de energia anual foi de 3456,1 kWh.ano na inclinação de 20° e desvio de 20° em relação ao Norte.

A Fig. 6 apresenta um quadrante em que a taxa de desempenho permanece máxima, está situado entre 50° e de inclinação 0° e 20° de desvio de orientação. Nota-se que o quadrante de Cidade Gaúcha é similar ao de Maringá.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788	0,788
	5	0,788	0,788	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789
	10	0,789	0,789	0,789	0,789	0,789	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,790	0,789
	15	0,788	0,788	0,789	0,789	0,790	0,790	0,790	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,790	0,790
	20	0,787	0,787	0,789	0,789	0,790	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,791	0,790	0,789
	25	0,786	0,786	0,788	0,789	0,790	0,791	0,791	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,791	0,791	0,790	0,788
	30	0,784	0,785	0,788	0,789	0,791	0,791	0,792	0,792	0,793	0,793	0,793	0,793	0,792	0,792	0,791	0,790	0,787
	35	0,782	0,783	0,787	0,789	0,791	0,792	0,792	0,793	0,793	0,794	0,794	0,794	0,793	0,793	0,792	0,791	0,790
	40	0,779	0,781	0,786	0,789	0,791	0,792	0,793	0,793	0,794	0,794	0,794	0,794	0,793	0,793	0,791	0,790	0,784
	50	0,776	0,776	0,785	0,788	0,790	0,791	0,792	0,793	0,794	0,795	0,795	0,795	0,794	0,794	0,793	0,791	0,789
	60	0,770	0,773	0,782	0,785	0,788	0,789	0,791	0,792	0,792	0,793	0,793	0,794	0,794	0,793	0,792	0,790	0,788
70	0,763	0,770	0,779	0,782	0,784	0,785	0,786	0,787	0,787	0,787	0,788	0,790	0,790	0,791	0,790	0,789	0,786	
80	0,758	0,769	0,774	0,777	0,779	0,779	0,779	0,779	0,778	0,778	0,780	0,782	0,784	0,786	0,787	0,786	0,784	
90	0,769	0,767	0,771	0,771	0,771	0,771	0,770	0,770	0,772	0,775	0,774	0,774	0,776	0,779	0,780	0,782	0,781	

Figura 6 - Taxa de desempenho para Cidade Gaúcha.

Após a análise das três melhores e três piores cidades é possível notar que apenas em situações de instalação com desvios de orientação voltadas predominantemente ao Sul (entre 90° e 270°) e com inclinações próximas a zero (nestes casos há um aumento significativo dos níveis de sujidade) e acima de 70°. A taxa de desempenho tem pouca variação nas regiões intermediárias de latitude e desvio de orientação, com variação próxima a 2% apenas.

Os dados da taxa de desempenho e os valores de geração de energia elétrica obtido por simulação para cada um dos 20 municípios estão apresentados de forma resumida na Tab. 3, onde as cidades foram classificadas pela máxima taxa de desempenho obtida. Nota-se que as três primeiras cidades apresentam temperaturas médias abaixo de 18 °C e inferiores à média de 20,28 °C encontrada nos 20 municípios pesquisados, correlacionando a temperatura com a taxa de desempenho uma vez que as três piores taxas de desempenho são obtidas em temperaturas acima da média das cidades.

O município de Diamante do Norte conta com o maior índice de irradiação do estado, porém não obteve a melhor taxa de desempenho, ficando posicionado em apenas 17° no ranking apresentado pela Tab. 3, contudo o município é líder quando analisado a máxima geração de energia elétrica anual.

Tabela 3 - Ranking de taxa de desempenho do sistema de 3 kWp nas cidades simuladas.

Pos	Cidade	Mesorregião	Altitude (m)	Temp. Média (°C)	Vel. do vento média (m/s)	Irradiação no plano inclinado (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	Máxima Taxa de Desempenho	Máxima Produção de energia (kWh/ano)
1	Inácio Martins	Centro-Sul	1260	16,30	2,70	1,63	0,82244	3184,85
2	Curitiba	Metropolitana de Curitiba	924	17,40	2,20	1,42	0,818486	3033,33
3	Castro	Centro Oriental	1008	16,90	1,80	1,57	0,815183	3142,38
4	Paranaguá - Ilha do Mel	Metropolitana de Curitiba	1	21,10	2,70	1,5	0,814804	2978,95
5	General Carneiro	Sudeste	1018	15,80	1,40	1,32	0,814149	2815,63
6	Clevelândia	Centro-Sul	980	17,60	2,90	1,81	0,811686	3345,77
7	Nova Fátima	Norte Pioneiro	668	20,80	3,10	2,13	0,809987	3619,41
8	Ibaiti	Norte Pioneiro	930	20,20	2,50	1,89	0,806528	3411,97
9	Dois Vizinhos	Sudoeste	520	20,00	2,80	2,10	0,805883	3546,67
10	Joaquim Távora	Norte Pioneiro	522	20,50	2,80	1,96	0,805238	3473,25
11	Ivaí	Sudeste	808	19,10	1,80	1,66	0,804218	3206,14
12	Marechal Candido Rondon	Oeste	392	21,40	3,40	2,00	0,803937	3499,16
13	Londrina	Norte Central	566	21,80	2,30	1,27	0,803494	3046,22
14	Planalto	Sudoeste	346	21,30	2,90	1,97	0,802373	3437,14
15	Paranapoema	Noroeste	311	22,90	3,00	2,16	0,800263	3637,6
16	Foz do Iguaçu - Cataratas	Oeste	231	21,50	2,70	1,71	0,799917	3194,87
17	Diamante do Norte	Noroeste	362	22,80	3,00	2,26	0,79942	3687,48
18	Icaraíma	Noroeste	385	22,40	3,10	2,15	0,79925	3597,59
19	Maringá	Norte Central	542	23,00	2,20	2,01	0,798825	3537,05
20	Cidade Gaúcha	Noroeste	381	22,80	2,00	1,96	0,794858	3456,1

O sistema utilizado para a simulação neste trabalho possui as mesmas características do sistema real estudado por Tonin (2017). Para a validação desta simulação foi realizado a comparação dos dados simulados pelo software SAM na cidade de Curitiba para as condições de instalação real, inclinação de 22° e desvio azimutal de 2° leste.

Nestas condições, a taxa de desempenho obtida foi de 0,82 com produção de energia de 2.998 kWh/ano e produtividade de 999 kWh/kWp. O sistema real analisado por Tonin (2017) obteve valores anuais de taxa de desempenho de 0,8770 e produtividade de 1359,24 kWh/kWp. Isto representa uma diferença de 6,95% na taxa de desempenho e de 36% na produtividade entre o sistema simulado e o sistema real. A diferença entre a simulação e o estudo real pode estar associada a variação de fatores de perda utilizados na simulação e no sistema real.

Os dados obtidos para as cidades foram dispostos no mapa das mesorregiões do estado do Paraná (ITGC modificado, 2010), de forma a destacar a máxima taxa de desempenho das principais cidades e capitais regionais do estado. É possível observar como a taxa de desempenho varia entre cidades da mesma mesorregião.

Dentre as seis cidades com melhores taxas de desempenho é possível notar que cinco estão acima dos 900 metros de altitude, com exceção de Paranaguá – Ilha do Mel (litoral do Paraná, ao nível do Mar). Regiões mais elevadas são caracterizadas por temperaturas mais amenas, o que diminui as perdas e aumenta o desempenho do sistema.

As seis primeiras cidades do ranking da Tab. 3, estão situadas em regiões mais ao Sul / Sudeste do estado e não apresentam temperaturas médias acima dos 21°C. As mesorregiões Metropolitana, Centro-Sul, Centro Oriental e Sudeste tem como característica, temperaturas médias menores em comparação as mesorregiões Norte-Central, Norte Pioneiro e Noroeste.

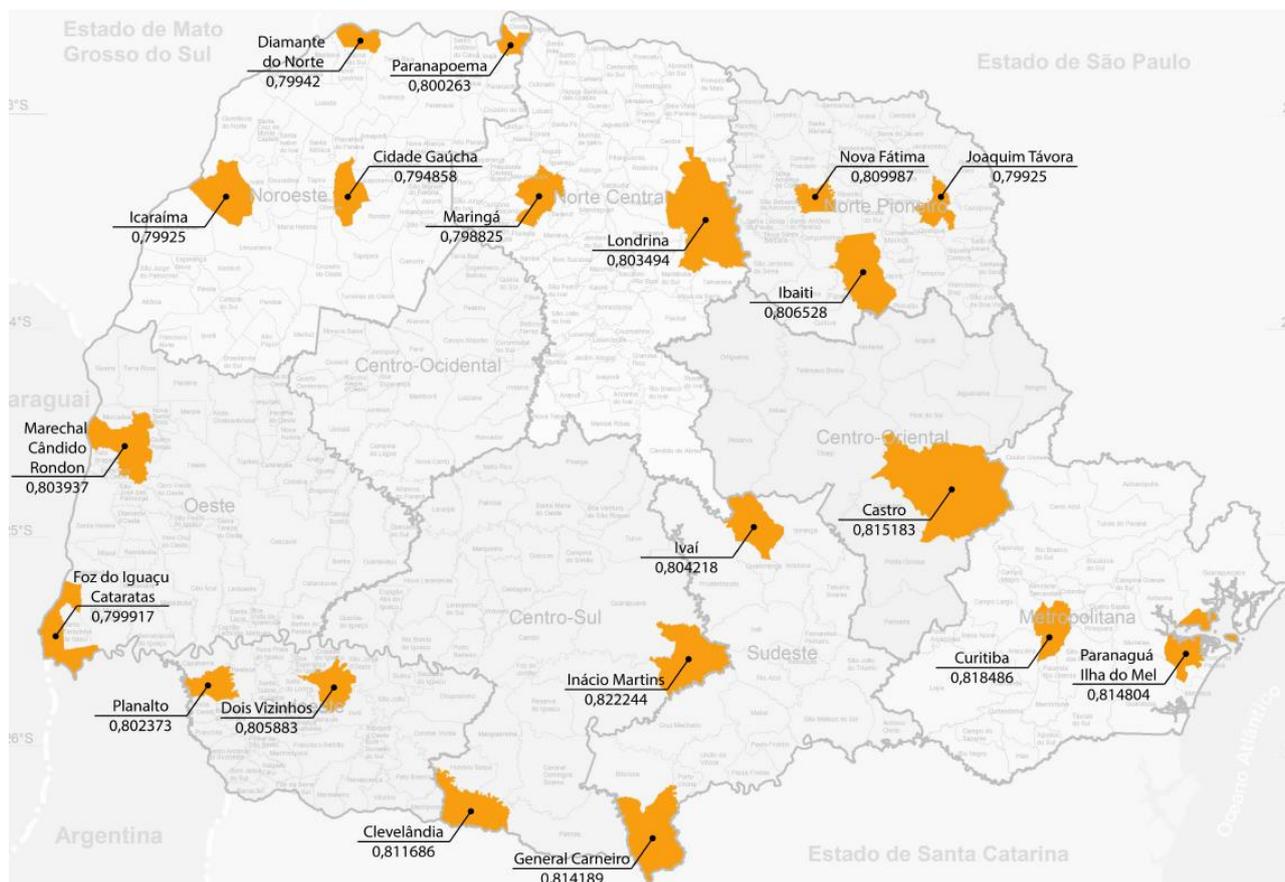


Figura 7 - Mapa do estado do Paraná com as taxas de desempenho para os municípios simulados.

#### 4. CONCLUSÕES

O crescimento de fontes renováveis de energia nos últimos anos em todo o mundo mostra um grande potencial de desenvolvimento da energia solar fotovoltaica. O Brasil possui níveis de irradiação superiores a países com maior capacidade instalada de energia fotovoltaica, porém com potencial muito pouco explorado. O estado do Paraná possui grande capacidade de geração de energia fotovoltaica, no entanto existem poucos estudos sobre os impactos no desempenho de sistemas FV com a mudança de região de instalação e de condições de instalação. A taxa de desempenho é o índice de mérito que contabiliza as perdas associadas do sistema em relação a energia disponibilizada para geração, fazendo-se necessário conhecer os fatores que afetam as perdas e sempre buscar os maiores índices de taxa de desempenho possíveis. No entanto, nem sempre é possível encontrar as condições ideais para instalação do sistema, com inclinação igual a latitude da região e sem desvios em relação ao norte para o hemisfério Sul, que resultaria na maior produção anual de energia elétrica.

A taxa de desempenho pode ser analisada sob o aspecto de que mesmo que a quantidade de energia gerada seja minimizada a medida em que as condições de instalação se afastavam da condição ideal, a irradiação incidente também será reduzida na mesma intensidade, desta forma a taxa de desempenho apenas é alterada significativamente com valores muito improváveis de instalação do sistema FV.

Através dos mapas de calor gerados foi possível observar que a taxa de desempenho pouco variou com a mudança da inclinação e orientação, sendo a mudança na região mais afetada de forma mais significativa a taxa de desempenho do que sua forma de instalação. Isso acontece porque as perdas são associadas a parâmetros climatológicos como temperatura, nebulosidade, chuvas e níveis de irradiação e que existe um quadrante próximo a latitude do local sem desvio azimutal, em que a taxa de desempenho permanece constante.

#### REFERÊNCIAS

- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2016 – Relatório final. Ministério de Minas e Energia – MME. Brasília – DF, 2016.
- EPIA. Global Market Outlook for Photovoltaics 2017-2021. Solarpower Europe Association, 2017
- Gasparin, Fabiano. P.; KREZNINGER, Arno. Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Painel. In: VI CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. Anais do VI CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.

- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão Regional do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas. Rio de Janeiro, 1990, v. 1.
- IEA, International Energy Agency. Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy. Paris, 2014.
- Marion, B.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Shugar, D.; Wenger, H.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.; Townsend, T. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, 31., 2005, Lake Buena Vista, Florida. Artigo, IEEE, 2005.
- ITCG, Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Divisão Política do Paraná. Curitiba, 2010.
- Pinho, J.T.; Galdino, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.
- Tiepolo, Gerson M. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Estado do Paraná. 2015. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015.
- Tonin, Fabianna Stumpf. “Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, na cidade de Curitiba”. 2017. 131 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

### **ANALYSIS OF THE PERFORMANCE RATIO OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN DIFFERENT MESOREGIONS OF THE STATE OF PARANÁ**

**Abstract.** *The state of Paraná energy matrix is composed mainly by hydraulic source, however most potential energy is already explored. As an alternative, Paraná have a great potencial for photovoltaic generation, the state shows irradiation levels higher than Germany, the fifth nation witch more installed capacity in the world. In order to maximize the grid-connected photovoltaic system's performance, the losses must be reduced as much as possible, seeking favorable conditions for the installation. Through performance parameters it is possible to measure system performance, performance ratio allows measures performance losses which can be caused by soiling, temperature, mismatch, shading and others. In this work, a grid-connected photovoltaic system similar to a 3 kWp real system was simulated in Software SAM (System Advisor Model), in nine of ten Paraná's mesoregions, with associated losses fixed and different inclinations from 0° up to 90° and orientation from 0° up to 350° to obtain the best condition for maximize performance ratio. For comparison the obtained data was disposed in a heat map for visual analysis and cities was ranked by performance ratio. In general the best performance ratio were in the cities of Inácio Martins, Curitiba and Castro, all three located in southern state, above 900 meters altitude and average temperatures lower than 18 °C. The lowest performance ratio was found in Icaraíma, Maringá and Cidade Gaúcha, cities located in northern state, where average temperatures are above 22 °C. The system presents a 6% deviation in comparison the real system, it can be explained by parameterization of losses and the simulation model, which treats all losses constants, in real scenario losses vary with temperatures and weather seasons.*

**Key words:** *Performance Ratio, Grid-connected photovoltaic system, Performance parameters.*