

METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA VISANDO UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO ELÉTRICA

Olga Moraes Toledo – olgatoledo@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Coordenação de Engenharia de Controle e Automação

Delly Oliveira Filho – delly@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Maria Helena Murta Vale – mhelena@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Antônia Sonia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

José Helvecio Martins – jhmartins@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Gustavo Azevedo Xavier - gustavo.xavier@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Resumo. Pesquisas em fontes renováveis de energia tiveram um aumento significativo e resultados destas já se encontram no mercado. A Energia Solar Fotovoltaica oferece um vasto campo de estudos devido a sua importante função de fonte de suprimento energético sustentável, com benefícios ao meio ambiente por suas características não poluentes, bem como aspectos sociais e econômicos, incluindo aumentos na confiabilidade do sistema, maior possibilidade de acesso à eletricidade em áreas remotas, entre outros. O rápido avanço da tecnologia fotovoltaica tem contribuído para a redução de custos de fabricação e aumento de eficiência destes sistemas tornando-os cada vez mais economicamente viáveis. Por outro lado, a inserção da geração distribuída na matriz energética apresenta-se como um desafio. Em especial, a realidade brasileira, com um sistema fortemente centralizado apresenta uma dificuldade maior de gerenciar fontes energéticas de tamanho reduzido. Para esta finalidade, novas metodologias de simulação são requeridas para servirem de apoio ao planejamento e operação elétricos do sistema elétrico interligado para uma inserção segura e confiável. Por meio deste trabalho propõe-se uma metodologia para previsão de potência gerada pelos geradores fotovoltaicos utilizando-se um tratamento estocástico para a radiação solar com vistas ao uso junto aos gestores do sistema elétrico.

Palavras-chave: Fontes renováveis, Energia solar fotovoltaica, Planejamento e operação energética, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

O mundo enfrenta, atualmente, uma dupla ameaça no setor da energia: (i) a inexistência de uma oferta segura e adequada de energia a preços acessíveis, e (ii) os danos causados ao ambiente pelo consumo de energia aliado uso de fontes energéticas com grande potencial poluidor, como por exemplo, petróleo e carvão. A ascensão rápida dos preços da energia e os recentes eventos geopolíticos servem para lembrar a importância que energia a preços acessíveis tem para o crescimento econômico e o desenvolvimento humano, bem como a vulnerabilidade do sistema energético global às crises da oferta. A proteção das fontes de energia encontra-se novamente no topo da agenda política internacional. Contudo, o atual padrão de oferta de energia é acompanhado pela ameaça de danos graves e irreversíveis ao ambiente, incluindo alterações climáticas no mundo. A conciliação dos objetivos da segurança energética e da proteção ambiental exige uma intervenção forte e coordenada por parte dos estados, juntamente com o apoio da sociedade civil (International Energy Agency 2007). A tendência das políticas energéticas de privilegiar a consciência ambiental e o desenvolvimento sustentável com a diversificação, em longo prazo, das fontes de energia, resultou em um aumento do uso de fontes renováveis e no uso de sistemas de co-geração (Quezada, 2006, Zerriffi, 2004).

O Brasil é um país que possui uma das mais centralizadas infra-estruturas de energia do mundo, com cerca de 90% da capacidade geradora de energia, geralmente hidroelétricas, localizada em áreas remotas e com vastas redes de transmissão. Em função disso, os principais problemas brasileiros têm sido a mobilização de investimentos para infra-estrutura e a resolução de questões ambientais para a construção de grandes barragens e linhas de transmissão (International Energy Agency 2007; ANEEL - Brazilian Electricity Regulatory Agency 2008).

Esses fatores delineiam, em um futuro próximo, a tendência de mudança do panorama de energia elétrica no Brasil e no mundo, por meio da busca do aumento da Geração Distribuída (GD). A projeção é de uma alteração da estrutura atual, altamente centralizada e com centrais geradoras de grande capacidade, para uma nova estrutura fortemente descentralizada e com grande inserção de fontes geradoras de pequena e média capacidade. Esta tendência requer a reengenharia dos sistemas elétricos de potência e a inserção de recursos distribuídos de energia, e indicam que os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica buscam os seguintes objetivos (Lasseter 2007): (i) Suprir o crescimento da carga e reforçar a robustez com um mínimo crescimento do sistema de transmissão; (ii) Tornar maior o uso de fontes renováveis de energia, como eólica e sistemas fotovoltaicos; (iii) Aumentar a eficiência energética e reduzir a poluição e emissões de gases de efeito estufa; e (iv) Aumentar o nível de confiabilidade local para garantir a necessária qualidade de energia requerida pelos consumidores.

Considerando-se a energia solar, atualmente têm-se pesquisas que já contemplam o mapeamento deste recurso para o cenário brasileiro, representando fontes de dados confiáveis para sua utilização (Martins, Pereira et al. 2007; Martins, Pereira et al. 2008; Martins, Rüther et al. 2008).

Estudos para a inserção de fontes energéticas renováveis e intermitentes como a solar fotovoltaica na rede foram realizados contemplando vários aspectos, a citar: considerações sobre níveis de penetração (Denholm and Margolis 2007; Eltawil and Zhao 2010), qualidade de energia (Macêdo and Zilles 2009), viabilidade técnica de aplicações em sistemas conectados (Rüther, Knob et al. 2008). Considerando-se este panorama, em especial o relacionado à realidade brasileira, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias que possibilitem a efetiva inserção da energia solar fotovoltaica como alternativa considerada no planejamento de expansão da rede.

A inserção da geração distribuída ao sistema elétrico de potência interligado requer a efetiva consideração de cada fonte geradora durante o processo de tomada de decisão que inclui desde o planejamento da expansão até a operação em tempo real. O Planejamento da Expansão Energética baseia-se na incorporação, ao sistema gerador existente, de novas usinas geradoras de diferentes tipos, levando em conta suas características técnicas e econômicas. O Planejamento da Operação Energética determina a estratégia de geração em cada usina visando atender à carga com qualidade e confiabilidade, minimizando o valor esperado dos custos operativos e os riscos de déficit no período estimado. Estes planejamentos são preparados em etapas com objetivos específicos, que consideram diferentes horizontes - a Longo, Médio e Curto Prazo. Estas etapas estão interligadas/integradas e têm como meta estabelecer estratégias a serem seguidas pela Operação em Tempo Real. Em suma, faz-se necessária a caracterização técnica e econômica de cada fonte geradora a ser inserida no sistema elétrico de potência, em especial com pleno conhecimento dos prós e contras em relação à rede (Fortunato, 1990).

Dentre os critérios de planejamento do sistema gerador têm-se os critérios de garantia de suprimento que determina, para a avaliação de um sistema de expansão, a necessidade de simular a operação deste sistema. Para tanto, é de vital importância o conhecimento do comportamento da fonte a ser inserida no sistema, para o correto planejamento e operação da rede. Para a simulação de operação, uma das necessidades de atendimento deste critério é a simulação da potência gerada horária em função da sua fonte primária. Considera-se como potência gerada de uma fonte sua máxima capacidade de produção contínua, com as mesmas características do mercado, sem a ocorrência de déficits. Vários métodos podem ser utilizados para previsão de potência gerada em um sistema elétrico de potência, que incluem: (i) métodos especialistas que tomam por base a experiência acumulada; (ii) métodos estatísticos e (iii) métodos que envolvam inteligência artificial (Ying-zi and Jin-cang 2009). Este artigo propõe uma metodologia para previsão de potência gerada horária da geração fotovoltaica visando sua utilização no planejamento e operação elétrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia proposta está de acordo com os critérios de suprimento de energia probabilístico para previsão de potência gerada horária da geração fotovoltaica visando utilização no planejamento e operação elétrica abrange: (i) tratamento estocástico para o cálculo da radiação solar global horária em função da localidade escolhida proposta por, Cabral (2006); (ii) cálculo da potência gerada horária pelo módulo fotovoltaico escolhido. A simulação foi desenvolvida no programa Matlab®.

2.1 Tratamento estocástico para a radiação solar em função da localidade escolhida

O modelo de simulação apresentado nesta seção para a radiação solar global horária foi proposto por Cabral (2006). Este modelo apresenta o tratamento estocástico da radiação solar, sendo o ajuste dado por cadeias de Markov. Os dados meteorológicos necessários para a geração de dados horários utilizados na simulação, em especial os valores médios mensais de radiação global diária, são derivados de um ano típico. Este ano típico foi obtido por meio de observações de séries históricas (Cabral, 2006).

A equação estabelecida para a estimativa da radiação global horária sobre uma superfície inclinada, voltada para o equador é (Iqbal, 1983):

$$I_{\beta} = (I_h - I_d) r_b + I_r + I_s \quad (1)$$

em que:

- I_{β} - radiação global horária incidente em uma superfície inclinada direcionada ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);
- I_h - radiação global horária incidente em uma superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);
- I_d - radiação difusa horária incidente em uma superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);
- r_b - razão da radiação horária em uma superfície inclinada em relação à horizontal, na ausência da atmosfera terrestre (decimal);
- I_r - radiação difusa horária refletida pela terra incidente em uma superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);
- I_s - radiação difusa horária oriunda do céu incidente em uma superfície inclinada ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);

Para o cálculo de r_b , utilizou-se a relação entre a radiação horária sobre uma superfície inclinada, voltada para o equador, e a radiação horária sobre uma superfície horizontal, ambas na ausência da atmosfera terrestre. Esta escolha foi devido ao valor de r_b poder mudar rapidamente, podendo aproximar-se de infinito ou zero, nos ângulos do nascer e pôr-do-sol, quando se utiliza a relação entre os ângulos de incidência e zenital. Isto depende da latitude, inclinação e dia do ano.

O cálculo da radiação global horária (I_h) sobre uma superfície horizontal foi feito por meio das equações de (2) a (5) (Duffie e Beckman, 1980).

$$I_h = H r_t \quad (2)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos(\omega)) \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - (2\pi \omega_s / 360) \cos(\omega_s)} \quad (3)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (4)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (5)$$

em que:

- H - radiação diária global incidente em uma superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$);
- ω_s - ângulo do pôr-do-sol (graus); e
- ω - ângulo horário (graus).

A equação que descreve a radiação global diária incidente sobre uma superfície horizontal é (Iqbal, 1983):

$$H = H_0 K_T \quad (6)$$

em que:

- H_0 - radiação extraterrestre diária incidente em uma superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); e
- K_T - Índice de claridade diário (decimal).

O valor do índice de claridade diário (K_T) foi estimado com base em matrizes de transição de Markov, (Lorenzo, 1994). Analisando seqüências históricas de dados procedentes de diversas estações de medida, os autores do modelo propuseram um banco de dados, supostamente universal. A cada matriz de Markov se associa um intervalo de valores de K_T definido por seus valores máximo e mínimo, $K_{T_{\max}}$ e $K_{T_{\min}}$, respectivamente. Cada um destes intervalos se divide em 10 subintervalos, com mesmo número de linhas e colunas que cada matriz possui. Para gerar os valores dos índices de claridade diários, a partir das cadeias de Markov, foi necessário ter como dados de entrada, os valores dos índices de claridade mensais, calculados a partir dos dados de radiação global diária média mensal.

A radiação horária difusa incidente sobre superfície horizontal (I_d) foi calculada segundo a correlação de Orgill e Hollands, citada por Iqbal (1983). A radiação difusa horária oriunda do céu (I_s), incidente sobre uma superfície inclinada, foi calculada pela equação (7) com base no modelo anisotrópico proposto por Hay, (Iqbal, 1983).

$$I_s = I_d \left\{ \frac{I_h - I_d}{I_o} r_b + \frac{1}{2} (1 + \cos(\beta)) \left[1 - \frac{I_h - I_d}{I_o} \right] \right\} \quad (7)$$

em que:

I_o - radiação horária extraterrestre, ambas incidentes sobre uma superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); e

β - ângulo de inclinação da superfície voltada para o equador (graus).

Para o cálculo da radiação difusa horária refletida pelo solo incidente sobre uma superfície inclinada (I_r), voltada para o equador, foi, também, utilizado o modelo da reflexão anisotrópica, equação (8).

$$I_r = \frac{1}{2} I_h \rho (1 - \cos(\beta)) \left[1 + \sin^2\left(\frac{\theta_z}{2}\right) \right] (\cos(\omega)) \quad (8)$$

em que:

θ_z - ângulo zenital (graus); e

ρ - albedo da porção do solo (decimal).

Observando-se os histogramas esboçados para os dados de irradiância, verificou-se que a função que apresentava melhor ajuste era a função beta. Desta forma, foi utilizada a função densidade de probabilidade beta em função da potência no cálculo da potência média de saída dos geradores fotovoltaicos, e não em função da irradiância, como adotado por Borowy e Salameh (1996) (Cabral, 2006).

2.2. Cálculo da potência gerada horária pelo gerador fotovoltaico

De acordo com Machado Neto, (Machado Neto 2006), modelos matemáticos para simulações de células solares podem ser classificados como: (i) modelos para análise de desempenho; e (ii) modelos para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos. A diferença entre esses dois tipos de modelos consiste em um ser voltado mais para o comportamento interno como a modelagem do transporte de portadores elétron-lacuna e mecanismos de recombinação de portadores para os diversos tipos de tecnologias de células solares disponíveis. Já o outro modelo tem seu principal interesse nas características elétricas, ou seja, um foco maior no aspecto elétrico de saída do gerador fotovoltaico. Apesar de variados métodos para a simulação e avaliação de desempenho de geradores fotovoltaicos, não existe consenso entre qual dentre eles seria o mais apropriado, sendo que vários deles extremamente complexos e de difícil utilização (Zhou, Yang et al. 2007). Para este estudo, a abordagem utilizada foi de modelos para simulação com precisão aceitável e de fácil manipulação. Para tal, utilizou-se o circuito equivalente para uma célula solar de um diodo (modelo de um diodo) (Villalva, Gazoli et al. 2009).

Para o cálculo da potência gerada pelo gerador fotovoltaico, considerou-se o sistema sem seguidor do ponto de máxima potência, os dados fornecidos pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos como a tensão e corrente no ponto de máxima potência, a temperatura e irradiância de referência, entre outros, e os dados relativos à localização como latitude, longitude e temperatura. Os dados fornecidos pelos fabricantes de diversos tipos de módulos foram armazenados em um banco de dados. A este banco de dados podem ser acrescentados novos modelos de módulos fotovoltaicos e suas respectivas especificações técnicas, visto o significativo aumento da oferta no mercado.

A potência gerada de saída calculada é a máxima potência gerada para cada nível de irradiância em função da localidade escolhida. Também foi levada em consideração a dependência do comportamento de um gerador fotovoltaico em relação à temperatura ambiente. De forma semelhante à radiação solar, interessa, algumas vezes, determinar como este parâmetro (temperatura ambiente) evolui ao longo do dia, partindo de dados disponíveis, que, geralmente, são os valores de Temperatura máxima ($T_{\max}$) e Temperatura mínima ($T_{\min}$) locais. Para cada hora do dia, foi calculado um valor de temperatura ambiente, a partir do qual se pôde estimar a temperatura de trabalho dos módulos fotovoltaicos em cada nível de irradiância calculado, anteriormente.

Para o cálculo da corrente de saída, foram utilizadas as equações de (9) a (13) listadas a seguir (Machado Neto 2006).

$$I = n_p I_L - n_p \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_s n_1 V_T}\right) - 1 \right] \left[\frac{I_L}{\exp(V_{CAa} - 1)} \right] - \left[\frac{V + I R_s}{R_p} \right] \quad (9)$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + \left(\frac{I_{CCa} R_S}{R_P} \right)}{n_P - n_P \left(\exp \left(\frac{I_{CCa} R_S}{n_1 n_S V_T} \right) - 1 \right) \div [\exp(V_{CAa}) - 1]} \quad (10)$$

$$I_{CCa} = \frac{n_P I_{\beta}}{1000} \left(I_{CC} + (K_{Icc} (T_C - T_R)) \right) \quad (11)$$

$$V_{CAa} = \left[V_{CA} + K_{Vca} (T_C - T_R) + \left(\frac{1}{V_T} \ln \left(\frac{I_{CCa}}{I_{CC}} \right) \right) \right] \left[\frac{1}{\ln n_1 n_S V_T} \right] \quad (12)$$

$$V_T = K T_C / q \quad (13)$$

em que:

- I - Corrente de saída do gerador fotovoltaico (A);
- I_{CC} - Corrente de curto circuito do gerador fotovoltaico fornecido pelo fabricante (A);
- n_P - número de células em paralelo para o gerador fotovoltaico escolhido (adimensional);
- n_S - número de células em série para o gerador fotovoltaico escolhido (adimensional);
- n_1 - fator de idealidade do diodo de difusão (adimensional);
- V - tensão de saída do gerador fotovoltaico (V);
- V_{CA} - tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico fornecida pelo fabricante (V);
- R_S - resistência série (Ω);
- R_P - resistência paralela (Ω);
- T_C - temperatura de operação da célula (Kelvin);
- T_R - temperatura de referência (Kelvin);
- K - constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ joule/Kelvin);
- q - carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb);
- K_{Vca} - coeficiente de temperatura em relação à tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico, fornecido pelo fabricante ($V/^{\circ}C$); e
- K_{Icc} - coeficiente de temperatura em relação à corrente de curto circuito do gerador fotovoltaico, fornecido pelo fabricante ($A/^{\circ}C$).

Sendo que a temperatura de operação foi calculada em função da temperatura média (T_{AMB}) e em função da irradiação horária global (I_{β}), segundo a equação 14 (Machado Neto 2006).

$$T_C = T_{amb} + 273 + (I_{\beta} (T_{ONC} - 20) / 800) \quad (14)$$

em que:

- T_{ONC} - temperatura de operação da célula fornecida pelo fabricante ($^{\circ}C$); e
- T_{AMB} - temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

2.3 Estudo de Caso

Para a validação, esta metodologia foi aplicada para a localização da cidade de Viçosa, MG, que tem como coordenadas geográficas o paralelo de $20^{\circ}45'14''$, latitude sul, e o meridiano de $42^{\circ}52'54''$, longitude oeste. Foi calculada a potência gerada nesta localidade para 1 (um) módulo de 50Wp, modelo KC50 da Kyocera, com valor do albedo de 5% (telhado escuro) e uma inclinação do painel de 20 graus norte.

3. Resultados e Discussão

Inicialmente foi feita a simulação da radiação global horária solar para a localidade escolhida por um período de um ano, em seguida a simulação das curvas características do módulo fotovoltaico escolhido e por último o cálculo da potência gerada para o período considerado.

3.1 Radiação Solar

Considerando-se a localidade escolhida, os resultados para a simulação, nas condições pré-definidas, nos mostram que a radiação global horária no plano inclinado apresenta melhor resultado ao longo do ano, em especial para os dias de inverno, em comparação à no plano horizontal, Figura 1. Foram utilizados os resultados da radiação global horária no plano inclinado para o cálculo da potência gerada.

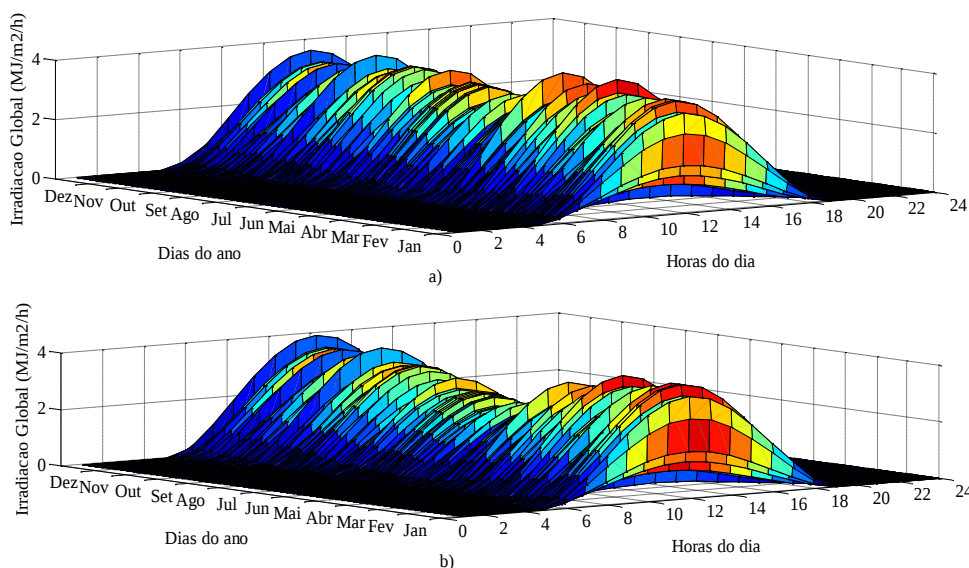


Figura 1- Resultado da simulação da irradiação global para a localidade de Viçosa, MG para:
a) superfície inclinada 20° Norte; e b) superfície horizontal

3.2 Simulação do módulo fotovoltaico:

Considerando-se o módulo escolhido, 50Wp Kyocera KC50, foram simuladas suas curvas características em diferentes níveis de radiação com temperatura constante de 25°C, para potência gerada em relação a corrente, Figura 2. A simulação destas curvas foi instituída para a validação do modelo utilizado. As curvas simuladas se mostraram de acordo com as fornecidas pelo fabricante. Para a validação deste modelo foram realizados ensaios no módulo com as condições previstas pelo fabricante, no Laboratório do GREEN (Grupo de Estudos em Energia), localizado na PUC Minas (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais), na localidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. A figura 3 apresenta os resultados comparativos entre os dados medidos e simulados para o módulo escolhido, e mostra a validade do modelo utilizado.

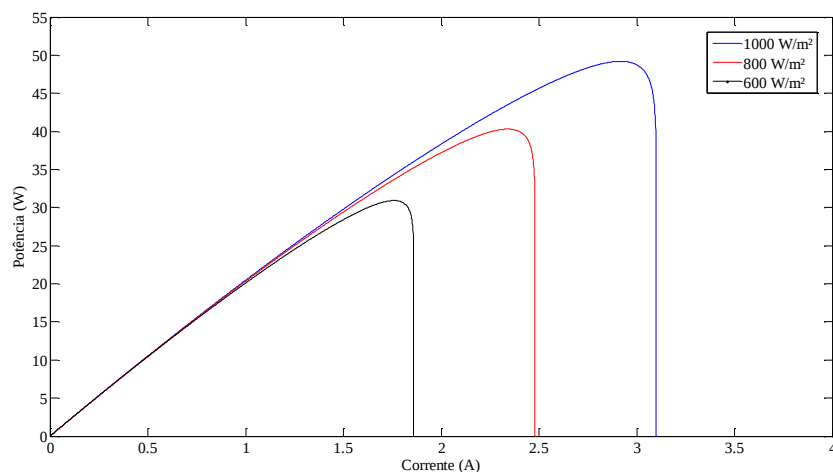


Figura 2: Simulação da curva de potência gerada em relação a corrente para o módulo de 50Wp (modelo Kyocera KC50) para diferentes níveis de radiação.

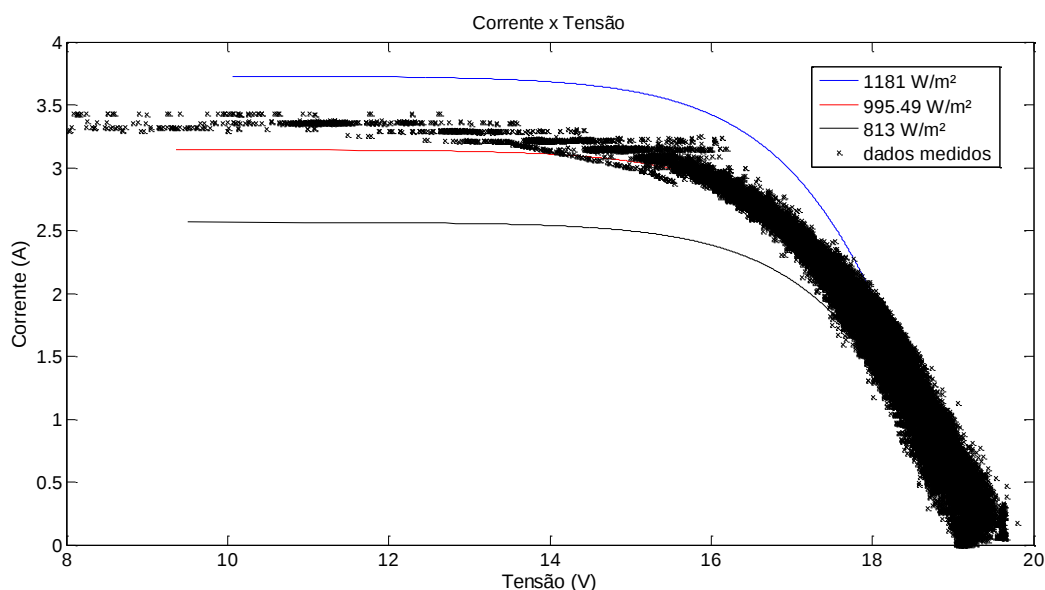


Figura 3: Dados medidos e simulados da curva de corrente em relação a tensão para o módulo de 50 Wp (modelo Kyocera KC50) para condições de A.M 1.5 na localidade de Belo Horizonte, MG.

3.3 Potência gerada:

A simulação para o cálculo da potência gerada por hora e dia do ano foi realizada e os resultados obtidos mostraram-se coerentes, inclusive explicitando uma maior influência da nebulosidade na atenuação da radiação global para os meses úmidos do que a disponibilidade de radiação na estratosfera, Figura 4. Esta simulação pode servir de base tanto para o planejamento da expansão energética quanto para o despacho das usinas, apresentando dados de energia firme para serem considerados.

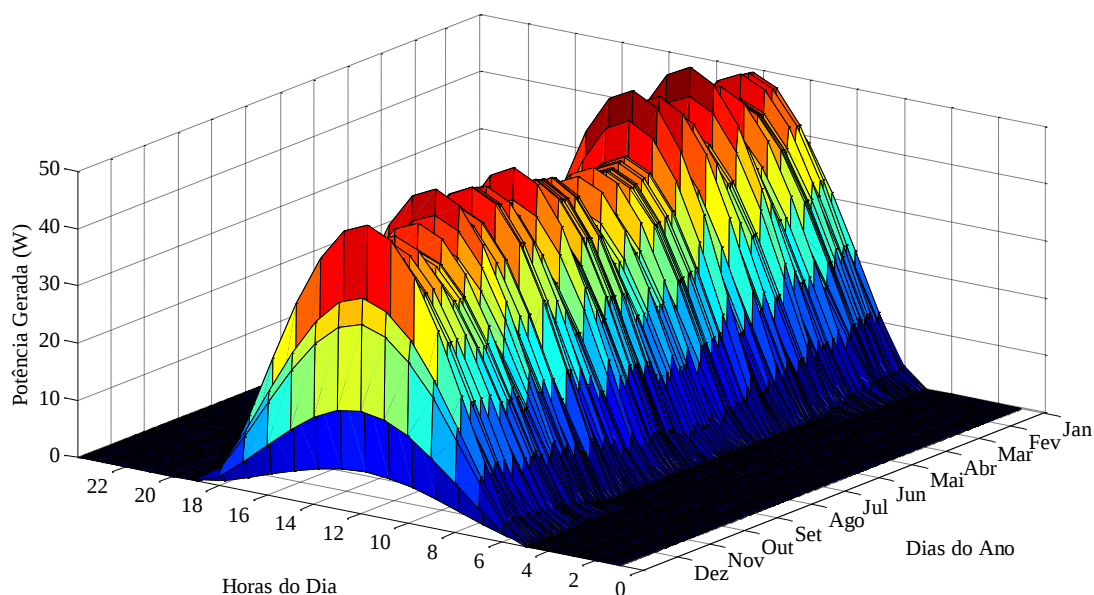


Figura 4: Simulação da Potência gerada diária para o módulo de 50Wp (modelo Kyocera KC50), na localidade de Viçosa, MG para todos os meses do ano.

A tabela 1 a seguir apresenta os resultados médios para um ano típico da simulação para a energia gerada, em Wh, para o módulo KC-50, localidade de Viçosa, Minas Gerais, durante um período de 12 meses, com os horários mais significativos, ou seja, apenas nos que existe a geração solar fotovoltaica.

Tabela 1: Média de Energia Estimada para um ano típico na localidade considerada

Horário	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
6:00	2.33	1.49	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.87	1.87	2.30
7:00	8.27	7.65	6.55	5.60	4.53	2.44	4.50	5.53	6.92	5.80	7.50	7.39
8:00	14.72	14.48	13.68	13.67	13.12	8.36	13.38	14.11	15.34	11.30	13.68	12.92
9:00	21.01	21.20	20.78	21.85	21.84	14.50	22.45	22.82	23.79	16.71	19.75	18.31
10:00	26.24	26.93	26.82	28.97	29.42	19.87	30.37	30.35	31.00	21.33	24.81	22.83
11:00	29.51	30.50	30.62	33.59	34.64	23.53	35.69	34.92	35.36	24.39	27.87	25.72
12:00	30.59	31.68	31.88	35.07	36.44	24.80	37.56	36.36	36.75	25.46	28.88	26.69
13:00	29.51	30.50	30.62	33.59	34.64	23.53	35.69	34.92	35.36	24.39	27.87	25.72
14:00	26.24	26.93	26.82	28.97	29.42	19.87	30.37	30.35	31.00	21.33	24.81	22.83
15:00	21.01	21.20	20.78	21.85	21.84	14.50	22.45	22.82	23.79	16.71	19.75	18.31
16:00	14.72	14.48	13.68	13.67	13.12	8.36	13.38	14.11	15.34	11.30	13.68	12.92
17:00	8.27	7.65	6.55	5.60	4.53	2.44	4.50	5.53	6.92	5.80	7.50	7.39
18:00	2.33	1.49	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.87	1.87	2.30

2 Conclusões

A Energia solar é aplicável em quase todas as circunstâncias devido à sua modularidade, portabilidade e simplicidade de instalação. É uma fonte de energia limpa que privilegia o meio ambiente, com uma longa vida útil e auto-suficiência energética sem custos de matéria prima. A inserção desta fonte na matriz energética requer o conhecimento do seu comportamento para que sua geração seja considerada tanto no planejamento da expansão quanto no despacho.

Sabe-se que o desempenho do gerador fotovoltaico é muito influenciado pelas condições climáticas, especialmente a irradiância solar e a temperatura. Neste trabalho foi proposta uma metodologia simples para o cálculo da potência gerada horária de um módulo fotovoltaico para uma determinada localidade. Este cálculo tem por base a latitude e longitude, inclinação do módulo, albedo e os dados fornecidos pelo fabricante. Os resultados demonstraram uma exatidão aceitável da metodologia proposta para o cálculo da potência gerada horária de saída dos módulos considerando-se as características meteorológicas da localidade escolhida.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a FAPEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008. Banco de informações de Geração. Acessado em dezembro de 2008: <http://www.aneel.gov.br/>
- Borowy, B. S. and Z. M. Salameh, 1996. "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system." *Energy conversion, IEEE transactions on* 11(2): 367-375.
- Cabral, C. V. T., 2006. *Análise de Dimensionamento Estocástico e Determinístico de Sistemas Fotovoltaicos Isolados*. Agricultural Engineering Department Viçosa, MG, Brazil, Federal University of Viçosa. PhD: 198.
- Denholm, P. and R. M. Margolis, 2007. "Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in traditional electric power systems." *Energy Policy* 35(5): 2852-2861.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Eltawil, M. A. and Z. Zhao, 2010. "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems-- A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1): 112-129.
- Fortunato, L.A.M.; Araripe Neto, T.A.; Albuquerque, J.C.R. & Pereira, M.V.F., 1990. *Introdução ao Planejamento da Expansão e da Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*. Eletrobrás, Editora Universitária, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.
- International Energy Agency, 2007. *World Energy Outlook - 2006*, IEA

- Iqbal, M., 1983. An Introduction to Solar Radiation. Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Academic Press, Vancouver, Canada, 390 p.
- Lasseter, R. H., 2007. "Microgrids and distributed generation." Journal of Energy Engineering-Asce 133(3): 144-149.
- Lorenzo, E., 1994. Electricidad Solar Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. 1. ed. Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madrid, 338 p.
- Macêdo, W. N. and R. Zilles, 2009. "Influence of the power contribution of a grid-connected photovoltaic system and its operational particularities." Energy for Sustainable Development 13(3): 202-211.
- Machado Neto, L. d. V. B., 2006. Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de máxima potência para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural. Agricultural Engineering Department Viçosa, MG, Brazil, Federal University of Viçosa. PhD: 196.
- Martins, F. R., E. B. Pereira, et al., 2007. "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project." Solar Energy 81(4): 517-528.
- Martins, F. R., E. B. Pereira, et al., 2008. "Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment." Energy Policy 36(8): 2853-2864.
- Martins, F. R., R. Rüther, et al., 2008. "Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications." Energy Policy 36(8): 2865-2877.
- Quezada, V. H. M., Abbad, J. R., San Román, T. G., 2006. Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation, in: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2,.
- Rüther, R., P. J. Knob, et al., 2008. "Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in Brazil." Energy Conversion and Management 49(5): 1074-1079.
- Villalva, M. G., J. R. Gazoli, et al., 2009. "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays." Power Electronics, IEEE Transactions on 24(5): 1198-1208.
- Ying-zi, L. and N. Jin-cang, 2009. Forecast of Power Generation for Grid-Connected Photovoltaic System Based on Markov Chain. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific.
- Zerriffi, H., 2004. Electric Power systems under stress: an evaluation of centralized versus distributed system architectures. Ph.D. Thesis. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, EUA.
- Zhou, W., H. Yang, et al., 2007. "A novel model for photovoltaic array performance prediction." Applied Energy 84(12): 1187-1198.

METHODOLOGY FOR SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATION FOR USE IN PLANNING AND ELECTRICAL OPERATION

Abstract. Research for renewable energy sources has improved significantly and results can be found in the market based on the increase of industrial renewable sources. Photovoltaic solar energy offers a large field of study due to its important function as a sustainable energy supply, benefitting the environment, as well as social and economical aspects of energy systems, including increases in system reliability, lower greenhouse gas emissions and others. The rapid technological advance of photovoltaic technologies has contributed to reduced fabrication costs and efficiency increases of these systems, making them more economically viable. On the other hand, the insertion of distributed generation in energy systems is a great challenge. This is particularly true in Brazil, which possesses a highly centralized system and thus greater difficulty for managing energy sources of reduced size. For this purpose, new methodologies for simulation are required to support the planning and operation of a secure and reliable interconnected electrical system. This study displays the importance for utilization of a methodology for photovoltaic generation simulation based on forecasting of power generated using a stochastic treatment for solar radiation and its consequent use for the managers of electrical system.

Key words: Renewable Energy, Photovoltaic Solar Energy, Electrical Planning and Operation, Simulation.