

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia– danilocgou@gmail.com

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

Jeanne Moro– jeannemoro@gmail.com

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

Muza Iwanow– mu.iwanow@gmail.com

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

Rebecca Avença – re.utfpr@gmail.com

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

Jair Urbanetz Junior - urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

Resumo. *Devido a crescente demanda energética as fontes alternativas de geração de energia vêm ganhando espaço cada vez mais. A geração fotovoltaica tem grande potencial no Brasil devido a sua localização, estando em sua maior parte na região intertropical. Vários são os métodos para obtenção de estimativas de energia destes sistemas. Este estudo tem por objetivo realizar a comparação entre os resultados de estimativas de energia gerada e os dados reais obtidos num sistema fotovoltaico na cidade de Curitiba através de três métodos distintos: SWERA, base de dados do INMET e mapa fotovoltaico do Estado do Paraná. Os resultados obtidos com a Base de Dados do INMET foi o que mais se aproximou dos dados reais do sistema fotovoltaico em operação (variação de 0,5%), enquanto que os métodos que utilizam a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar apresentaram maior desvio (14,3%, 15,9% e 22,3%). Estas diferenças são justificadas pelo fato de que os dados oriundos do Atlas são uma média de valores ao longo de 10 anos de medições considerando anos típicos e atípicos e os dados do INMET são dados medidos por uma estação solarimétrica em um período de tempo menor na mesma região da geração de energia do sistema fotovoltaico em estudo. Conclui-se que o sistema de base dados do INMET é o que apresenta a melhor fidelidade aos resultados reais de geração de energia e pode ser utilizado para aferição da geração do sistema fotovoltaico após sua instalação. Entretanto, para questões de projeto e dimensionamento, é recomendável ainda se utilizar a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, pois está baseado em um período de referência maior do que os dados do INMET (10 anos contra 4 anos), o que representa erros menores em longo prazo devido às variações climáticas.*

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Atlas Brasileiro de Energia Solar, Geração de Energia.

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética no mundo é crescente, o que também inclui o Brasil. Segundo Pereira *et al.* (2006) o aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar fontes de energia alternativas que sejam menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental.

Os primeiros estudos sobre energia solar datam da década de 50 com as primeiras tentativas de implantação de um centro de pesquisa em energia solar, mas somente na década de 70 em decorrência da crise do petróleo, é que houveram grandes incentivos na pesquisa de fontes alternativas de energia (Tiepolo, 2015).

A energia fotovoltaica apresenta um grande potencial de aproveitamento da energia solar no Brasil por ser um país localizado em sua maior parte na região intertropical (Pereira *et al.*, 2006). O sistema fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas que transformam a energia solar diretamente em energia elétrica, sem emissão de gases, sem necessidade de partes móveis e silenciosamente, utilizando o sol que é uma fonte de energia limpa, renovável e virtualmente inesgotável. As células, devidamente interligadas e acondicionadas, formam os módulos fotovoltaicos, os quais são normalmente reunidos em painéis para constituir um sistema gerador fotovoltaico (Viana *et al.*, 2007).

Uma das primeiras iniciativas no Brasil em pesquisas de energia solar foi a criação do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e de 20 estações da Rede Solarimétrica Nacional que passaram a operar a partir de 1977, sendo duas delas no estado do Paraná: uma em Curitiba (Latitude Sul 25° 26'; Longitude Oeste 49° 16'), e outra em Foz do Iguaçu (Latitude Sul 25° 33'; Longitude Oeste 54° 34') (Ferreira, 1993 *apud* Tiepolo, 2015).

Em 1996, com a utilização de modelo computacional e utilizando informações derivadas de imagens do satélite, com dados entre o período de 1985 e 1986, são geradas cartas solares para as médias mensais da soma diária global e difusa da radiação solar em MJ/m².dia para os meses de dezembro a fevereiro e de junho a agosto, onde esses períodos

coincidem com o verão e inverno no hemisfério sul, respectivamente. A continuação deste estudo em 1998 resultou com a publicação do “Atlas de irradiação solar do Brasil”, sendo a 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Elaborado pelo LABSOLAR/NCTS (Laboratório de Energia Solar/Núcleo de Controle Térmico de Satélites) e DGE/INPE (Divisão de Geofísica Espacial/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), este trabalho apresenta o mapa anual e os mapas mensais de irradiação global, média diária (Tiepolo, 2015).

A obtenção de uma estimativa da irradiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL- SR está atrelada a três conjuntos principais de informações: a) valores climatológicos de temperatura, visibilidade, umidade relativa e albedo de superfície; b) dados digitais extraídos de imagens de satélite; e, c) aplicação do “Método de Dois-Fluxos” (Martins, 2001 *apud* Martins *et al.*, 2005) para solução da equação de transferência radiativa na atmosfera (Martins *et al.*, 2005), conforme mostra a Fig. 1.

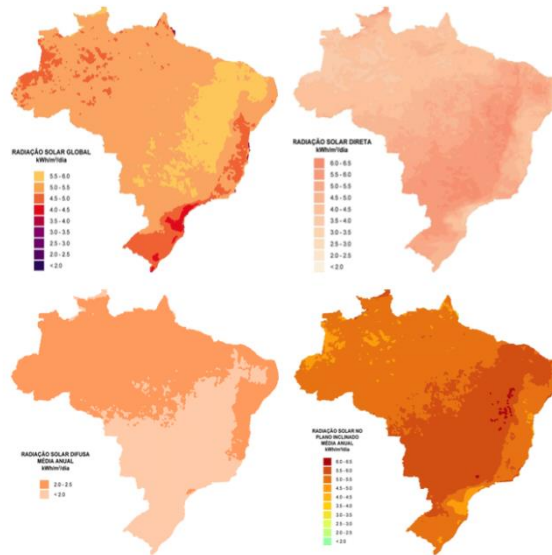


Figura1 - Mapas de irradiação solar média anual para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000: (A) irradiação global, (B) irradiação direta, (C) irradiação difusa e (D) irradiação global em plano inclinado em ângulo igual à latitude local.

Fonte: Martins *et al.*, 2005

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2006, mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro (Fig. 2), levando-se em consideração os dados de irradiação obtidos no período entre 1995 e 2005 (Tiepolo *et al.*, 2014).

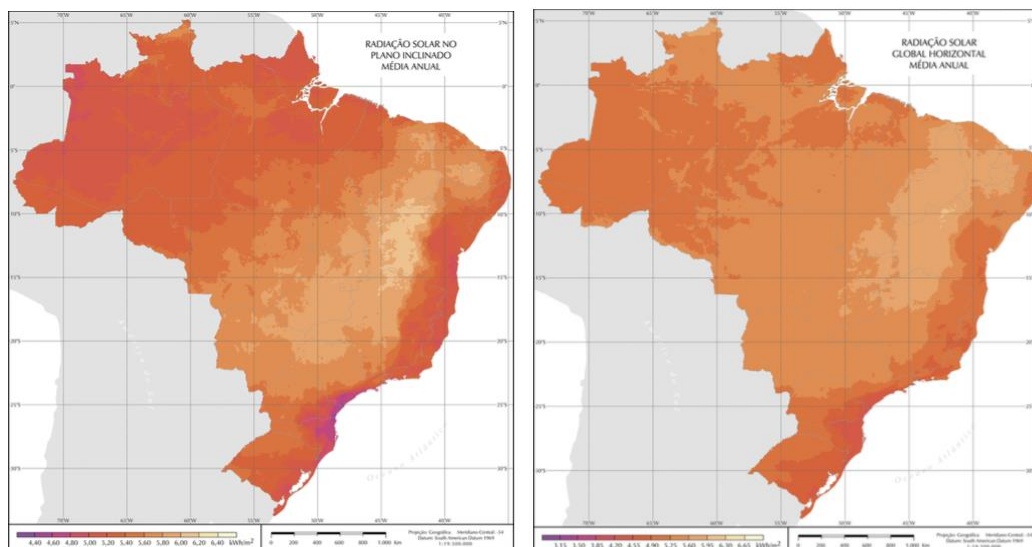


Figura 2 - Mapas de irradiação solar média anual horizontal e no plano inclinado para o território brasileiro

Fonte: Pereira *et al.*, 2006

Uma das dificuldades encontradas pelos pesquisadores na área de fotovoltaica é a realizar a comparação entre os mapas elaborados com mapas de outros países ou regiões. Nem sempre esta comparação é visualmente fácil, devido à diferença entre as escalas e cores utilizadas para representar os níveis de irradiação nos vários mapas existentes em países ou regiões de diferentes continentes. Com isto, foram elaborados os Mapas Fotovoltaicos do Estado do Paraná com o Total Anual e com a Média Diária Sazonal (Fig. 3) considerando os mesmos critérios utilizados pela *European Commission* para elaboração dos Mapas Fotovoltaicos para a Europa. (Tiepolo *et al.*, 2014).

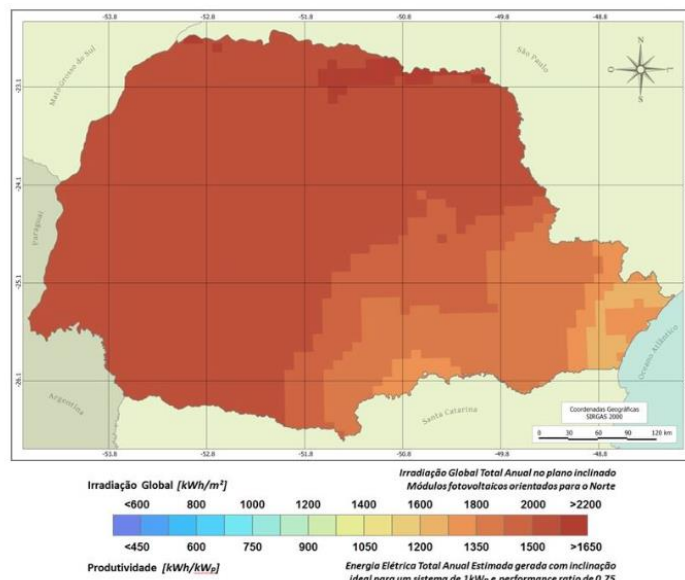


Figura3 - Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná – Valores de Irradiação Global no Plano Inclinado, e de Produtividade em kWh/kWp para TD 0,75 - Total Anual
 Fonte: Tiepolo *et al.*, 2014

Este artigo tem como finalidade comparar os resultados de estimativa de energia gerada do sistema fotovoltaico instalado em Curitiba a partir de diferentes bases de dados de irradiação solar.

2. METODOLOGIA

Para este artigo científico foi utilizado o método de investigação estudo de caso, aplicado a um sistema fotovoltaico conectado a rede de 2,4 kWp localizado na cidade de Curitiba. Adotou-se esse método, pois se trata de uma análise de um caso empírico particular e de realidade delimitada, sendo considerados três aspectos fundamentais: a natureza da experiência, o conhecimento que se pretende alcançar e a possibilidade de generalização de estudos a partir do método.

Realizou-se a comparação e avaliação dos valores reais de energia elétrica gerada no último ano por esse sistema com estimativas de geração de energia obtida a partir de três bases de dados: INMET (2012-2015), Atlas Brasileiro de Energia Solar (1995 - 2005) e Projeto SWERA, este com correção do ângulo de inclinação no software RADIASOL.

2.1 Objeto de Estudo

Foi escolhido um sistema fotovoltaico conectado a rede (SFVCR) instalado na região de Curitiba com um ano de operação ininterrupta (Fig. 4). Os dados foram coletados do site da empresa *Solar Energy*, fabricante do inversor.

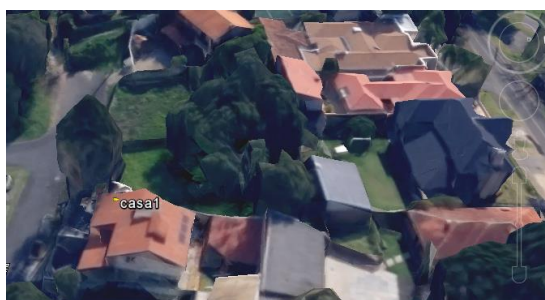


Figura 4 – Imagem do objeto de estudo

O sistema escolhido é composto por um painel de potência de 2,4 kWp , localizado nas coordenadas de latitude - 25,43° e longitude -49,30° com desvio azimutal nulo pois está orientado para o norte geográfico e inclinação do telhado de 24°.

A geração mensal produzida pelo sistema fotovoltaico está disponível no site do fabricante através do sistema de medição e monitoramento *web* que fornece a geração mês a mês, dentre outros dados de medição (Fig. 5).

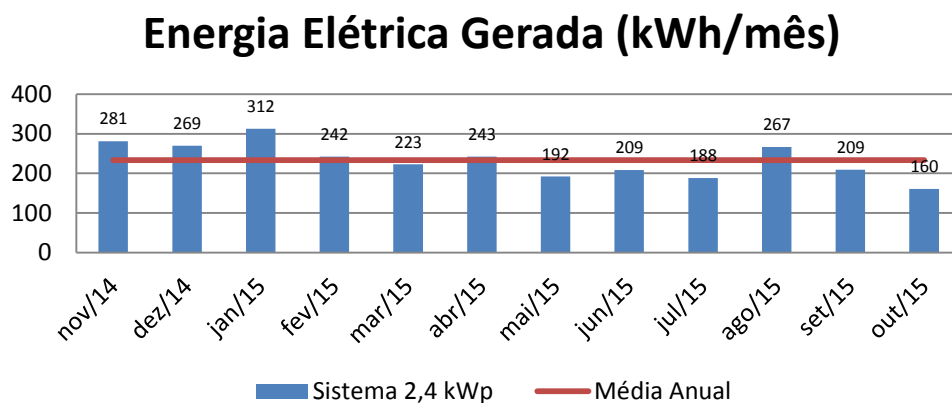


Figura 5 – Dados de energia elétrica gerada no local de estudo
Fonte: Adaptado *Solar Energy*, 2015

Foram utilizados três métodos de análise de energia elétrica gerada como premissas do sistema com a finalidade de constatar qual método apresenta resultados mais próximos da realidade.

2.2 Método 1– Base de Dados Projeto SWERA

Neste método, o primeiro procedimento adotado foi encontrar o ponto mais próximo disponibilizado no Atlas Brasileiro de Energia Solar. O ponto está a uma distância de 3 km das coordenadas do sistema fotovoltaico instalado. Utilizando então o banco de dados no plano global horizontal deste ponto foi utilizado o programa RADIASOL para fazer o ajuste da inclinação do telhado para 24°.

Para o cálculo da energia elétrica gerada com os dados do SWERA considerando o desvio azimutal calculado através do RADIASOL, foi utilizada Eq. (1):

$$E = \frac{P_{fv} * H_{tot} * PR}{G} \quad (1)$$

Onde:

P_{fv} : potência do sistema fotovoltaico [Wp];

H_{tot} : valor da irradiação [kWh/m².dia];

PR: Taxa de Desempenho ou *Performance Ratio*;

G_{stc} : irradiação solar na condição STC (1000 W/m², temperatura ambiente de 25°C, e Massa de Ar de 1,5).(ROCHA , 2014).

A potência do sistema fotovoltaico adotada para realizar a comparação dos diferentes dados com a geração real obtida na casa foi a potência de 2,4 kWp.

Para o cálculo da irradiação no plano inclinado, foi utilizado o software RADIASOL. Como resultados foram obtidos os valores de irradiação à 24° (Tab. 1).

Tabela 1 – Valores de Irradiação com ajuste na inclinação de 24° [kWh/m².dia]

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Anual |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 5,50 | 5,46 | 5,29 | 4,55 | 3,80 | 3,74 | 3,95 | 4,90 | 4,59 | 5,11 | 5,82 | 5,69 | 4,867 |

Para o cálculo do potencial fotovoltaico foi considerado a Taxa de Desempenho utilizada na elaboração de mapas fotovoltaicos na Europa que é 75% ou 0,75 (TIEPOLO *et al.*, 2014).

2.3 Método 2 – Base de Dados INMET

A segunda análise se deu através da base de dados do INMET. Os valores foram obtidos através do tratamento dos dados de irradiância disponibilizados pelo INMET diariamente a cada 15 minutos. Os dados pesquisados se concentraram na estação solarimétrica A807 localizada na região metropolitana de Curitiba no período de novembro de 2012 a outubro de 2015. Para efeito de posterior comparação, considerando que o piranômetro da estação A807 está instalado na horizontal, estes dados de irradiância foram convertidos em irradiação média diária mensal para uma inclinação de 24°, mantendo desvio azimutal 0°, através do *software* RADIASOL (Tab. 2). Com esses resultados, foram obtidos os valores de irradiação média diária, mensal e anual no plano de estudo.

Tabela 2 – Valores de Irradiação média (H_{TOT})

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Anual |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 5,71 | 5,02 | 4,40 | 3,73 | 2,96 | 2,58 | 2,90 | 4,07 | 4,14 | 4,76 | 5,23 | 5,48 | 4,24 |

2.4 Método 3 – Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná

O método 3 estima a energia elétrica gerada através do Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná (Fig. 3), elaborado a partir dos dados de irradiação do ATLAS 2006.

A escala de cores representa na parte superior os valores de irradiação global anual no plano inclinado e com os módulos orientados para o norte geográfico, enquanto na parte inferior são apresentados os valores correspondentes de energia elétrica anual estimada, gerada por um sistema de 1kWp e com *Performance Ratio* (PR) de 0,75 (TIEPOLO et al., 2014).

3. RESULTADOS

Para calcular a energia elétrica gerada estimada a partir do método 1, onde os dados de irradiação foram obtidos através do banco de dados do projeto SWERA, aplicou-se os dados de irradiação obtidos (Tab. 1) à Eq. 1 e chegou-se a uma estimativa média de energia gerada de aproximadamente 266,35 kWh/mês (Fig. 6). Considerando que o sistema opere todos os dias do ano, a estimativa anual de energia elétrica gerada é de 3,196MWh/ano.

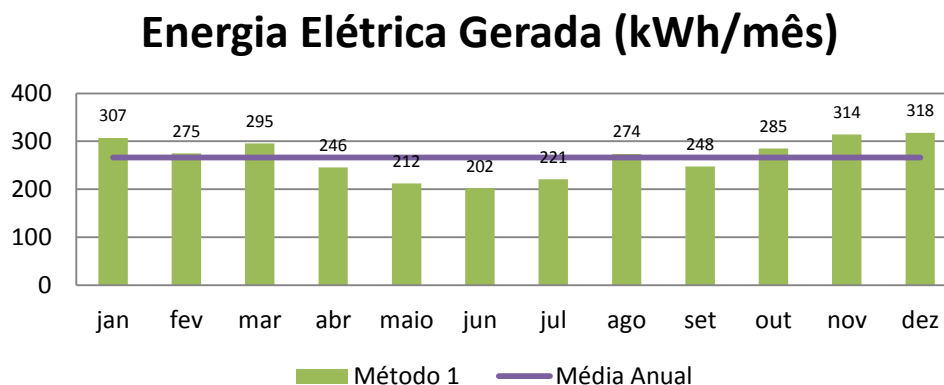


Figura 6 – Energia Elétrica Gerada no objeto de estudo através dos dados de irradiação do projeto SWERA
Fonte: Autor

Utilizando o segundo método, Base de dados de irradiação do INMET, os dados de irradiação média obtidos (Tab.2), assim como no método 1, foram aplicados na Eq. (1) para o cálculo da estimativa de energia elétrica gerada. Obteve-se como resultado a estimativa de 231,75 kWh/mês de energia gerada (Fig. 7). Para o período de um ano a estimativa de energia elétrica gerada é de 2,781MWh/ano.

Energia Elétrica Gerada (kWh/mês)

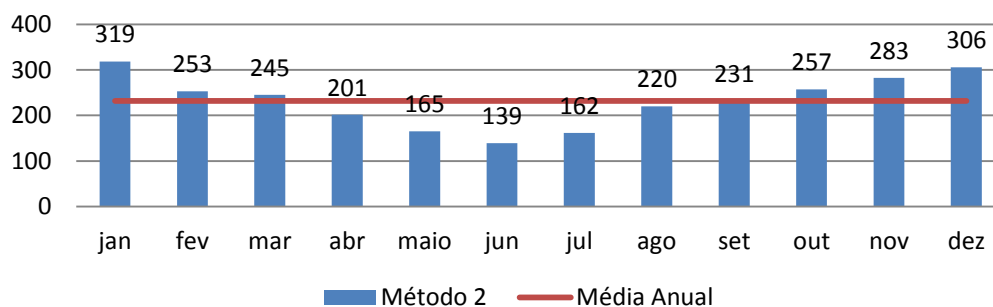


Figura 7 – Energia Elétrica Gerada no objeto de estudo através dos dados de irradiação da Base de dados do INMET
Fonte: Autor

Quanto ao método 3, considerando o Mapa Fotovoltaico do Estado do Paraná (Fig. 3), os valores estimados de produtividade, que é a energia elétrica diária média gerada com inclinação ideal para um sistema de 1kWp e *Performance Ratio* (PR) de 0,75, variam entre 1350 kWh/kWp (menor valor gerado para um dia médio) e 1425 kWh/kWp (maior valor gerado para um dia médio), estes valores podem ser observados na escala de cores da Fig. 3.

Seguindo a premissa de um sistema fotovoltaico conectado a rede de potência de 2,4 kWp, a geração elétrica anual do sistema está entre 3.240 kWh/ano (mínimo) e 3.420 kWh/ano (máximo) para a região representada. Destaca-se que os dados são referentes à inclinação ideal do sistema conectado a rede, cuja inclinação é igual à latitude, ou seja, para a cidade de Curitiba é de 25°.

4. CONCLUSÕES

Ao se calcular a geração estimada de energia elétrica com os diferentes métodos apresentados neste estudo, pode-se concluir que os métodos apresentaram diferentes resultados (Fig. 8).

Comparando os resultados obtidos com os dados reais do sistema fotovoltaico em operação (Fig. 4), o método 2 – Base de Dados do INMET, foi o que mais se aproximou dos dados reais, com uma variação de 0,54%. Já os métodos 1 e 3 que utilizam a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar apresentaram um maior desvio: 14,3% referente ao método 1 e 15,9% e 22,3% quanto aos valores mínimo e máximo do método 3, respectivamente.

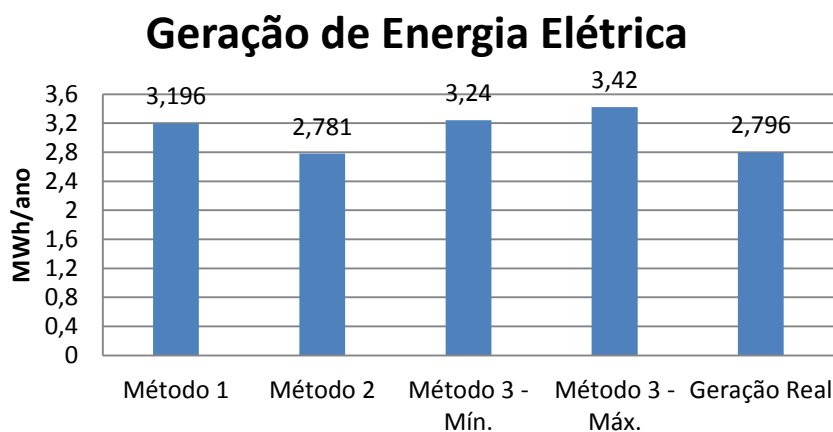


Figura 8 – Gráfico comparativo das estimativas de geração de energia nos diferentes métodos e a geração real
Fonte: Autor

Os resultados dos métodos 1 e 3 que utilizam como base de dados o Atlas Brasileiro de Energia Solar indicam maior diferença entre o resultado real, pois os dados do projeto SWERA são uma média de valores ao longo de 10 anos de medições considerando anos típicos e atípicos e as estimativas de geração devem-se à utilização da média dos valores de energia elétrica gerada para um dia médio da região.

Segundo Pereira (2006), a região Sul do Brasil apresenta a maior variabilidade inter anual, com as médias anuais variando entre 4,6 e 6,0 kWh/m², o que representa uma faixa de 30 % de desvio na mesma região. As previsões de geração dos métodos 1 e 3 estão dentro dessa faixa aceitável.

O método 3 é um mapa visual do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Assim, tem-se uma faixa de valores de produtividade para determinada região, o que justifica a diferença de resultados entre o método 1 (pontual) e método 3 (visual). No sistema fotovoltaico em estudo, na região de Curitiba a geração está entre 3.240 kWh (menor valor gerado) e 3.420 kWh (maior valor gerado).

Há ainda que se considerar que no método 1, o ponto mais próximo mapeado pelo projeto SWERA encontra-se a 3 km de distância do local onde o sistema fotovoltaico está instalado. Além disso, este ponto é originado através de modelos computacionais para determinar a estimativa da radiação solar incidente indicado por Pereira et al., 2006 (2006).

O método 2 foi o que mais se aproximou do valor real, principalmente devido aos dados do INMET serem dados medidos por uma estação solarimétrica situada também em Curitiba e que fornece medições do valor real da irradiação a cada 15 minutos. Há de se considerar ainda que os períodos utilizados para comparação foram similares.

Portanto, conclui-se que o sistema de base dados do INMET é o que apresenta a melhor fidelidade aos resultados reais de geração de energia e pode ser muito bem utilizado para aferição da geração do sistema fotovoltaico após sua instalação. Entretanto, para questões de projeto e dimensionamento, é recomendável ainda se utilizar a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, pois está baseado em um período de referência maior do que os dados do INMET (10 anos contra 4 anos), o que representa erros menores em longo prazo devido às variações climáticas.

REFERÊNCIAS

- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. de; Colle, S. Mapas de irradiação solar para o Brasil – resultados do projeto Swera. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3137-3145.
- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. de; RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. 1ª Edição. São José dos Campos. 2006.
- ROCHA, A. V. Energia Solar Fotovoltaica Unidade III – Módulos Fotovoltaicos. Disponível em: <http://docente.ifrn.edu.br/alexandrorocha/energias-renovaveis/energia-solar-fotovoltaica/energia-solar-unidade-3_1-modulos-fotovoltaicos> Acesso em: 01 de Dezembro de 2015
- SOLAR ENERGY. Dados de monitoramento do sistema fotovoltaico instalado. Disponível em: <http://monitor.solarenergy.com.br/dashboard/Default2.aspx?ID=1756fd05-4023-417b-b118-a92f999dcd29>. Acessado em Novembro/2015
- TIEPOLO, G. M.; CANGIOLIERI JR, O.; URBANETZ JR, 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 – Recife, 31 a 03 de abril de 2014.
- TIEPOLO, G. M. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná. Tese de Doutorado. Curitiba/PR. 2015
- VIANA, T. S.; ZOMER, C. D.; NASCIMENTO, L.; RÜTHER, R. Centro de eventos da UFSC: integração de sistemas fotovoltaicos à arquitetura. IX Encontro nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC. Ouro Preto. 2007.

COMPARISON OF RESULTS GENERATION OF ELECTRICITY THROUGH RADIATION DATA BASES DIFFERENT - CASE STUDY IN CURITIBA

Abstract. *Due to the increasing energy demand, the alternative energy generation sources are becoming more popular. Because of its location, mostly an intertropical country, the photovoltaic generation in Brazil has a remarkable potential. The approaches to estimate these systems' energy are many. This paper aims to compare the estimated generated energy and data from a real system, based in Curitiba, using three different methods: SWERA, INMET database and Paraná's photovoltaic maps. The results obtained using the INMET database were the closest to the existing photovoltaic system (deviation of 0.5%), while the results obtained using the maps (Atlas Brasileiro de Energia Solar) had the greatest deviations (14.3%, 15.9% and 22.3%). The differences are explained as a reflex of the data acquisition: the maps data is an average, considering the last 10 typical and atypical years, of energy measures while INMET data is obtained in a solarimetric station in the studied real system's location, during a shorter period. Hence, the INMET database, that shows closest results to the real system's behavior, can be used to calibrate the installed photovoltaic system after its installation. However, for design and project purposes, it is still recommendable to use the Atlas Brasileiro de Energia Solar database, since its data has been collected for a wider period than the INMET database (4 years of data). It represents better the climate variations, which induces less deviation in the long term.*

Keywords: *Photovoltaic Solar Energy, Atlas Brasileiro de Energia Solar, Power Generation.*