

ATLAS DE ENERGIA SOLAR DO ESTADO DO PARANÁ - RESULTADOS

Gerson Máximo Tiepolo – tiepolo@utfpr.edu.br

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

Enio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

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

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

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

Silvia Vitorino Pereira – silvia.pereira@inpe.br

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

André Rodrigues Gonçalves – andre.goncalves@inpe.br

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

Francisco José Lopes de Lima – francisco.lopes.lima@gmail.com

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

Rodrigo Santos Costa – rodrigo.costa@inpe.br

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

Alisson Rodrigues Alves – alisson@pti.org.br

Fundação Parque Tecnológico ITAIPU - Centro Internacional de Hidroinformática

Resumo. O Paraná é o maior produtor de energia elétrica do Brasil, quase totalmente originada por hidroelétricas e que corresponde a 96% do total gerado no estado. Entretanto, o aproveitamento desta fonte está em declínio em função dos impactos ambientais e devido à pressão da sociedade com relação as questões sociais e econômicas ocasionadas. A publicação da Resolução 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e após a sua revisão através da Resolução 687/2015 que regulamenta a microgeração e minigeração, se tornou possível utilizar os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) de forma a complementar a matriz elétrica brasileira em grandes empreendimentos e na forma de geração distribuída (GD). Entretanto para desenvolver projetos de qualidade nesta área, é necessário que se conheça com o maior grau de precisão possível o potencial solar da região. O objetivo deste trabalho é o de apresentar os principais resultados obtidos com a elaboração do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, resultado da parceria entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Itaipu Binacional através do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e do Centro Internacional de Hidroinformática (CIH). Os produtos voltados à energia solar no Paraná foram desenvolvidos pelo INPE por meio do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (INPE/LABREN) com o apoio da UTFPR por meio do Laboratório de Energia Solar (UTFPR/LABENS), atuando na validação e interpretação dos dados, fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e das informações obtidas para o Paraná no âmbito do projeto do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2a edição. Os resultados obtidos neste trabalho mostram o excelente potencial de radiação solar e fotovoltaico no Estado do Paraná, superior a muitos países europeus onde esta fonte de energia renovável já está bastante disseminada.

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

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a energia elétrica em âmbito global é gerada na sua maior parte através de combustíveis fósseis e nuclear, com uma tendência de diminuição da participação na matriz elétrica mundial destas fontes, e ao mesmo tempo maior participação de outras fontes renováveis para geração de energia elétrica como a biomassa, eólica e solar.

Quanto ao Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica ainda tem sido por fontes hidrotérmicas, onde as termoeletricas movidas a combustíveis fósseis e nuclear tem tido uma participação cada vez maior, seguidas das fontes renováveis não-hidráulicas como a biomassa e eólica, sendo ainda muito pequena a participação da fonte solar na matriz elétrica brasileira. A participação das fontes energéticas na produção de energia elétrica na matriz elétrica brasileira e global é mostrada na Fig. 1.

A maior participação da fonte hidráulica na matriz elétrica brasileira leva a uma tarifa de energia elétrica não tão elevada por esta possuir um custo de produção mais baixo quando comparada as demais fontes utilizadas. Mas quando associada às precipitações abaixo das médias históricas que têm ocorrido em grande parte do território, notadamente a partir de 2012, e consequentemente ao maior despacho das termoeletricas utilizadas para suportar o déficit de geração, gera como consequência um maior custo médio da energia e indica a necessidade de se repensar no modelo de geração de energia elétrica adotado no país.

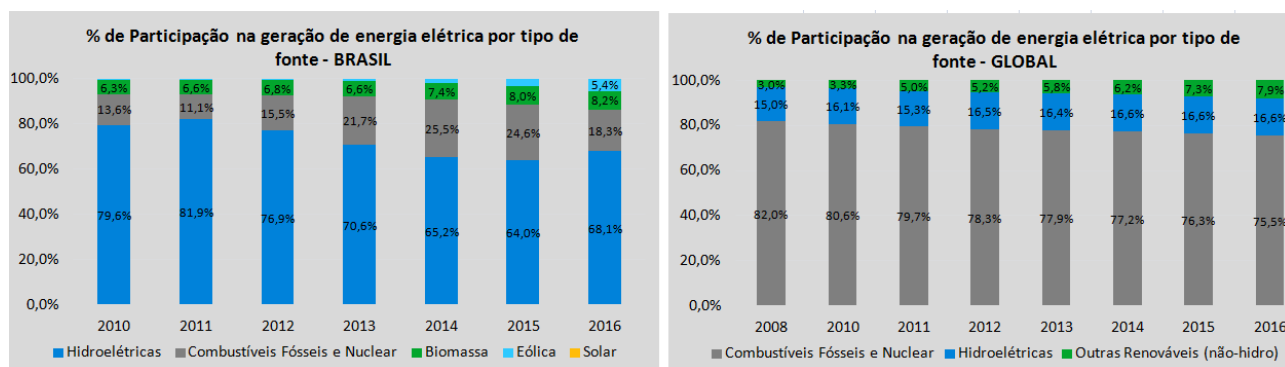


Figura 1 - Produção de Energia Elétrica Global e Brasil por tipo de fonte. Fonte: Adaptado de REN21 (2010;2011;2012;2013;2014;2015;2016;2017) e MME (2012;2013;2014;2015;2016a;2017).

De acordo com o Operador Nacional de Sistemas (ONS) em 26/10/2017, os níveis dos reservatórios são os mais baixos já registrados, menores ainda que os de 2001 que levaram a um racionamento de energia elétrica no Brasil. O nível na Região Sudeste / Centro-Oeste, a maior responsável pela geração de energia elétrica no país, está em 17,96% de sua capacidade, na Região Sul 44,79%, na Região Nordeste 6,61% (sendo Sobradinho apenas 3,14%) e na Região Norte com 22,49% (ONS, 2017). Sem ter outra alternativa, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), realizou audiência pública e publicou nota onde altera os valores cobrados pelas bandeiras tarifárias: a bandeira Amarela passa de R\$2,00 para R\$1,00 a cada 100kWh consumidos, a Bandeira Vermelha Patamar 1 continua R\$3,00 a cada 100kWh consumidos e a Bandeira Vermelha Patamar 2 passa de R\$3,50 para R\$5,00 a cada 100kWh consumidos, aumento neste último de 42,86% (todos os valores sem impostos), o que dá uma indicação da gravidade em que se encontra o sistema elétrico e a sua atual dependência das fontes hidrotérmicas (ANEEL, 2017).

Entretanto, o repasse destes valores para o consumidor final não resolve o problema da geração, apenas indica a forma como ela tem ocorrido e repassa os custos extras ocorridos pela geração termoeletrica às tarifas de energia elétrica. Estes fatores contribuem para a mudança do modelo hidrotérmico adotado pelo governo federal, onde se evidencia ainda mais a necessidade quanto a utilização de outras fontes de geração de energia elétrica como a eólica e a solar.

Sob o aspecto de planejamento energético de longo prazo, estima-se que o Brasil necessitará em 2050 algo em torno de 1.605 TWh/ano, um acréscimo de aproximadamente 1.000 TWh/ano entre 2015 e 2050 (MME, 2016b). Diante desta visão e das barreiras e limitações de cada fonte, torna-se ainda mais necessária a diversificação da matriz elétrica brasileira em todas as regiões do Brasil de forma a atender as demandas futuras.

Este cenário tem também favorecido a geração distribuída (GD), que fornece energia elétrica próxima ao ponto de consumo, contribuindo também na diminuição das perdas de energia, que em 2016 foram de aproximadamente 16%, o equivalente a toda energia elétrica gerada por Itaipu ao longo de um ano (TIEPOLO *et al.*, 2012; MME, 2017).

Em termos de Brasil, o estado do Paraná é o maior produtor de energia elétrica através das hidroeletricas, responsáveis por cerca de 96% da geração no estado (MME, 2017). Apesar disto, cerca de 2/3 da energia gerada no Paraná abastece principalmente as regiões Sudeste e Centro-Oeste do país.

Apesar deste grande potencial hídrico, a expansão de hidroeletricas na matriz elétrica brasileira e paranaense 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, necessitando o estado de pesquisas através de outras fontes de energia complementares, principalmente através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede - SFVCR (TIEPOLO, 2016).

Fatores restritivos à implantação de SFVCR, como os custos dos componentes, possuem cada vez menos influência quanto à decisão de se instalar estes sistemas, visto que os valores têm continuamente diminuído no mercado internacional, aliado ao aumento do custo da energia elétrica no Brasil, com uma forte tendência de reajustes acima da inflação nos próximos anos.

De forma geral, o Brasil e o Paraná começam a apresentar condições extremamente favoráveis para o incentivo à implantação deste tipo de fonte em sua matriz elétrica, o que faz com que pesquisas sobre esta forma de geração de energia elétrica sejam elaboradas, principalmente sobre a distribuição espacial da radiação solar no território paranaense, cuja qualidade dos dados na superfície são imprescindíveis para a elaboração de bons projetos.

2. METODOLOGIA

Para estimação dos valores de irradiação em superfície, foi utilizado neste trabalho o modelo BRASIL-SR. O BRASIL-SR é um modelo físico que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos”, de forma a solucionar, de forma rápida, a equação de transferência radiativa. Este método se baseia na decomposição do campo de radiação em dois fluxos de radiação perpendiculares à superfície – um fluxo no sentido do topo da atmosfera e, outro, incidente na superfície – e assim chegar à solução da equação de transferência radiativa com o auxílio de parâmetros determinados, de forma estatística, a partir de imagens de satélite.

Este modelo foi desenvolvido na Alemanha, sendo inicialmente adaptado para as condições climáticas brasileiras pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e segue em constante aprimoramento pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (LABREN/CCST/INPE). O modelo teve diversas melhorias implementadas em suas parametrizações, como a metodologia para identificação de cobertura de nuvens, perfis atmosféricos, conteúdo de água precipitável (Martins, 2003), aerossóis atmosféricos (Costa, 2012), dentre outras.

A cobertura de nuvens é considerada o principal fator de modulação da transmitância atmosférica (Martins, 2003), sendo que as demais propriedades óticas da atmosfera são parametrizadas a partir de variáveis meteorológicas em seus valores médios mensais, como temperatura do ar e umidade relativa, entre outros fatores que são utilizados pelo modelo.

Os dados de temperatura do ar e de umidade relativa média mensal foram gerados a partir dos valores médios diários, observados em estações meteorológicas automáticas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A cobertura de nuvens (C_{eff}) é determinada a partir de análises estatísticas de imagens de satélite e permitem ao modelo inferir a transmitância em função não só da presença da nebulosidade, mas também pela variação espacial da sua profundidade ótica (MARTINS, 2003; COSTA, 2012). Como a nebulosidade é considerada o principal fator de transmitância atmosférica, o modelo assume que o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está, linearmente, distribuído entre as duas condições extremas – céu claro e céu completamente encoberto por nuvens. É assumida, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletido no topo da atmosfera, conforme Eq. (1):

$$F_{\downarrow} = \left\{ (1 - C_{eff}) \cdot T_{clear} + C_{eff} \cdot T_{cloud} \right\} \cdot F_0 \quad (1)$$

onde: $F_{\downarrow}$ é o fluxo de radiação solar global incidente na superfície, F_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera, T_{clear} e T_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente. Desta forma, a determinação da radiação solar incidente na superfície pode ser estimada a partir destas duas componentes independentes.

A Fig. 2 apresenta um fluxograma descritivo dos principais procedimentos do modelo BRASIL-SR para parametrização dos processos radiativos na atmosfera e que foram utilizados neste levantamento.

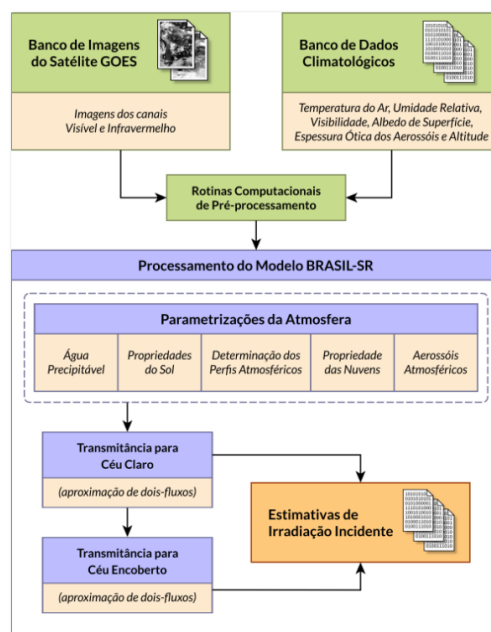


Figura 2 - Fluxograma simplificado de execução do modelo BRASIL-SR

Os valores de irradiação diária foram estimados pelo modelo BRASIL-SR com base em 134.966 imagens do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e das demais informações necessárias já descritas, compreendendo o período entre 1999 e 2015. A partir destes dados foram calculadas as médias de irradiação mensal, sazonal e anual para o Estado do Paraná.

Para a validação dos resultados apresentados neste estudo, foram utilizadas integrais diárias de irradiação solar global e direta normal, espacialmente distribuídos no Estado do Paraná e regiões vizinhas. Trata-se de 24 estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 3 estações de superfície operadas pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). A localização destas estações é apresentada na Fig. 3.



Figura 3 - Localização das Estações da Rede SONDA (Azul) e do INMET (Vermelho)

As três estações SONDA utilizadas nesta validação foram: Curitiba, Ourinhos e Chapecó. As duas últimas, apesar de não estarem localizadas dentro dos limites do estado, foram consideradas neste trabalho pela proximidade geográfica e por fornecerem dados da irradiação direta normal, além de utilizarem radiômetros de padrão secundário, garantindo um menor erro associado às medidas.

A base de dados observados utilizada no procedimento de validação compreendeu o período de 2005 a 2015, totalizando 27 estações de superfície com qualidade adequada para participar na validação das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

Diversas são as formas de comparação dos resultados de modelos numéricos com dados observados. Neste trabalho empregou-se as métricas estatísticas descritas por Weber (WEBER, 1982). Esta validação utiliza quatro índices estatísticos: o Erro Médio (Viés), o Erro Médio relativo (rViés), a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (rRMSE) e o Coeficiente de Correlação (r).

O Viés indica a tendência do modelo BRASIL-SR em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o comportamento de uma determinada variável, conforme descrito na Eq. (2):

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o) \quad (2)$$

O rViés indica o erro médio do modelo em porcentagem sobre o valor da média, dada pela Eq. (3):

$$rViés = \left| 100 \cdot \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_o)} \right| \quad (3)$$

onde: ϕ_o é o valor observado da variável no i -ésimo instante do tempo e ϕ_i é o valor da mesma variável produzida pelo modelo, correspondente ao mesmo instante de tempo do observado, e N é o número de amostras de tempo da série.

O rRMSE dá uma noção do espalhamento entre os dados medidos em superfície e os estimados pelo modelo e, quanto menores forem os valores, melhor o seu desempenho. O cálculo do rRMSE é dado pela Eq. (4):

$$rRMSE = 100 \cdot \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_o)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Segundo Heinemann (2012), o desempenho de um modelo de estimativa de irradiação pode ser considerado excelente se $rRMSE < 10\%$; bom se $10\% \leq rRMSE \leq 20\%$; aceitável se $20\% \leq rRMSE \leq 30\%$; e pobre se $rRMSE \geq 30\%$.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida adimensional de associação linear entre as estimativas e os dados medidos, variando de -1 a 1. A estimativa ideal é aquela que atinge o valor mais próximo de 1, conforme Eq. (5).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_0 - \bar{\phi}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_0 - \bar{\phi}_0)^2}} \quad (5)$$

onde: ϕ_i , ϕ_0 , $\bar{\phi}_i$, e $\bar{\phi}_0$ são os dados estimados, dados observados e suas respectivas médias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 4 são apresentados os diagramas dos índices estatísticos para todas as mesorregiões do estado. Observa-se que em todas as figuras o modelo apresenta um excelente desempenho, com baixo Viés, sendo capaz de estimar a irradiação solar global horizontal de forma muito satisfatória, com erros tipicamente inferiores a 3,7% na mesorregião Sudeste e 0,1% na mesorregião Norte Pioneiro, em referência à irradiação média anual. Em relação à média mensal do total diário de irradiação no local, os erros são inferiores a 9,5%.

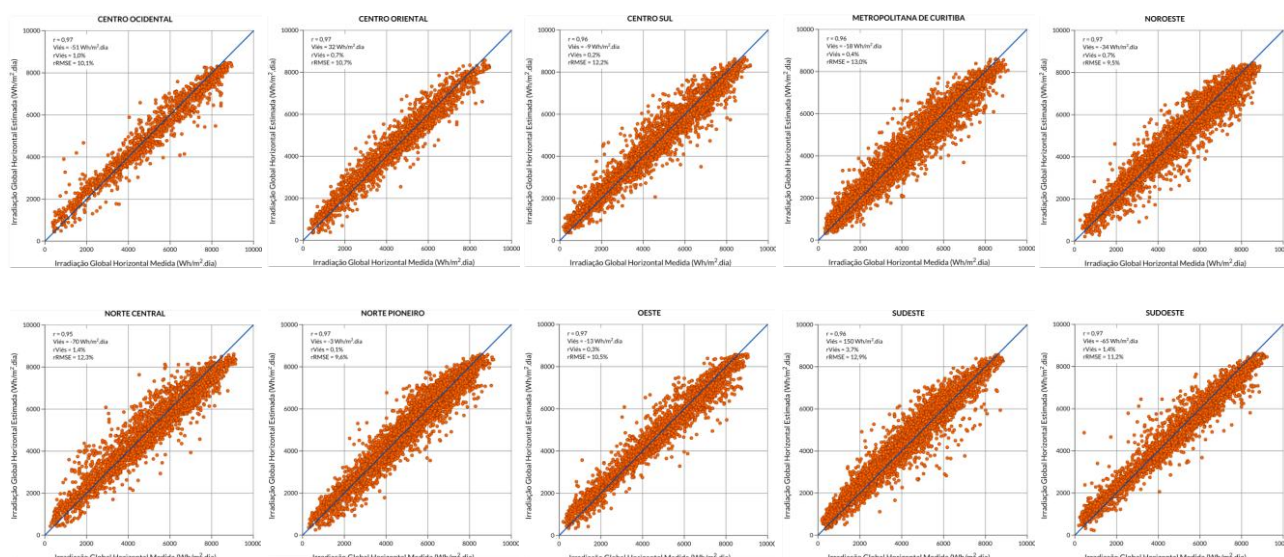


Figura 4 - Comparação, por meio de gráficos de dispersão, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as mesorregiões do Paraná.

Verifica-se uma ligeira subestimativa da irradiação nas mesorregiões Norte Central, Norte Pioneiro, Sudoeste, Oeste, Centro Ocidental, Noroeste, Centro-Sul e Metropolitana de Curitiba com valores variando entre -70 Wh/m².dia e -3 Wh/m².dia, enquanto as regiões do Sudeste e Centro Oriental apresentaram uma ligeira superestimativa de 150 Wh/m².dia e 32 Wh/m².dia respectivamente. De maneira geral os valores de Viés estão contidos dentro de uma faixa estreita de -70 Wh/m².dia a 150 Wh/m².dia, sendo esta a incerteza a ser considerada quando se utiliza as médias anuais de irradiação solar disponibilizadas por este Atlas.

Ao considerar-se o desempenho do modelo em uma escala diária, nota-se que este apresenta coeficientes de correlação elevados, sempre superiores a 0,95. O rRMSE apresenta valores inferiores a 15% em todas as mesorregiões, o que confirma o bom desempenho global do modelo. Os melhores valores foram encontrados nas Mesorregiões Noroeste (9,5%) e Norte Pioneiro (9,6%), com desempenho excelente. As demais regiões apresentaram estimativas consideradas boas em termos de desempenho, sendo maiores os erros das regiões Metropolitana de Curitiba (13,0%) e Sudeste (12,9%), indicando um bom potencial para estimativas diárias de irradiação global.

A validação das estimativas de irradiação direta normal foi realizada apenas com dados de superfície coletados nas estações da rede SONDA localizadas em Curitiba-PR, Ourinhos-SP e Chapecó-SC, sendo as únicas que dispunham desta componente da radiação.

A Fig. 5 apresenta a dispersão entre valores observados e estimados das três estações de medição em conjunto. O Viés observado tende a subestimar os dados medidos em 8,9%, o que corresponde a 463 Wh/m².dia na média anual, o que mostra o bom desempenho do modelo nas estimativas ao longo do ano.

Observa-se um alto valor de correlação de 0,92 e um valor de rRMSE de 22,2% indicando, também, um bom potencial para estimativas diárias de irradiação direta normal. É importante salientar que a representatividade do erro de irradiação direta normal é mais restrita em relação à irradiação global, uma vez que dados medidos de irradiação direta normal são mais escassos no território.

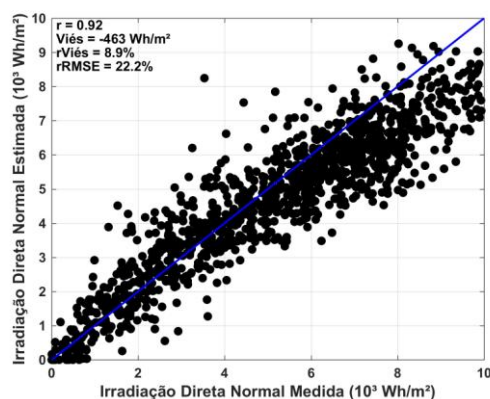


Figura 5 - Comparação, através de gráficos de dispersão e histograma, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação direta normal e valores medidos em superfície para o Estado do Paraná

Foram produzidos para o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná 174 mapas de irradiação com a distribuição espacial para as componentes Global Horizontal, Direta Normal, Difusa e Inclinada na Latitude.

A escala adotada nos mapas é derivada de pesquisas já realizadas (Tiepolo, 2014, 2015) e que possibilita visualizar uma ampla gama de cores e de valores que representam os diferentes níveis de irradiação no estado, ao mesmo tempo que permite a comparação direta com mapas elaborados pela Comissão Europeia por utilizarem, em comum, o mesmo padrão. Nos mapas no plano inclinado na latitude, são apresentados em uma mesma escala a irradiação (kWh/m²) e a produtividade (kWh/kWp) para uma taxa de desempenho conservadora de 75%.

Foram gerados mapas anuais e sazonais para as componentes direta normal e difusa, e mapas anuais, sazonais e mensais para as componentes global horizontal e no plano inclinado na latitude. Os mapas no plano inclinado na latitude, por serem utilizados especificamente em projetos fotovoltaicos, trazem ainda um maior detalhamento mostrando as informações não apenas a nível de estado, como também de cada uma das suas 10 mesorregiões (mapas anuais e mensais de irradiação e de produtividade). A Fig. 6 apresenta os mapas de irradiação global horizontal anual, sazonal e mensal, a Fig. 7 apresenta os mapas de irradiação direta normal anual e sazonal, a Fig. 8 apresenta os mapas de irradiação difusa anual e sazonal, e por fim a Fig. 9 apresenta os mapas de irradiação e de produtividade no plano inclinado na latitude anual, sazonal e mensal, complementado pelos mapas anual e mensal de irradiação e de produtividade para a mesorregião Sudeste Paranaense utilizado como exemplo.

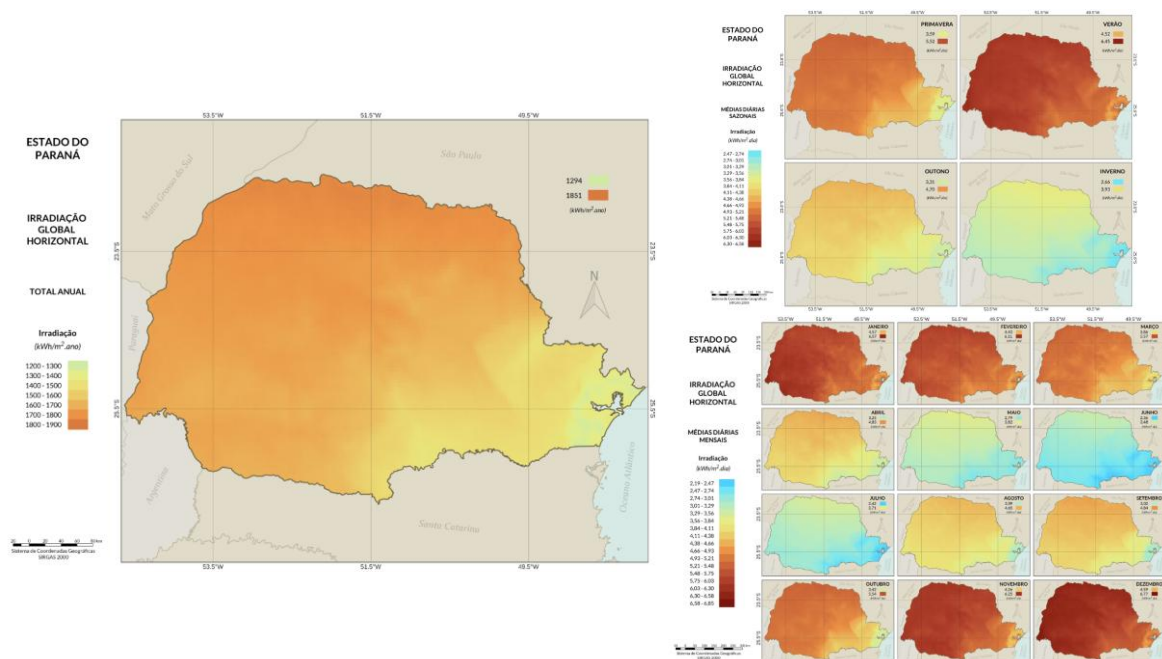


Figura 6 - Mapas Anual, Sazonal e Mensal de irradiação Global Horizontal do Estado do Paraná

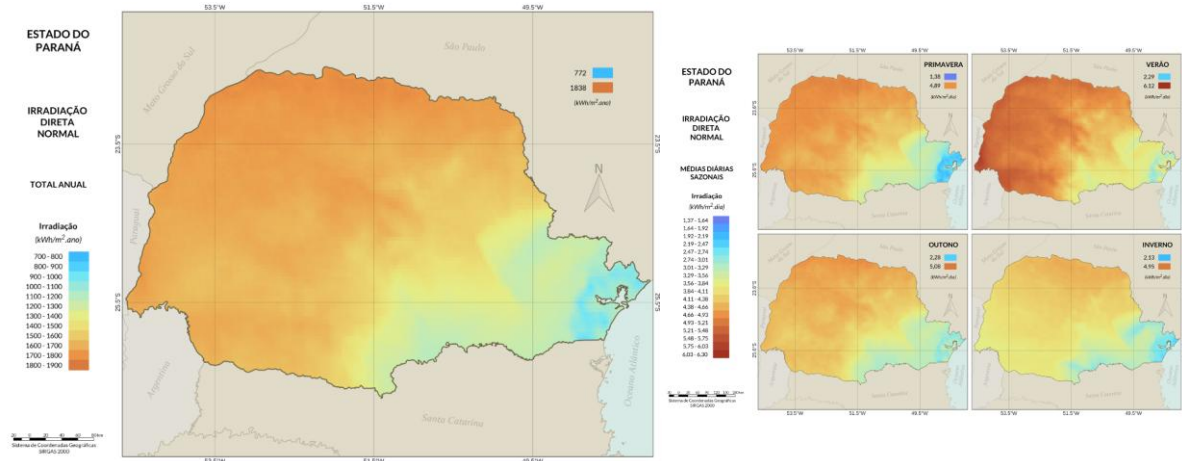


Figura 7 - Mapas Anual e Sazonal de irradiação Direta Normal do Estado do Paraná

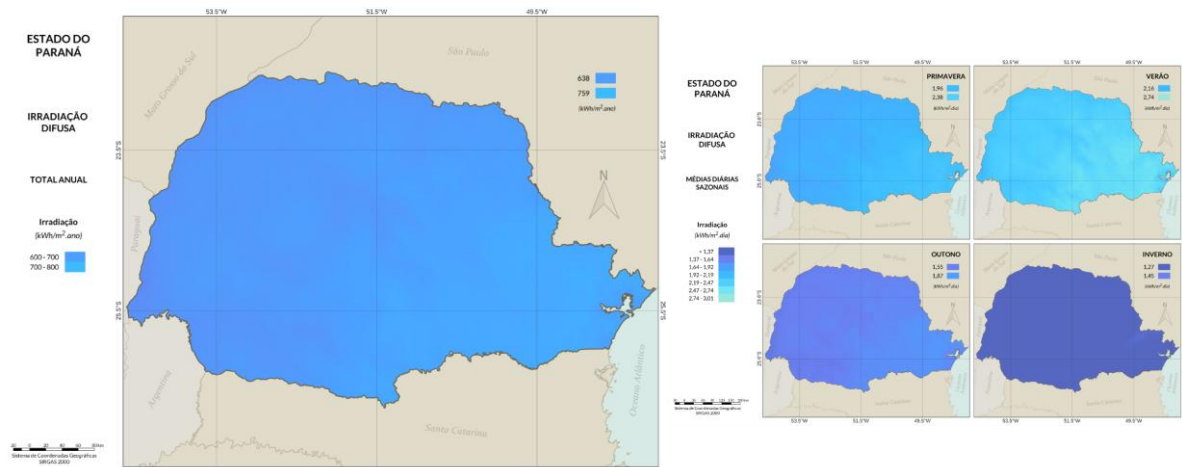


Figura 8 - Mapas Anual e Sazonal de irradiação Difusa do Estado do Paraná

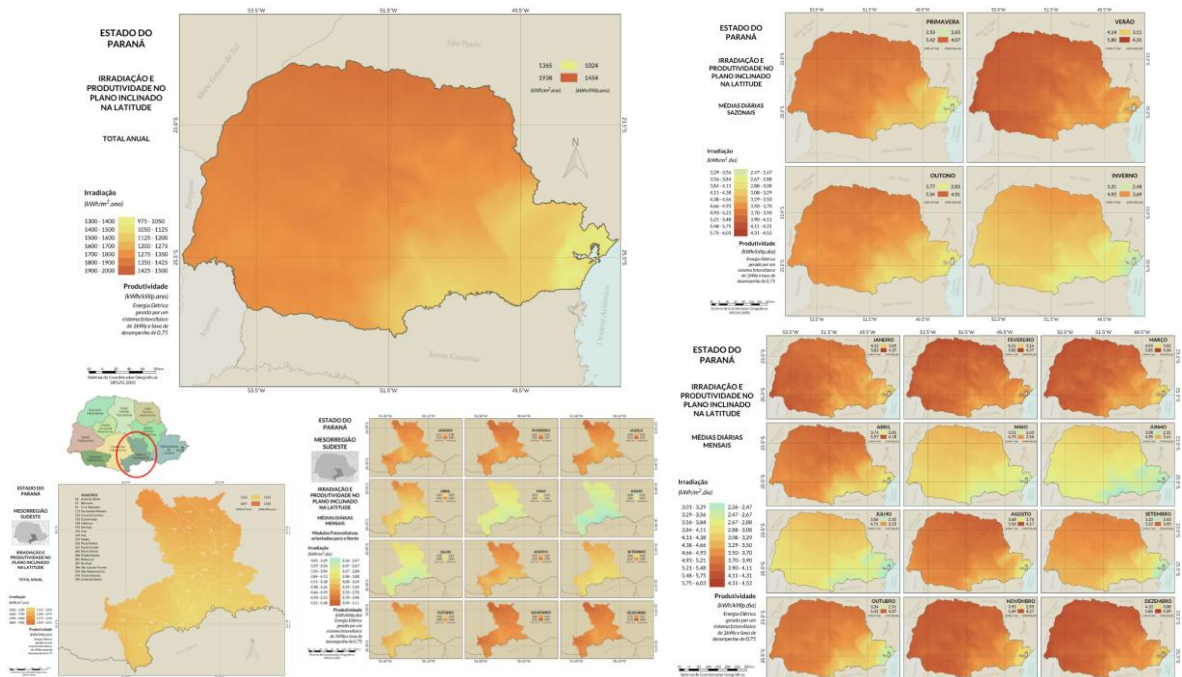


Figura 9 - Mapas Anual, Sazonal e Mensal de irradiação e de produtividade no Plano Inclinado na Latitude do Estado do Paraná, e mapas Anual e Mensal de irradiação e de produtividade no Plano Inclinado na Latitude para a Mesoregião Sudeste Paranaense.

Em termos de variabilidade, a mesorregião Noroeste é a que apresenta menor variabilidade interanual, com 50% dos valores entre 4,92 kWh/m².dia e 5,00 kWh/m².dia, e valores mínimo e máximo entre 4,79 kWh/m².dia e 5,11 kWh/m².dia, sendo também a mesorregião de maior média anual no Estado do Paraná. Por outro lado, as mesorregiões Sudeste (4,19 kWh/m².dia e 4,42 kWh/m².dia), Sudoeste (4,68 kWh/m².dia e 4,91 kWh/m².dia) e Metropolitana de Curitiba (3,95 kWh/m².dia e 4,17 kWh/m².dia) apresentam as maiores variabilidades interanuais, conforme Fig. 10.

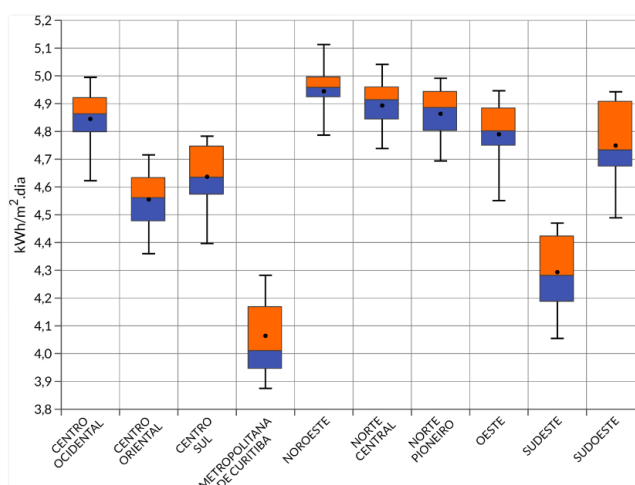


Figura 10 - Variabilidade interanual da média diária de irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para cada uma das mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia

Em termos de Estado do Paraná, a irradiação média do total anual obtida foi: global horizontal: 1.705 kWh/m².ano; direta normal: 1.560 kWh/m².ano; difusa: 695 kWh/m².ano; plano inclinado na latitude: 1.789 kWh/m².ano. O resumo com as médias de irradiação obtidas por mesorregião são apresentadas na Fig. 11.

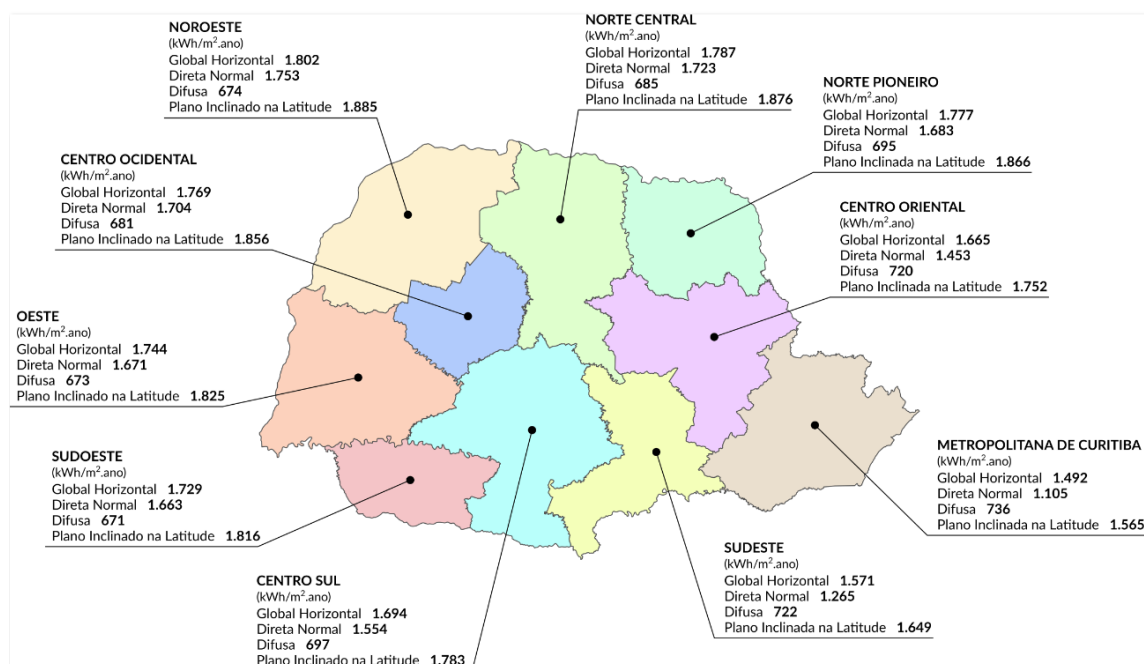


Figura 11 - Média de irradiação das componentes Global Horizontal, Direta Normal, Difusa e no Plano Inclinado na Latitude encontradas no Estado do Paraná por Mesorregião.

Este potencial fica ainda mais evidente quando são realizadas comparações com regiões que são referência nesta tecnologia, em especial a Europa, que vem apoiando o seu desenvolvimento mediante políticas públicas.

Dentre os 10 países com maior capacidade instalada no planeta até 2016, cinco são europeus: Alemanha, Itália, Reino Unido, França e Espanha, que juntos representam aproximadamente, 28% da capacidade instalada global em sistemas fotovoltaicos (REN21, 2017).

Ao comparar-se a média obtida no Estado do Paraná no plano inclinado na latitude em relação aos principais países europeus, pôde-se verificar que a média obtida no estado é 43,00% superior à Alemanha; 2,22% superior à Itália; 55,11% superior ao Reino Unido; 18,25% superior à França e 8,14% inferior à Espanha.

4. CONCLUSÃO

Este Atlas empregou um modelo físico por sensoriamento remoto (Brasil-SR) e os dados gerados independem de medidas radiométricas em superfície. Entretanto, os ajustes de pós-processamento e as estimativas das incertezas dependeram desses dados. Infelizmente, o Estado do Paraná não possui uma rede radiométrica específica de alta confiabilidade, fornecendo dados para as várias componentes da irradiação solar. Isso levou os autores a buscar dados de radiação solar em estações meteorológicas automáticas da rede nacional mantida e operada pelo INMET.

Estes dados tiveram que passar por um rigoroso controle de qualidade antes de sua utilização para o pós-processamento e estimativas de incertezas dos dados gerados por este Atlas. Essa escassez de dados impacta, particularmente, nos ajustes para as estimativas da radiação direta normal do modelo, já que as estações meteorológicas não fornecem dados dessa componente da radiação solar. Com isto, seria importante para o Estado do Paraná a criação de uma rede de dados solarimétricos própria e de alto desempenho, podendo integrar a rede SONDA e obter dados de superfície com maior precisão, o que possibilita a atualização das informações geradas por este projeto futuramente.

As informações apresentadas por esta publicação mostram os excelentes índices de irradiação encontrados no Paraná, com destaque para a mesorregião Noroeste, que apresentou a maior média anual e menor variabilidade da irradiação global horizontal, com a segunda maior média anual no plano inclinado na latitude do estado.

Os elevados valores de irradiação encontrados em toda a região Norte e em direção ao Oeste do estado, fazem com que a média de todo o estado seja também elevada, superior a grande parte dos países europeus.

Por fim, a disseminação da fonte de energia solar fará com que novas oportunidades de negócios ocorram em todo o estado, gerando mais empregos e renda para a população e, por conseguinte, maior arrecadação para o próprio estado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) pelo apoio e infraestrutura oferecidas para o desenvolvimento destas pesquisas, e a ITAIPU Binacional através da FPTI (Fundação Parque Tecnológico ITAIPU) e do CIH (Centro Internacional de Hidroinformática) pelo financiamento dos recursos e apoio para realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. "ANEEL propõe revisão das bandeiras tarifárias", 2017. Disponível em http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-propoe-revisao-das-bandeiras-tarifarias/656877?inheritRedirect=false, Acessado em outubro 2017;
- COSTA, R. S.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. "Aerossóis atmosféricos e a quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa". Revista Brasileira de Energia Solar, v. 3, n. 1, p. 62, 2012.
- HEINEMANN, A. B.; VAN OORT, P. A. J.; FERNANDES, D. S.; MAIA, A. H. N. "Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation". Bragantia, v. 71, n. 4, p. 572-582, 2012
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; STUHLMANN, R. "Parameterization of biomass burning aerosols in the BRAZIL-SR radiative transfer model". In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003.
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Demanda de Energia 2050", Nota Técnica DEA 13/15, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>, Acessado em maio 2017;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2012: ano base 2011", 2012. Disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf, Acessado em Junho 2013;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2013: ano base 2012", 2013. Disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf, Acessado em Fevereiro 2014;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2014: ano base 2013 - Relatório Síntese", 2014, disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf, Acessado em Junho 2014;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014 - Relatório Síntese", 2015. Disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf, Acessado em Novembro 2015;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015 - Relatório Síntese", 2016a. Disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%adntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf, Acessado em Outubro 2017;
- MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2017: ano base 2016 - Relatório Síntese", 2017. Disponível em

- https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2017_Web.pdf, Acessado em Outubro 2017;
- ONS, Operador Nacional do Sistema. "Situação dos principais reservatórios do Brasil - 26/10/2017", 2017. Disponível em http://apps05.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp, Acessado em outubro 2017;
- REN21, "Renewable 2010 – Global Status Report", 2010. Disponível em www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx, Acessado em Junho 2013;
- REN21, "Renewable 2011 – Global Status Report", 2011. Disponível em http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR2011_FINAL.pdf. Acesso em março 2016;
- REN21, "Renewable 2012 – Global Status Report", 2012. Disponível em http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf. Acesso em março 2016;
- REN21, "Renewable 2013 – Global Status Report", 2013. Disponível em http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf. Acesso em março 2016;
- REN21, "Renewable 2014 – Global Status Report", 2014. Disponível em http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf. Acesso em março 2016;
- REN21, "Renewable 2015 – Global Status Report", 2015. Disponível em http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf. Acesso em março 2016;
- REN21, "Renewable 2016 – Global Status Report", 2016. Disponível em http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf. Acesso em agosto 2016;
- REN21, "Renewable 2017 – Global Status Report", 2017. Disponível em http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf. Acesso em outubro 2017;
- Tiepolo, G. M.; Castagna, A. G.; Canciglieri, O.; Betini, R. C. "Fontes Renováveis de Energia e a Influência no Planejamento Energético Emergente no Brasil", VIII CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2012;
- 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, 2014;
- 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.
- Tiepolo, G. M., Urbanetz JR, J., Pereira, E. B., Pereira, S. V., Alves, A. R. "Potencial de Geração de Energia Elétrica Através de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Estado do Paraná – Resultados Parciais". CBENS, Belo Horizonte, 2016
- WEBER, R. L.; BUCKNER, M.; WEBER, J. "Statistical Performance of several mesoscale atmospheric dispersion models". Journal of Applied Meteorology, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 21, n. 11, 1633-1644, 1982

GENERATION POTENTIAL OF ELECTRICITY THROUGH CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN PARANÁ STATE - PARTIAL RESULTS

Abstract. *Paraná is the largest producer of electricity in Brazil, almost totally originated by hydroelectric plants and corresponds to 96% of the total generated in the state. However, the use of this source is in decline due to the environmental impacts and due to the pressure of society regarding the social and economic issues caused. The publication of Resolution 482/2012 of ANEEL (National Agency for Electric Energy) and after its revision through Resolution 687/2015 regulating microgeneration and minigeneration, it became possible to use grid-connected photovoltaic systems (SFVCR) in order to complement the Brazilian electrical matrix in large enterprises and in the form of distributed generation (GD). However, in order to develop quality projects in this area, it is necessary to know the solar potential of the region as accurately as possible. The objective of this work is to present the main results obtained with the elaboration of the Solar Energy Atlas of the State of Paraná, a result of the partnership between the Federal Technological University of Paraná (UTFPR), the National Institute for Space Research (INPE) and Itaipu Binacional through the Itaipu Technological Park (PTI) and the International Center for Hydroinformatics (CIH). The products focused on solar energy in Paraná were developed by INPE through the Laboratory of Modeling and Studies of Renewable Energy Resources (INPE / LABREN) with the support of UTFPR through the Solar Energy Laboratory (UTFPR / LABENS). validation and interpretation of the data, making use of the BRASIL-SR radiative transfer model and the information obtained for Paraná within the scope of the Brazilian Solar Energy Atlas - 2nd edition. The results obtained in this work show the excellent potential of solar and photovoltaic radiation in the State of Paraná, superior to many European countries where this renewable energy source is already widespread.*

Key words: Solar Energy, Photovoltaic Potential, Solar Energy Atlas, Paraná.