

COMPARAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ COM OUTROS ESTADOS E EUROPA – RESULTADOS PARCIAIS

Gerson Máximo Tiepolo – tiepolo@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento de Eletrotécnica

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento de Eletrotécnica, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Ênio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Silvia Vitorino Pereira – silvia.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Alisson Rodrigues Alves – alisson@pti.org.br

FPTI - Fundação Parque Tecnológico ITAIPU

Resumo. Estudos recentes têm demonstrado o excelente potencial do estado do Paraná para geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de energia (SFVCR), cujos valores de irradiação e de produtividade foram obtidos de acordo com a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006). Entretanto o número de SFVCR instalados no estado ainda é pequeno, necessitando o estado de maiores incentivos para a disseminação desta fonte. Com isto, o objetivo desta pesquisa foi o de comparar o potencial encontrado no estado do Paraná com outros estados da federação e com a Europa, evidenciando ainda mais o enorme potencial existente no estado, sendo um dos resultados obtidos foi a elaboração do Atlas Fotovoltaico Brasileiro com os mesmos critérios utilizados pela Comissão Europeia, o qual é composto por um conjunto de mapas com valores de Irradiação e de Produtividade Estimada Total Anual, Média Diária Sazonal e Média Diária Mensal. Os resultados desta pesquisa poderão contribuir para a elaboração de políticas públicas específicas de forma a ampliar do uso dessa fonte de energia renovável no estado do Paraná.

Palavras-chave: Energia Solar, Potencial Fotovoltaico, Atlas Fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

O estado do Paraná possui área de 199.880 km², com uma população de 10.444.526 habitantes, distribuída em 399 municípios, e que apresentou no ano de 2013 um consumo de energia elétrica de aproximadamente 27 TWh (IPARDES, 2013), sendo um dos maiores produtores de energia elétrica através das hidroelétricas, devido à grande bacia hidrográfica existente no estado. Mas apesar deste grande potencial hídrico, a sua expansão na matriz elétrica encontra-se em declínio devido à dificuldade de explorar o potencial ainda não utilizado, e também devido às pressões da sociedade e entidades públicas e ambientais.

Com isto, o estado do Paraná tem apresentado uma pré-disposição para análise e aplicação mesmo experimental de outras fontes de energia para geração de energia elétrica como a biomassa, eólica e solar fotovoltaica, esta última mais recentemente através de SFVCR onde poucas pesquisas foram desenvolvidas até o momento e com poucos sistemas implantados no estado, apesar do potencial solar fotovoltaico expressivo conforme pesquisas já realizadas e publicadas por Tiepolo *et al.* (2014a), Tiepolo *et al.* (2014b), Tiepolo (2015).

Dos SFVCR instalados no estado até o momento, destacam-se o do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Curitiba com 2,1 kWp (instalada em dezembro de 2011 antes da Resolução 482/2012 da ANEEL), e outra de 8,64 kWp na empresa ELCO Engenharia (homologada em outubro de 2013), sendo esta a primeira ligação à rede elétrica de distribuição no sistema de micro geração de energia fotovoltaica no Paraná seguindo a Resolução Normativa da ANEEL (Tiepolo, 2015).

Apesar destas iniciativas e das publicações já realizadas através de pesquisas e palestras desenvolvidas, ainda assim o estado não tem apresentado um número expressivo de SFVCR instalados, mesmo em locais que apresentam valores altos de irradiação como as regiões Norte, Oeste, Noroeste e Centro-Oeste do Paraná.

Diante disto, o objetivo desta pesquisa é o de comparar o potencial fotovoltaico do estado do Paraná com os outros estados da federação e com a Europa, demonstrando o excelente potencial apresentado no estado.

2. METODOLOGIA

Para efetuar a comparação do potencial fotovoltaico Total Anual no plano inclinado no Estado do Paraná com outros estados, foram analisados os dados de irradiação no plano inclinado do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.* 2006).

Para realizar esta análise, foi elaborado o Mapa Fotovoltaico Brasileiro – Total Anual com a divisão dos estados de acordo com dados do IBGE – 2009, com os mesmos critérios utilizados pela European Commission (2012) na elaboração dos mapas europeus, e cuja escala de cores e valores apresenta a estimativa de irradiação e de produtividade total anual (*yearly system yield – Y_f*).

As premissas adotadas para estimar a produtividade foram: potência do sistema de 1 kWp, taxa de desempenho (*performance ratio – PR*) de 75%, inclinação do sistema fotovoltaico igual a latitude do local, e orientação do sistema fotovoltaico voltado para o Equador.

A Fig. 1 mostra a escala adotada com as cores e valores de Irradiação e Produtividade Total Anual, dentro dos requisitos pré-estabelecidos.

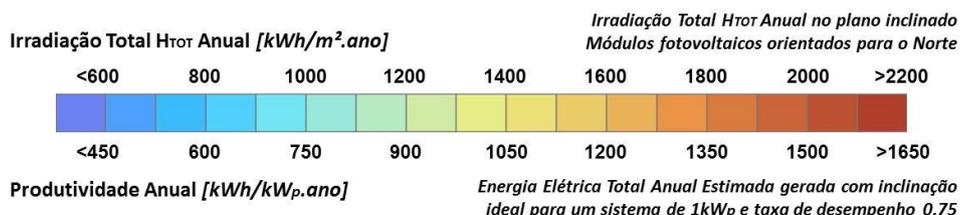


Figura 1 - Legenda com valores de Irradiação (H_{TOT}) e de Produtividade Estimada Total Anual no Plano Inclinado.

Fonte: Tiepolo (2015)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 mostra o Mapa Fotovoltaico Brasileiro e em destaque o Mapa Fotovoltaico do estado do Paraná – Total Anual. O Mapa Fotovoltaico Brasileiro é uma amostra do Atlas Fotovoltaico Brasileiro que possui também um conjunto de 12 mapas mensais e 4 mapas sazonais com a estimativa de irradiação e de produtividade (Tiepolo, 2015) mostrado ao final deste trabalho como ANEXO.

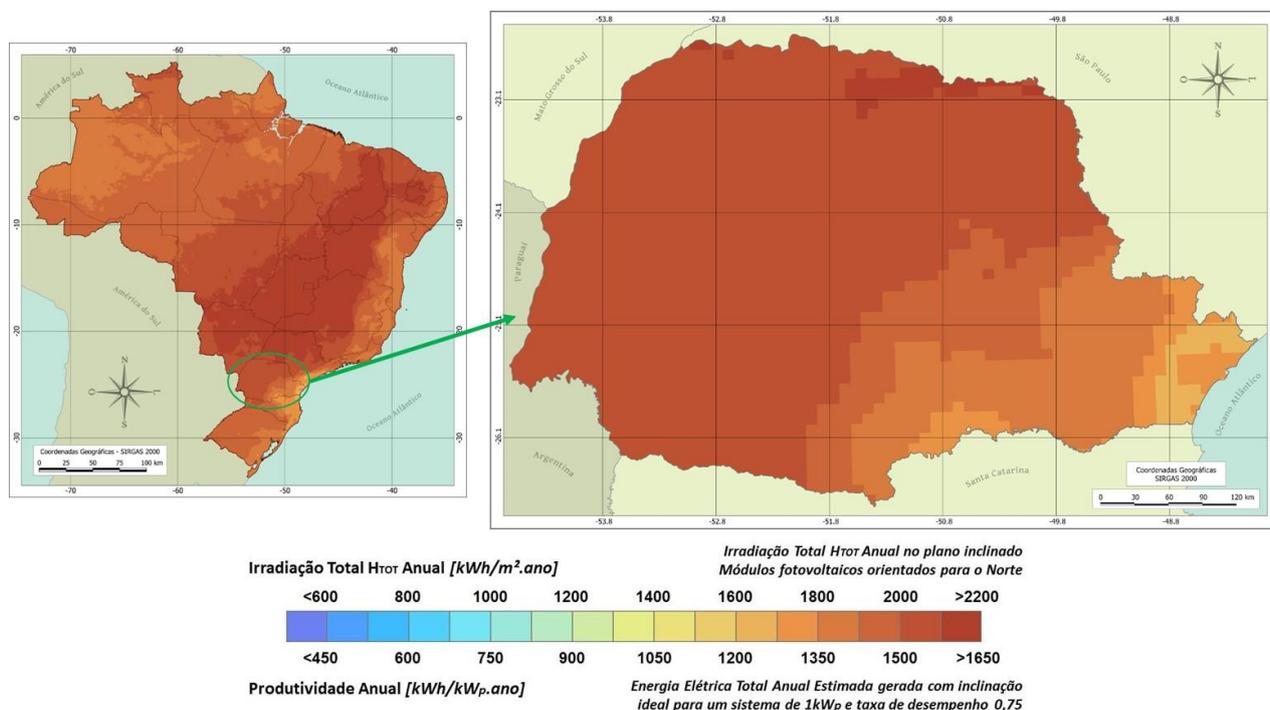


Figura 2 - Mapa Fotovoltaico Brasileiro e Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná - Total Anual (Plano Inclinado - H_{TOT}).

Fonte: Adaptado de Tiepolo *et al.* (2014a), Tiepolo *et al.* (2014b), Tiepolo (2015).

3.1 Comparação do Potencial Fotovoltaico encontrado no Paraná com outros estados e média Brasil

Através da análise das informações do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), obteve-se os valores de Irradiação Total (H_{TOT}) e de Produtividade Estimada Anual máxima, mínima e média no plano inclinado para cada Estado mais o Distrito Federal, com base nos pixels que fazem parte da região geográfica de cada unidade federativa (resolução 10 km x 10 km). Os dados obtidos são apresentados na Tab. 1, onde foi adicionada uma coluna com a diferença em percentual da média obtida no Paraná em relação à média apresentada em cada um dos outros estados, Distrito Federal e média Brasil.

Tabela 1 - Valores de Irradiação Total (H_{TOT}) e de Produtividade Gerada Estimada Total Anual no plano inclinado encontrados nas unidades federativas e no Brasil para uma TD 75%.

Fonte: Tiepolo (2015)

Estado	Valor de Irradiação Total (H_{TOT}) Anual no plano inclinado (kWh/m ² .ano)			Valor de Produtividade Total Anual no Plano Inclinado (kWh/kWp.ano)			Diferença percentual da Média obtida no Paraná em relação ao estado
	Total Anual MÍNIMO	Total Anual MÁXIMO	Total Anual MÉDIA	Total Anual MÍNIMO	Total Anual MÁXIMO	Total Anual MÉDIA	
Acre	1.873	2.057	1.933	1.405	1.542	1.450	2,73%
Alagoas	1.886	2.043	1.970	1.415	1.532	1.478	0,80%
Amapá	1.844	2.020	1.903	1.383	1.515	1.427	4,39%
Amazonas	1.795	2.091	1.898	1.346	1.568	1.423	4,65%
Bahia	1.803	2.246	2.055	1.352	1.684	1.541	-3,34%
Ceará	1.983	2.181	2.079	1.488	1.636	1.559	-4,47%
Distrito Federal	2.127	2.195	2.156	1.596	1.646	1.617	-7,89%
Espírito Santo	1.790	1.983	1.888	1.342	1.487	1.416	5,19%
Goiás	2.068	2.215	2.150	1.551	1.662	1.613	-7,64%
Maranhão	1.848	2.163	2.016	1.386	1.622	1.512	-1,49%
Mato Grosso	1.853	2.163	2.047	1.389	1.622	1.535	-2,97%
Mato Grosso do Sul	1.795	2.186	2.103	1.346	1.639	1.577	-5,55%
Minas Gerais	1.850	2.220	2.077	1.388	1.665	1.558	-4,38%
Pará	1.859	2.088	1.961	1.394	1.566	1.471	1,28%
Paraíba	1.900	2.197	2.068	1.425	1.648	1.551	-3,94%
Paraná	1.651	2.119	1.986	1.238	1.589	1.490	
Pernambuco	1.870	2.184	2.040	1.403	1.638	1.530	-2,64%
Piauí	2.058	2.227	2.141	1.544	1.670	1.606	-7,25%
Rio de Janeiro	1.785	2.034	1.912	1.339	1.525	1.434	3,85%
Rio Grande do Norte	1.941	2.168	2.054	1.455	1.626	1.540	-3,29%
Rio Grande do Sul	1.737	2.013	1.927	1.303	1.510	1.445	3,08%
Rondônia	1.907	2.020	1.954	1.430	1.515	1.466	1,62%
Roraima	1.861	2.116	1.961	1.396	1.587	1.471	1,25%
Santa Catarina	1.644	2.031	1.852	1.233	1.523	1.389	7,26%
São Paulo	1.658	2.176	2.053	1.243	1.632	1.540	-3,28%
Sergipe	1.911	2.057	1.965	1.433	1.542	1.474	1,07%
Tocantins	1.986	2.188	2.086	1.489	1.641	1.564	-4,77%
BRASIL	1.644	2.246	2.001	1.233	1.684	1.501	-0,76%

Com base neste levantamento, foram obtidas as seguintes informações de Irradiação e de Produtividade Total Anual no Brasil em suas unidades federativas:

- Menor valor Total Anual apresentado no Brasil: Santa Catarina com 1.644 kWh/m².ano e 1.233 kWh/kWp.ano;
- Maior valor Total Anual apresentado no Brasil: Bahia com 2.246 kWh/m².ano e 1.684 kWh/kWp.ano;
- Menor Média Total Anual apresentado no Brasil: Santa Catarina com 1.852 kWh/m².ano e 1.389 kWh/kWp.ano;
- Maior Média Total Anual apresentado no Brasil: Distrito Federal com 2.156 kWh/m².ano e 1.617 kWh/kWp.ano;
- Média Total Anual apresentado no Brasil: 2.001 kWh/m².ano e 1.501 kWh/kWp.ano.

Ao se observar o Mapa Fotovoltaico Brasileiro – Total Anual se pode verificar que os menores valores de irradiação e produtividade são encontrados principalmente na região Sul, parte do Sudeste e Norte, e os maiores valores na região Nordeste, Centro-Oeste e parte do Sudeste.

Os valores obtidos mostram 12 estados com médias inferiores ao Paraná, e 14 estados com médias superiores, sendo a média do estado do Paraná praticamente igual à média obtida no Brasil (diferença inferior a 1%). Em relação as maiores médias anuais encontradas (Distrito Federal – 5.779 km², Goiás – 340.111 km² e Piauí 251.611 km²), o estado do Paraná (199.880 km²) apresentou uma produtividade aproximada 7,5% inferior, e em relação à Bahia (estado com maior valor Total Anual encontrado), a média é apenas 3,34% inferior.

Outro ponto importante de comparação é quanto aos maiores valores de Irradiação e de Produtividade Estimada Total Anual que ocorre no Brasil e no Paraná. Em termos de Brasil, o ponto com o maior valor ocorre no norte do estado da Bahia, próximo do Lago de Sobradinho e da divisa com o sul do Piauí (região de clima semi-árido), com valores de 2.246 kWh/m².ano e 1.684 kWh/kWp.ano. No Paraná o ponto com maior valor ocorre no município de Sertaneja, na região norte do estado e próximo da divisa com São Paulo, com valores de 2.119 kWh/m².ano e 1.589 kWh/kWp.ano, e que representa menos de 6% inferior ao máximo encontrado no Brasil, o que evidencia o grande potencial de geração de energia elétrica através de SFVCR no estado.

3.2 Comparação do Potencial Fotovoltaico encontrado no Estado do Paraná com a Europa

Para comparação dos dados de Irradiação e de Produtividade Estimada Total Anual do estado do Paraná com a Europa, foi utilizado o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e o Mapa Fotovoltaico da Europa, ambos Total Anual. A Fig. 3 mostra os dois mapas elaborados com as mesmas premissas, escala de valores e cores. Exceção quanto à orientação dos módulos fotovoltaicos, que no Paraná por estarem no hemisfério Sul são orientados para o Norte geográfico, enquanto que módulos instalados na Europa por estarem no hemisfério Norte são orientados para o Sul geográfico.

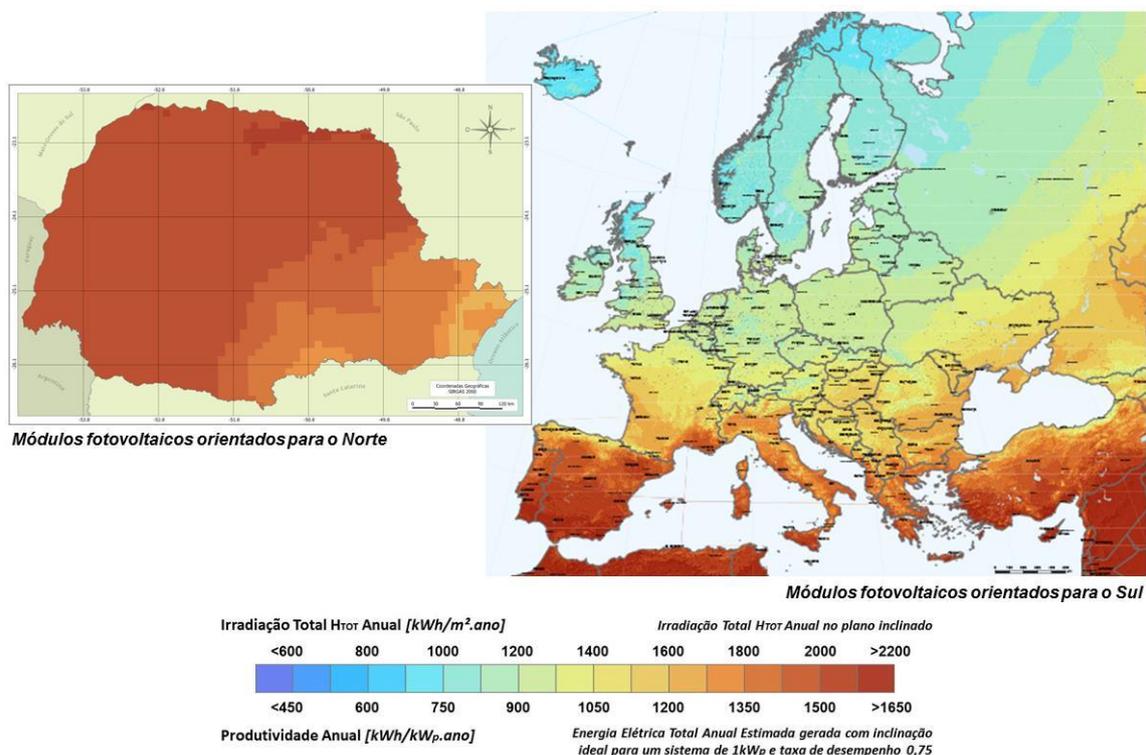


Figura 3 - Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná e Mapa Fotovoltaico da Europa - Total Anual.
Fonte: Adaptado de Tiepolo *et al.* (2014a), Tiepolo *et al.* (2014b), Tiepolo (2015), Šuri *et al.* (2007), Huld *et al.* (2012a), EUROPEAN COMMISSION (2012).

Para análise dos dados foram utilizados os dados de irradiação Total Anual no plano inclinado apresentados por 27 países da União Europeia (EU-27) mais 6 países candidatos na época do levantamento (Huld *et al.*, 2012b).

De acordo com os dados obtidos, a Média Total Anual encontrada no estado do Paraná só é inferior à Média encontrada em Chipre (em torno de 10% inferior, cujo país está situado numa ilha no extremo sul da Europa próximo da Turquia e Síria), e a Malta (em torno de 8% inferior, cujo país também está situado numa ilha no extremo sul da Europa, próximo da Sicília), ambos praticamente na mesma latitude em torno de 35° graus Norte.

A média encontrada no Paraná é ainda praticamente a mesma que a encontrada em Portugal (menos de 1% inferior) e superior aos demais 30 países contidos neste levantamento, cujos percentuais variam entre 1,97% superior (caso da Espanha) e 109,18% superior (caso da Islândia).

Ao comparar-se a Produtividade Estimada Total Anual Média apresentada pelos principais países europeus em relação ao estado do Paraná, pôde-se verificar que a Média do Paraná é 58,75% superior à Alemanha, 13,48% superior à Itália, 1,97% superior à Espanha, 31,28% superior à França, 60,46% superior à Bélgica e 71,19% superior ao Reino Unido. Estes percentuais representam a quantidade Média Total Anual de energia elétrica que um SFVCR pode gerar a mais no Paraná em relação a cada um destes países.

4. CONCLUSÃO

O incentivo à geração de energia elétrica através de fontes renováveis de energia tem crescido gradativamente de forma Global e também no Brasil. Quanto ao estado do Paraná, a participação na geração de energia elétrica através de hidroelétricas é muito alta (próximo de 93%), necessitando o estado da participação de outras fontes renováveis como a solar fotovoltaica, principalmente quando se observa que esta fonte permite a geração de energia elétrica de forma distribuída e próxima ao ponto de consumo, de forma limpa e renovável.

A necessidade quanto ao mapeamento de todo o estado e a possibilidade de efetuar comparações com outros estados e países, fez com que fossem gerados mapas na mesma escala de cores e valores, e com as mesmas premissas utilizadas pela Comissão Europeia.

Comparando a Média Total Anual de todos os estados da federação com o Paraná, 12 estados apresentaram médias inferiores ao Paraná, sendo a média do estado do Paraná praticamente igual à média do Brasil.

Quanto à comparação com a Europa, o mapa apresentado mostra claramente o excelente potencial do Paraná em relação aos países europeus, com média similar a Portugal e superior aos demais 29 países pesquisados, sendo ainda aproximadamente 59% superior à média apresentada na Alemanha, país com a maior capacidade instalada.

A elaboração destas comparações mostra claramente o excelente potencial do estado do Paraná, de forma a incentivar ainda mais a aplicação de investimentos nesta área.

Entretanto cabe ressaltar que estas comparações foram realizadas com a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), necessitando aprofundar mais as pesquisas nesta questão principalmente com a utilização de dados de irradiação mais atuais, preferencialmente com um histórico de dados maior, o que será possível quando da geração de uma nova versão do Atlas, onde então será possível efetuar uma análise mais atual, assim como comparar com as informações geradas nesta pesquisa.

5. ANEXO

Para a apresentação dos Mapas Fotovoltaico Brasileiro com a Média Diária Mensal e Sazonal no plano inclinado (H_{TOT}), foi utilizada uma escala “ajustada e ampliada” para melhor representar os valores mais altos de irradiação e de geração de energia elétrica estimada que ocorrem em determinados meses do ano, melhorando a precisão dos valores apresentados nos mapas.

Com isto, foram acrescentadas mais três cores e intervalos na escala anual utilizada para representação dos valores pela European Commission (2012) e adotado neste estudo, convertida em valores diários de irradiação e de produtividade. A escala ajustada é apresentada na Fig. 4.

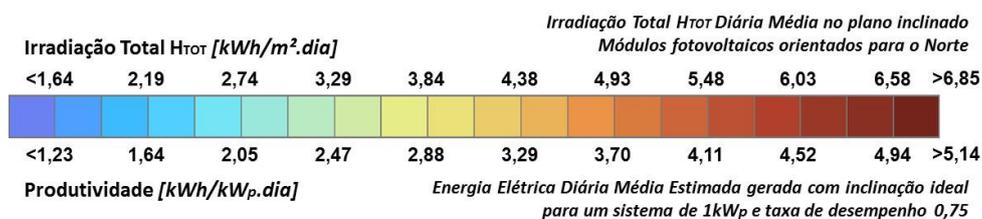


Figura 4 - Escala de cores e valores ampliada contendo mais três cores (as três últimas ao lado direito da escala) para melhor representar os valores altos de irradiação e de produtividade estimada que ocorrem em determinados meses do ano.

Fonte: Tiepolo (2015)

A Fig. 5 mostra os Mapas Fotovoltaicos Mensais Brasileiro e a Fig. 6 mostra os Mapas Fotovoltaicos Sazonais Brasileiro.

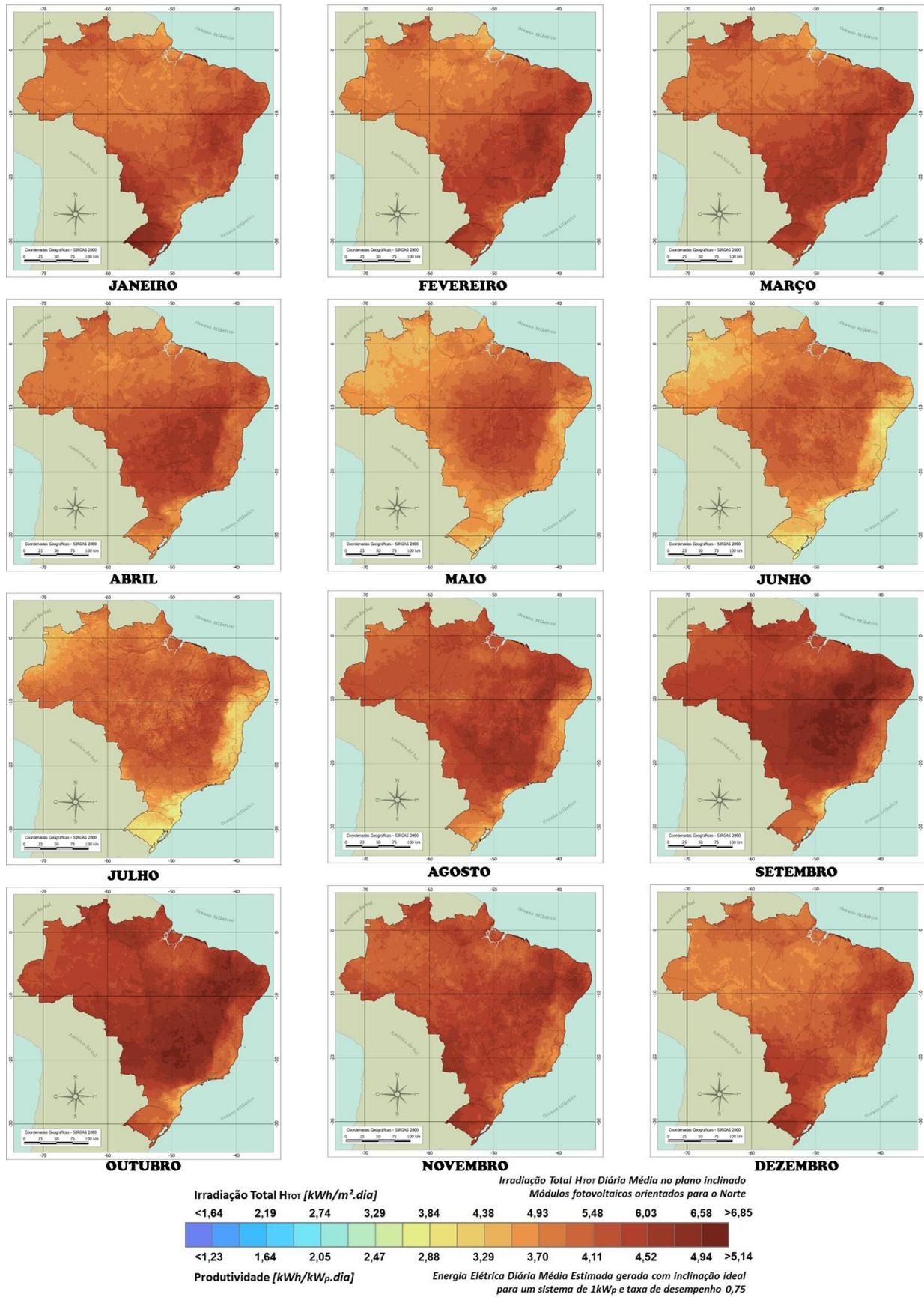


Figura 5 - Mapa Fotovoltaico Brasileiro. Média Diária Mensal (Plano Inclinado - H_{TOT}) – Janeiro a Dezembro.

Fonte: Tiepolo (2015)

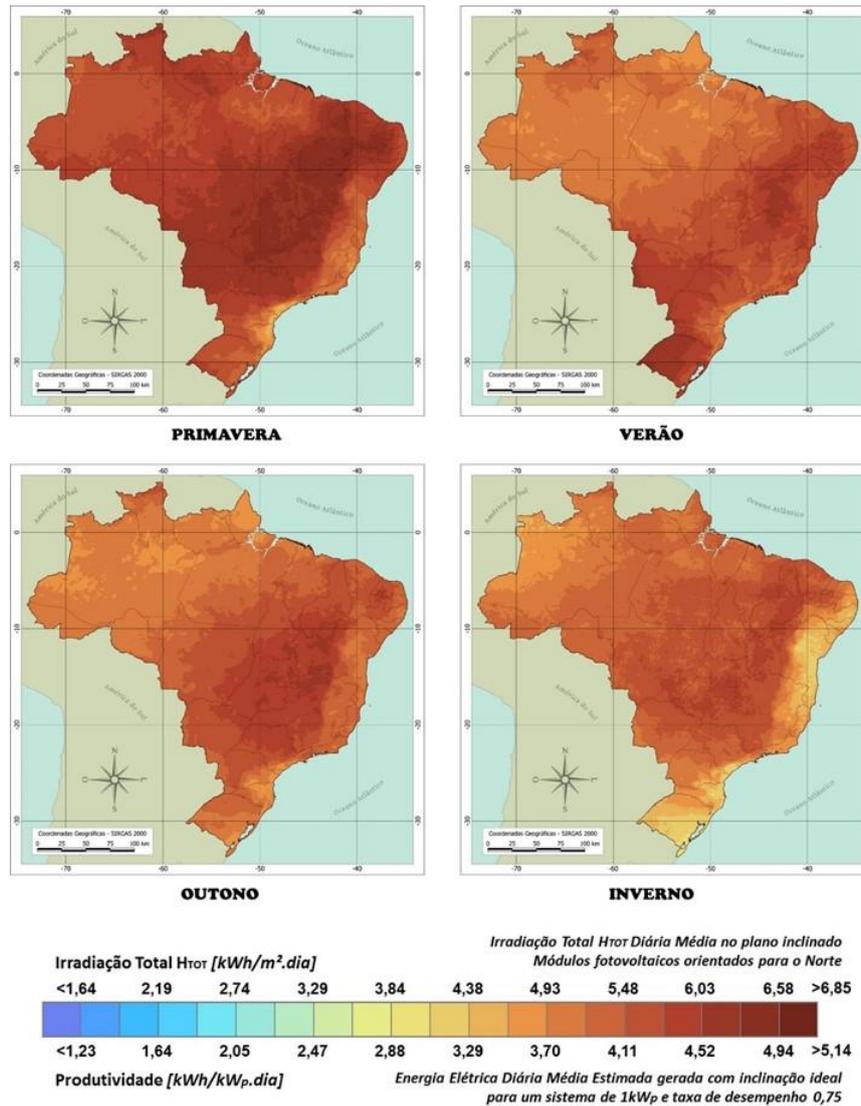


Figura 6 - Mapa Fotovoltaico Brasileiro. Média Diária Sazonal (Plano Inclinado - H_{TOT}) – Primavera a Inverno.
Fonte: Tiepolo (2015)

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela colaboração com o fornecimento de dados de irradiação do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) e no auxílio na elaboração dos mapas fotovoltaicos do estado do Paraná com os requisitos especificados, a UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) pelo apoio e infra-estrutura oferecidas, e a ITAIPU Binacional através da FPTI (Fundação Parque Tecnológico ITAIPU) pelo apoio e financiamento dos recursos para realização destas pesquisas.

REFERÊNCIAS

- EUROPEAN COMMISSION. “Solar radiation and photovoltaic electricity potential country and regional maps for Europe”, Institute for Energy and Transport (IET), 2012, Disponível online em <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur.htm>, Acessado em Junho 2013;
- Huld, T.; Müller, R.; Gambardella, A. “A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa”, Solar Energy, 86, 1803-1815, 2012a;
- Huld, T.; Pascua, I. P. “Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries”, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit, 2012b.
- IPARDES. “Anuário Estatístico do Paraná 2013”, 2013, Disponível em www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2013/estrutura.html, Acessado em Outubro 2014.

- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Rütther, R. “Atlas Brasileiro de Energia Solar”, São José dos Campos, 1ª Edição, p. 34, 2006, Disponível online em http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf, Acessado em Junho 2014;
- Šúri, M.; Huld, T. A.; Dunlop, E. D.; Ossenbrink, H. A. “Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries”, *Solar Energy*, 81, 1295–1305, 2007, Disponível em <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>, Acessado em Fevereiro 2014;
- Tiepolo, G.; Canciglieri, O.; Urbanetz, J.; Viana, T. “Photovoltaic Generation Potential of Paraná State, Brazil – a Comparative Analysis with European Countries”, Apresentado no ISES Solar World Congress 2013, Cancún, México, Publicado no *Energy Procedia*, Volume 57, 2014, pages 725-734, 2014a;
- Tiepolo, G.; Canciglieri, O.; Urbanetz, J.; Viana, T.; Pereira, E. B. “Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no estado do Paraná com Alemanha, Itália e Espanha”, V Congresso Brasileiro de Energia Solar – V CBENS, Recife, 2014b;
- Tiepolo, G. “Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná”, Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS, Curitiba, 2015;

PHOTOVOLTAIC POTENTIAL COMPARISON OF PARANÁ STATE TO OTHER STATES AND EUROPE - PARTIAL RESULTS

Abstract. *Recent studies have demonstrated the excellent potential in Paraná State for electricity generation through grid connected photovoltaic systems, whose values irradiation and yield were obtained according to the Brazilian Atlas Solar (2006). However the number of installed SFVCR the state is still small, requiring the state to greater incentives for the dissemination of this source. With this, the aim of this study was to compare the potential found in Paraná state with other states of the federation and Europe, highlighting even more the enormous potential in the state, one of whose results was the development of the Brazilian Photovoltaic Atlas with the same criteria used by the European Commission, which is composed of a set of maps with irradiation values and Estimated Total Annual Productivity, considering both Daily Averages, Seasonal Averages, and Monthly Averages. The results of this research may contribute to the development of specific public policies to expand the use of this renewable energy source in the state of Parana.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic Potential, Photovoltaic Atlas*