

SUNOUFGM: DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE APLICADO A PROJETO DE USINAS SOLARES

Luís Guilherme Monteiro Oliveira – luis.monteiro@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

Lucas Bacha Pereira Horta – lucasbph@gmail.com

Rafael Isaac Santos - r.isaacsantos@gmail.com

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

Ruibran Januario dos Reis - ruibrandosreis@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação Tratamento da Informação Espacial

Chigeru Tiba - tiba@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Eduardo Nohme - nohme@cpdee.ufmg.br

Selênio Rocha Silva - selenios@dee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Bruno Marciano Lopes – bruno.marciano@cemig.com.br

Gerência de Alternativas Energéticas, Companhia Energética de Minas Gerais

Wilson Negrão Macedo – wnmacedo@ufpa.br

Universidade Federal de Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Resumo. Neste trabalho são apresentadas as diretrizes iniciais para a estimativa da radiação solar incidente embasada em modelos matemáticos clássicos e séries sintéticas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a radiação solar e suas componentes diretas e difusas, e analisadas e avaliados alguns dos principais modelos utilizados para estimativa do recurso solar. Após essa etapa, iniciou-se a implementação do software denominado de SunoUFGM, em MATLAB® R2013a, cujo objetivo principal é realizar a estimativa da radiação solar, para qualquer localidade brasileira, utilizando os principais modelos matemáticos citados na literatura e validá-los e compará-los com dados coletados em campo por meio de estações solarimétricas, de forma a contribuir no desenvolvimento de projetos de usinas solares. Nessa primeira versão, os modelos matemáticos clássicos de Liu & Jordan (Isotrópico) e Perez (Anisotrópico) foram implementados, testados e comparados com dados de uma estação solarimétrica. O modelo estocástico baseado no Método de Matrizes de Transição de Markov (MTM) também foi implementado, testado e validado.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos para estimativa radiação solar, Matrizes de Transição de Markov, Validação.

1. INTRODUÇÃO

O primeiro passo no desenvolvimento de um projeto para a construção de uma usina solar fotovoltaica é averiguar a disponibilidade do recurso solar na área de interesse de forma que se tenha garantia do potencial da região e assim, um melhor retorno dos investimentos no empreendimento.

Dessa forma, em um primeiro momento, surge a necessidade em se estimar a radiação solar através de modelos matemáticos utilizando ferramentas computacionais e com isso, gerar simulações que possam trazer resultados confiáveis que serão validados, em um segundo momento, com dados coletados em campo, através de estações solarimétricas e/ou bancos de dados que contenham séries históricas confiáveis. A estimativa da radiação solar em médias horária, diária, mensal e anual em planos horizontal e inclinado e sua implementação por ferramenta computacional, MATLAB® R2013a, utilizando métodos clássicos e estocásticos mais especificamente os modelos de Liu & Jordan (Isotrópico), Perez (Anisotrópico) e o Método de Matrizes de Transição de Markov (MTM) é o escopo deste trabalho. Nas próximas seções, serão apresentados alguns dos principais modelos matemáticos encontrados na literatura e a implementação do programa SunoUFGM o qual realiza a estimativa da radiação solar para qualquer localidade brasileira e sua validação com dados de estação solarimétrica e sua análise através de figuras de mérito estatístico, ou seja, erros médios.

2. MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR

O desenvolvimento de métodos/modelos matemáticos capazes de estimar a radiação solar para o correto dimensionamento de instalações solares seja um sistema fotovoltaico seja um sistema termosolar tornaram-se fundamentais. A seguir são apresentados alguns dos principais métodos matemáticos e equações, de forma sucinta e objetiva, para estimativa da radiação solar em planos horizontais/inclinados.

2.1 Métodos Clássicos

Um dos métodos tradicionais que possibilita a estimativa do recurso solar foi desenvolvido por Angström (1924) e evoluído por Bennett (1965). O modelo empírico proposto por Bennet (1965) a partir do número de horas de brilho solar (insolação), relaciona a radiação solar global média diária, no plano horizontal, para um dia claro na localidade em questão, à fração média de horas possíveis de brilho solar (insolação) conforme mostra Eq. (1).

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} + ch \quad (1)$$

\bar{H} : Radiação solar global média diária mensal em superfície horizontal.

\bar{H}_0 : Radiação solar extraterrestre.

'a', 'b' e 'c': constantes empíricas que dependem da localidade e da estação do ano.

\bar{n} : Número de horas de insolação média diária mensal.

\bar{N} : Média mensal do número de horas máximo possível de horas diárias de insolação.

h: altitude do local.

O coeficiente $\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$ é conhecido como índice de claridade \bar{K} .

2.2 Radiação solar direta e difusa, no plano horizontal, em média mensal

Estudos sobre a disponibilidade diária da radiação solar mostram que a fração média, $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$, que é a componente difusa, é uma função do índice de claridade (\bar{K}). Liu e Jordan (1960) formularam modelo matemático que se tornou referência sendo amplamente utilizado. O método calcula a componente difusa em média mensal, em plano horizontal, baseando-se no índice de claridade em média mensal conforme mostra a Eq. (2).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,390 - 4,027(\bar{K}) + 5,531(\bar{K})^2 + 3,108(\bar{K})^3 \quad (2)$$

\bar{H}_d : Radiação solar difusa média diária mensal em superfície horizontal.

Collares-Pereira e Rabl (1979) desenvolveram uma correlação utilizando a hora angular do pôr-do-sol de acordo com o dia médio representativo do mês conforme mostra a Eq. (3).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,0775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)]\cos(\bar{K} - 103) \quad (3)$$

Sendo que ω_s é ângulo horário que designa a hora do nascer e do pôr-do-sol, em determinada localidade.

2.3 Radiação solar direta, difusa e global em média horária

De acordo com Duffie e Beckman (2013) estudos estatísticos da distribuição temporal da radiação solar global em superfícies horizontais, utilizando dados diários médios mensais para diversas estações levaram à formulação do coeficiente r_t definido como a razão entre a radiação solar global horária e a radiação solar global diária conforme mostra a Eq. (4)

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (4)$$

Duffie e Beckman (2013) propuseram r_t como função da duração astronômica do dia e hora conforme mostra a Eq. (5).

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos w_s}{\sin w_s - \frac{\pi w_s}{180} \cos \omega_s} \quad (5)$$

Sendo que ω corresponde ao deslocamento angular do Sol em relação ao meridiano local em decorrência do movimento de rotação da Terra.

2.4 Radiação solar sobre superfície inclinada (modelos de transposição)

Para o cálculo da radiação solar incidente em superfícies inclinadas é necessário conhecer as direções às quais as componentes direta e difusa da radiação solar chegam à superfície em questão, considerando que a grande maioria dos dados disponíveis são em base horária ou diária da radiação solar em plano horizontal.

São dois os principais métodos para estimativa da radiação em plano inclinado. O primeiro, mais simples, considera o céu isotrópico (os termos das componentes difusas são constantes para toda a abobada celeste) e o segundo, mais complexo, considera o céu anisotrópico (os termos das componentes difusas são considerados separadamente e, portanto, não são constantes para toda a abobada celeste).

Liu e Jordan (1960) propuseram o modelo denominado de modelo “Difusa Isotrópico” o qual a radiação solar incidente em uma superfície inclinada é composta de três componentes, ou seja, radiação solar direta (1º termo), radiação solar isotrópica difusa (2º termo), e o albedo/reflexão (3º termo), conforme mostra a Eq. (6).

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} \right) R_B + \bar{H}_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

Sendo que:

R_B : razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e na horizontal.

ρ_g : refletância da vizinhança nas proximidades dos módulos fotovoltaicos.

\bar{H}_D : Radiação solar difusa incidente no plano inclinado, em média mensal.

β : ângulo formado pelo plano inclinado do módulo fotovoltaico e o plano horizontal.

2.5 Modelos Anisotrópicos

Apesar do modelo “Difusa Isotrópico” ser simples de entender e de calcular a radiação solar global em superfície inclinadas, ele é conservativo e tende a subestimar \bar{H} , porém, modelos melhorados e mais complexos, denominados de modelos anisotrópicos, foram desenvolvidos por diversos autores (Klucher, 1978); (Davies e Hay, 1978); (Skartviet e Olseth, 1986); (Reindl, 1988); (Perez et al., 1987, 1990) os quais levam em conta as componentes do céu denominadas de difusa circunsolar e difusa do horizonte em superfícies inclinadas. Reindl (1988) desenvolveu métodos para estimativa da radiação solar direta e difusa em superfícies inclinadas em médias mensais. Perez et al. (1987, 1990) desenvolveram uma série de modelos, baseados no seu próprio modelo matemático original de céu anisotrópico, desenvolvido inicialmente em 1979, partindo de uma análise mais detalhada das três componentes da radiação solar difusa. Assim como mostrado em Eq. (7).

$$I_t = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \cdot \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \quad (7)$$

Sendo que:

I_t : radiação solar total.

I_b : radiação solar direta horária.

I_d : radiação solar difusa horária.

$I \rho_g$: radiação solar refletida horária.

F_1 : coeficiente de brilho solar circunsolar.

F_2 : coeficiente de brilho solar no horizonte.

a e b: são coeficientes que designam os ângulos de incidência do cone da radiação circunsolar em superfícies no planos horizontal e inclinado.

Onde F_1 e F_2 são encontrados através de tabelas, a partir do índice de transparência do céu (ε). ‘a’ e ‘b’ são dependentes do ângulo de incidência da radiação solar direta sobre uma superfície com determinada orientação e inclinação (θ), e do ângulo zenital (θ_z).

2.6 Sequências sintéticas da radiação solar

Aguiar, Collares-Pereira e Conde (1988) apresentaram modelo matemático capaz de gerar sequências sintéticas de radiação solar global diária, para quaisquer localidades, utilizando apenas dados de radiação solar global mensal ou ainda, número de horas de insolação, em média mensal. O modelo foi desenvolvido utilizando dados disponíveis de estações meteorológicas/solarimétricas de Lisboa, Faro e Bragança (Portugal), Ponta Delgada (Ilha Açores), Porto Santo (Ilha Madeira), Trappes (França), tendo sido validado para cidades de Portugal e Estados Unidos e posteriormente, para o Brasil por Macagnan (1989), Guimarães (1995), Tiba, Fraidenraich e Gallegos (2002) e Krenzinger e Bugs (2010).

Esta metodologia está baseada em fundamentos de processos estocásticos utilizando uma biblioteca denominada de Matrizes de Transição de Markov (MTM) de primeira ordem. Os sistemas denominados cadeias de Markov, possuem a propriedade pela qual, dado um presente estado, tão somente este influenciará o futuro, tornando-se dispensáveis os dados sobre estados passados, propriedade está denominada de propriedade de Markov.

Portanto, o modelo é baseado em duas observações fundamentais: a primeira, que qualquer valor dado de radiação solar diária parece mostrar uma correlação significativa com o valor da radiação solar imediatamente

precedente na sequência e, a segunda, que a função probabilidade para qualquer dado período parece ser uma forma associada com somente o valor médio do índice de claridade (K_t) para aquele período.

A primeira observação leva então, à escolha da técnica das Matrizes de Transição de Markov (MTMs) de primeira ordem. Cada elemento destas matrizes representa a probabilidade que o diário possuir dois valores particulares em quaisquer dois dias consecutivos. A segunda observação leva à derivação de uma biblioteca composta de dez matrizes, correspondendo cada uma a um intervalo preestabelecido do índice de claridade.

3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE SunoUFMG

De forma a implementar e testar os modelos descritos nas seções anteriores, está em fase de desenvolvimento o software denominado de SunoUFMG na plataforma MATLAB® - R2013a. O mesmo possui como principal objetivo realizar a estimativa da radiação solar e suas componentes, direta e difusa, em médias horárias, diárias e mensais, tanto para o plano horizontal quanto para o plano inclinado, utilizando os modelos clássicos já consolidados, e também modelos estocásticos através do modelo matemático de Matrizes de Transição de Markov (MTM). Na atual versão do software foram implementados os modelos de Perez et al. (1987, 1990), céu anisotrópico, de Liu e Jordan (1960), céu isotrópico, além do método MTM proposto inicialmente por Aguiar, Collares-Pereira e Conde (1988).

3.1 Estrutura do Software

Ao se utilizar o software SunoUFMG o usuário deve fornecer algumas informações iniciais. Em um primeiro momento, deve ser selecionado o tipo de consulta que se deseja realizar, ou seja, “Radiação Solar Horária”, “Radiação Solar Diária” ou “Radiação Solar Média Mensal”. Na primeira opção, o software SunoUFMG gera uma sequência sintética para um intervalo de tempo de 1(uma) hora através do modelo matemático de Matrizes de Transição de Markov. Enquanto para a segunda opção é desenvolvida simulação para um intervalo de tempo de 1(um) dia que pode ser gerado por qualquer um dos três modelos (Perez, Liu e Jordan e MTM), de acordo com a opção do usuário. Já para a última opção de tipo de consulta, o software SunoUFMG gera uma média para as componentes da radiação solar, direta e difusa, além da radiação solar global para cada mês do ano, seja através dos modelos de céu isotrópico de Liu & Jordan (1960), céu anisotrópico de Perez et al. (1987, 1990) ou MTM de Aguiar, Collares-Pereira, Conde / Macagnan (1989), de acordo com a opção do usuário.

Em um segundo momento, é necessário que o usuário escolha a data para qual será gerada a sequência de dados/simulação, o mês, em que se deseja saber a média mensal, e pré-determinar o horário, caso o tipo de consulta seja em base horária. Outras informações que devem ser inseridas previamente pelo usuário são: a orientação (ângulo azimutal de superfície) e a inclinação (β) do módulo fotovoltaico. Além disso, é necessário informar qual a latitude (em graus) e altitude da localização em que o usuário deseja que o software gere as séries sintéticas/simulações.

Por fim, após fornecer todos os elementos necessários o usuário pode visualizar os resultados na janela “Gráficos da Radiação Solar” e na janela “Informações”. Nas mesmas são apresentados os valores para radiação solar global, direta, nos planos horizontal e inclinado, de maneira numérica, através de valores, em kWh / m², e com representação gráfica (gráficos plotados), com o intuito de possibilitar uma melhor visualização sobre a ordem de grandeza de cada parâmetro. Na Fig. 1 é apresentada a tela da interface gráfica desenvolvida para o software SunoUFMG.

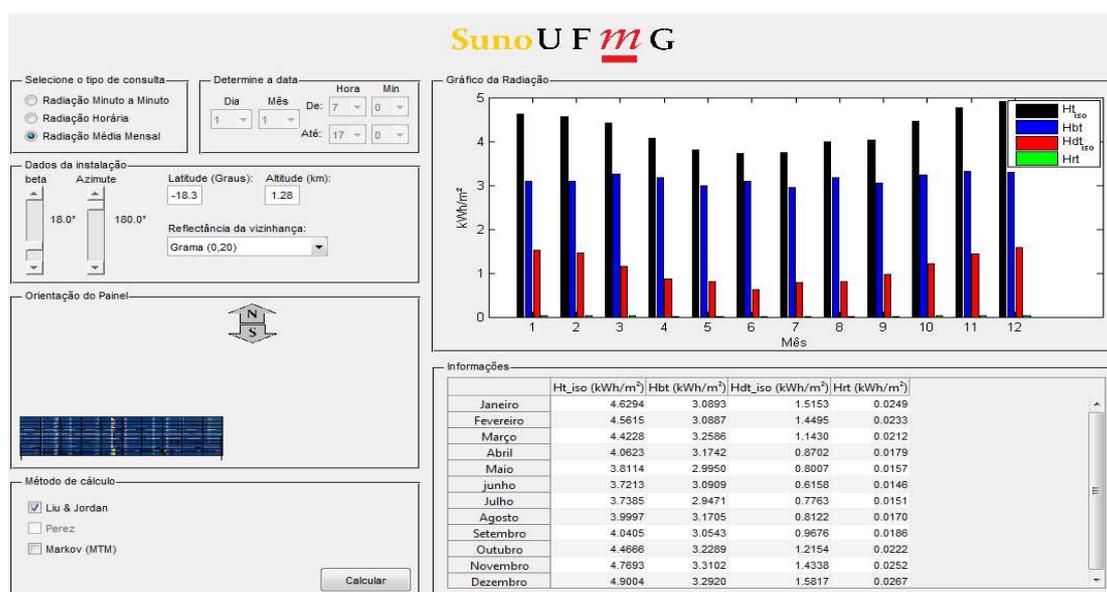


Figura 1 - Interface gráfica do software SunoUFMG

3.2 Validação dos dados simulados

Com o intuito de validar os resultados gerados pelo software e certificar o uso do mesmo para realizar a estimativa da radiação solar em projetos de usina solares com confiabilidade e precisão foi realizado a comparação das sequências sintéticas geradas com dados reais, ou seja, dados providos de estação solarimétrica. Dessa forma, foram utilizados dados da radiação solar global, de estação solarimétrica localizada no campus da Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), em Diamantina-MG, instalada pelo projeto de P&D CEMIG / ANEEL GT 468 (Atlas Solarimétrico de Minas Gerais) em Julho de 2012. A estação solarimétrica possui piranômetros para medição da irradiância solar global e sua componente difusa (em plano horizontal), pireliômetro (mediação da componente irradiância solar direta) e rastreador solar do fabricante Kipp & Zonen modelo CMP21, CHP 1 e Solys 2 respectivamente além de possuir outros sensores para medições climatológicas (temperatura ambiente, direção e velocidade do vento e etc). A Fig. 2 mostra a estação solarimétrica utilizada para a validação dos modelos.



Figura 2 - Estação solarimétrica utilizada para validação dos modelos.

Além disso, foram aplicadas figuras de mérito estatístico amplamente utilizados e citados na literatura Stone (1993), Gueymard (2009), Falayi et al. (2011), Ineichen, P. (2011), ou seja, foram considerados o erro sistemático (“Mean Bias Error” - MBE) e o erro da raiz quadrada média (“Root Mean Square Error” - RMSE) conforme descritos pelas Eq.(8) e Eq.(9) respectivamente.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Onde n é o número de pares de dados que serão comparados e d_i é a diferença registrada entre o i ésimo dado medido e o i ésimo dado estimado.

De acordo com Stone (1993), a leitura dos resultados gerados por esses métodos de avaliação é simples, consistindo apenas de uma comparação, ou seja, a sequência estimada que gerar o RMSE ou MBE mais próximo de zero, é melhor (possui o menor erro em relação à sequência original de dados). Cabe destacar e conforme mostram as Eq. (10) e Eq.(11), tanto o RMSE quanto o MBE mantêm a unidade de origem (irradiação solar, em kWh/m²).

$$RMSE = \left(\frac{int}{int} \sum_{i=int}^{int} \left(\frac{kWh}{m^2} - \frac{kWh}{m^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow RMSE = \frac{kWh}{m^2} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{int}{int} \sum_{i=int}^{int} \left(\frac{kWh}{m^2} - \frac{kWh}{m^2} \right) \rightarrow MBE = \frac{kWh}{m^2} \quad (11)$$

Onde: *int* = número inteiro sem unidade.

O método RMSE destaca grandes variações entre os dados, ou seja, mesmo em uma sequência com diferenças relativamente baixas entre dados estimados e medidos, um local que possuir uma estimativa que ficar muito fora do dado medido terá grande impacto no valor final da RMSE. Se por um lado essa “sensibilidade” ajuda no entendimento do comportamento de parcelas pequenas de dados, que passaria despercebido em uma média de longo termo, esse comportamento da RMSE prejudica o desempenho global de uma série de dados estimados que apesar de possuir alguns dados muito discrepantes com a realidade, possui uma maioria de dados condizentes com o que foi medido. Uma outra desvantagem desse método é a impossibilidade de identificação dos erros como valores subestimados ou superestimados (perda do sinal negativo).

Já o método MBE indica o erro médio de sequências longas de dados, diluindo erros discrepantes entre pares de dados fora da média. Um MBE negativo indica que os valores da sequência estimada foram subestimados e um valor positivo indica valores sobrestimados. No entanto, no processo de “diluição” dos erros, valores subestimados podem ser anulados por valores sobrestimados, mascarando alguns erros observados.

3.3 Validação das sequências sintéticas

Para validar os dados sintéticos gerados pelo software SunoUFMG foram construídas 10 sequências de valores da radiação solar global, média diária, ao longo de uma, sendo que todas as sequências foram modeladas através do método estocásticos das Matrizes de Transição de Markov. Cada série, composta por 365 dados, foi comparada com os valores coletados pela estação de Diamantina entre Agosto de 2012 e Julho de 2013 através das figuras de mérito estatístico, ou seja, o MBE e o RMSE. Na Tab. 1 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 1 - Erros médios das sequências sintéticas para radiação solar global, média diária.

Número da Sequência	MBE	RMSE
1	0,000	2,17
2	-0,001	2,23
3	-0,002	2,26
4	0,000	2,24
5	-0,001	2,26
6	-0,001	2,27
7	-0,001	2,23
8	-0,001	2,24
9	0,003	2,27
10	-0,001	2,09

A partir dos valores de MBE e RMSE encontrados na Tab. 1, foram selecionadas as três sequências sintéticas com os menores erros para construir a distribuição de frequência dos dados e novamente relacionar com os dados reais. A Tab. 2 apresenta os resultados encontrados e a Fig. 3 apresenta o histograma comparativo entre os dados gerados e os coletados em campo

Tabela 2 - Distribuição de frequência dos dados.

Bloco	Frequência - Real	Frequência – Série 10	Frequência – Série 1	Frequência – Série 7
0	13	0	0	0
0,7616	5	1	2	6
1,5233	9	11	16	10
2,2850	17	25	21	20
3,0467	27	27	15	18
3,8084	49	46	48	58
4,5701	56	76	93	65
5,3317	64	73	62	73
6,0934	42	29	44	51
6,8551	40	37	21	33
7,6168	26	33	29	21
8,3785	11	7	10	10
9,1402	3	0	4	0
9,9018	1	0	0	0

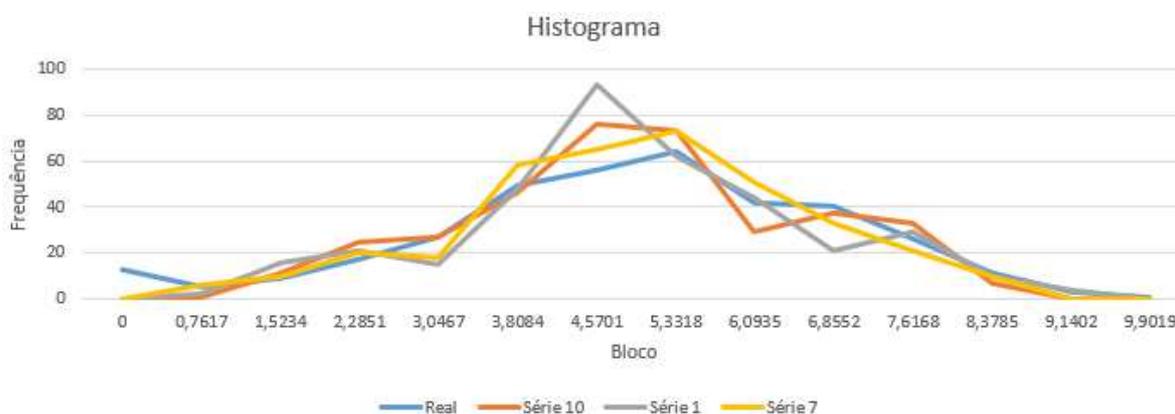


Figura 3 - Histograma comparativo entre os dados gerados e os coletados em campo.

De acordo com a Tab. 2, é possível notar que treze médias diárias ao longo de um ano da estação solarimétrica de Diamantina assumiram valor igual a zero. Este fato pode indicar algum erro ocorrido no dia da medição, erro na coleta dos dados ou desconexão dos equipamentos para manutenção preventiva. Contudo, esses fatos não comprometem a série real anual por terem ocorridos em dias descontínuos.

Para alcançar uma precisão melhor na validação dos dados, também foram comparadas as médias mensais da radiação solar global dos dados gerados (simulados) com as médias mensais da estação solarimétrica de Diamantina conforme pode ser visto na Tab. 3 onde são apresentados os valores para a radiação solar global, em média mensal para a estação solarimétrica de referência e na Tab. 4 o erro médio RMSE e a Fig. 4 a série real e série sintética para um mesmo período do ano.

Tabela 3 - Radiação solar global em média mensal ($kWh/m^2.dia$)

Mês	Estação - Diamantina	Série 10	Série 1	Série 7
Janeiro	3,019	3,011	3,009	3,014
Fevereiro	6,232	6,224	6,224	6,224
Março	4,085	4,078	4,081	4,078
Abril	3,826	3,819	3,817	3,825
Mai	3,903	3,907	3,913	3,903
Junho	4,373	4,374	4,372	4,371
Julho	4,381	4,379	4,383	4,373
Agosto	4,482	4,479	4,488	4,475
Setembro	4,854	4,855	4,851	4,857
Outubro	5,991	5,991	5,988	5,989
Novembro	3,658	3,657	3,665	3,664
Dezembro	6,314	6,328	6,327	6,328

Tabela 4 - Erro RMSE para as sequências sintéticas para média mensal da radiação solar global.

Número da sequência	RMSE
10	0,006
1	0,007
7	0,006

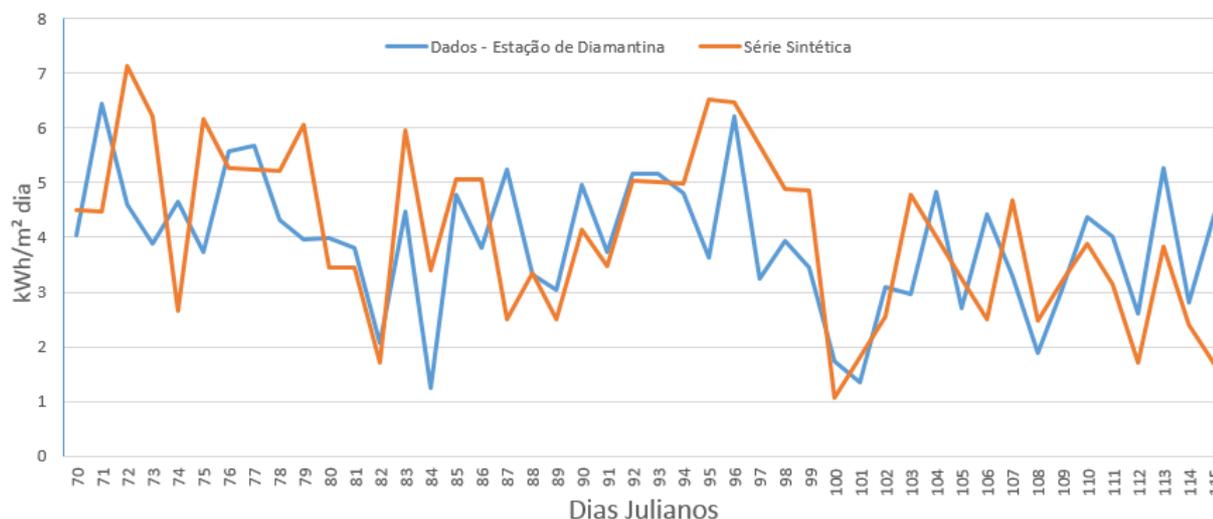


Figura 4 - Série de dados coletados em campo (azul) e série sintética (laranja) para um mesmo período do ano.

Os resultados obtidos ao comparar as sequências sintéticas geradas pelo método estocástico de Markov com os dados fornecidos pela estação solarimétrica de Diamantina foram satisfatórios. De tal maneira que, o erro apresentado pelas comparações estatísticas é aceitável e está dentro de um padrão de variação, ao partir do pressuposto que a base das Matrizes de Transição de Markov é um número aleatório. A Fig. 4 apresenta uma grande similaridade entre as sequências assim, pode-se aceitar que ambas as sequências possuem um mesmo perfil de comportamento.

Para os modelos matemáticos de Perez e Liu & Jordan, que são decorrentes de fórmulas matemáticas desenvolvidas realizando algumas considerações e com variáveis fixas para uma determinada condição, como foi verificado na revisão bibliográfica, não há a geração de inúmeras sequências de dados e sim apenas uma estimativa de um valor fixo para a radiação solar global em média horária e mensal, respectivamente. Portanto, os valores calculados

pelas fórmulas, nesse primeiro momento no plano horizontal, foram comparados com os dados da estação e nota-se, através da Tab. 5, que apesar dos métodos serem distintos os resultados de ambos os métodos foram idênticos.

Tabela 5 - Radiação solar, em média horária, plano horizontal (kWh/m^2).

Hora	Estação - Diamantina	Perez	Liu & Jordan
7	0,094	0,170	0,170
8	0,197	0,309	0,309
9	0,264	0,448	0,448
10	0,451	0,566	0,566
11	0,321	0,646	0,646
12	0,521	0,675	0,675
13	0,203	0,646	0,646
14	0,097	0,566	0,566
15	0,041	0,448	0,448
16	0,027	0,309	0,309
17	0,032	0,170	0,170
MBE	-	0,246	0,246
RMSE	-	0,282	0,282

Nota-se, da análise dos valores de radiação solar global, em plano horizontal, em média horários apresentados na Tab. 5 que há uma variação entre os dados coletados em campo e os simulados sendo que os mesmos tendem a sobrestimar em 0,246 (MBE) e apresentaram um valor de RMSE igual 0,282 mostrando a qualidade dessa comparação.

No entanto, apesar de todos esses indicadores (MBE e RMSE) fornecerem uma boa forma de comparação entre modelos de estimativa de radiação solar, eles não indicam objetivamente se um modelo é satisfatório em termos estatísticos, ou seja, se dois modelos com resultados estatisticamente ruins em relação aos dados medidos forem comparados, o “menos pior” será escolhido, no entanto, pode ser que o “menos pior” ainda sim possua erros inadmissíveis para aplicação do modelo. Dessa forma, Stone (1993) propôs a utilização do método t-estatístico (t de Student) para avaliar a eficácia de um modelo de estimativa da radiação solar individualmente, identificando se os resultados encontrados são estatisticamente significativos. A Eq. 12 mostra como se calcula essa figura de mérito.

$$t = \left(\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Similar aos outros modelos estatísticos, quanto menor o valor de t , melhor é o desempenho do modelo. Para determinar se os valores estimados pelo modelo são estatisticamente significantes é necessário determinar um valor crítico de t (obtido de tabelas), se $t < t_{crítico}$ o modelo é estatisticamente significativo. Dessa forma, o método descrito foi aplicado nos modelos matemáticos MTM e Liu&Jordan para a estimativa da radiação solar global diária, em plano horizontal para a cidade de Diamantina/MG. Os valores de MBE, RMSE, MBE1, RMSE1, MBE2, RMSE2 e t foram calculados para cada modelo sendo que os resultados encontrados são apresentados na Tab. 6, onde o t-crítico foi calculado com $n - 1$ graus de liberdade (como o número de dados disponíveis é de 349, o grau de liberdade é 348) para Diamantina e ambos para uma significância de $\alpha = 0.001$.

Tabela 6 - Valores de MBE, RMSE, MBE1, RMSE1, MBE2, RMSE2 e t calculados.

Método de Avaliação	Diamantina/MG	
	MTM	Liu&Jordan
MBE	-0,059	-0,643
RMSE	1,850	1,788
MBE1	0,331	0,278
RMSE1	4,752	6,866
MBE2	-0,012	-0,137
RMSE2	0,395	0,381
t	0,591	7,193
$t_{crítico}$	3,318	3,318

Como é possível observar na Tab. 6, o método MTM apresentou $t(0,591) < t_{crítico}(3,318)$ portanto, os resultados encontrados para esse modelo são estatisticamente significativos. Já o modelo de Liu&Jordan, para esse estudo, apresentou $t(7,193) > t_{crítico}(3,318)$ e assim, para esse modelo, os resultados não são estatisticamente significativos.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma breve revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos denominados de clássicos para estimativa da radiação solar (global, difusa e direta), em bases horária, diária, mensal e anual, em plano horizontal e inclinado. Os modelos de Liu & Jordan (1960), para céu isotrópico, e Perez et al. (1990), céu anisotrópico, por serem bastante citados na literatura e aplicados, foram implementados no software, em desenvolvimento, denominado de SunoUFGM, em MATLAB[®] R2013a, cujo objetivo principal é realizar a estimativa da radiação solar, para qualquer localidade brasileira. Além dos modelos clássicos, foi também estudado e implementado no software, o modelo proposto por Aguiar et al. (1988) que é capaz de gerar séries sintéticas do recurso solar através do método estocástico denominado de Matrizes de Transição de Markov (MTM).

Os dados de radiação solar global gerados pelo software foram comparados através de dados coletados em campo de estação solarimétrica localizada na cidade de Diamantina-MG e validados utilizando figuras de mérito estatístico, ou seja, o erro sistemático (“Mean Bias Error” - MBE), erro da raiz quadrada média (“Root Mean Square Error” - RMSE) e também pelo método t-estatístico (“t de Student”) proposto por Stone (1993).

Os resultados obtidos ao comparar as sequências sintéticas geradas pelo método estocástico de Markov com os dados fornecidos pela estação solarimétrica de Diamantina foram satisfatórios conforme apresentados na Tab. 3 e Tab. 4 e mais claramente pela Fig. 4 onde os dados apresentam uma grande similaridade entre as sequências mostrando que as mesmas possuem um perfil similar de comportamento. Cabe salientar que o erro apresentado pelas comparações estatísticas é aceitável e está dentro de um padrão de variação, a partir do pressuposto que a base das Matrizes de Transição de Markov é um número aleatório.

Para os modelos matemáticos de Perez e Liu & Jordan a radiação solar global em média horária e mensal, para plano horizontal foram calculadas, e os resultados encontrados, apesar dos métodos serem distintos, ambos os métodos foram idênticos. Pela Tab. 5 é possível notar que há uma variação entre os dados coletados em campo e os simulados sendo que os mesmos tendem a sobrestimar em 0,246 (MBE) e apresentaram um valor de RMSE igual 0,282 mostrando a qualidade dessa comparação.

Em relação ao método t-estatístico (“t de Student”) o mesmo foi aplicado nos modelos matemáticos MTM e de Liu & Jordan para a estimativa da radiação solar global diária, em plano horizontal. Os valores de MBE, RMSE, MBE1, RMSE1, MBE2, RMSE2 e *t* foram calculados e apresentados na Tab. 5 sendo que o método MTM apresentou os resultados mais significativos estatisticamente.

Finalmente, é importante salientar e reforçar que o software SunoUFGM se encontra em fase de desenvolvimento bem como os resultados encontrados até o momento são iniciais e portanto, melhoras nos modelos e análises já implementados bem como a inserção de novos métodos anisotrópicos (ex.: Skartviet e Olseth (1986), Reindl (1988) entre outros), validações através de estações solarimétricas (ex.: de Diamantina e de outras localidades) e análises (ex.: estudo da propagação das incertezas na instrumentação utilizada) serão ainda inseridos de forma que a estimativa da radiação solar através dos modelos matemáticos utilizando ferramenta computacional em desenvolvimento possam trazer resultados confiáveis para utilização em projetos de usinas solares.

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica 13 do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. Ao projeto de P&D CEMIG/ANEEL GT 468 pela disponibilidade dos dados. Ao Fundo de Incentivo à Pesquisa (FIP) da PUC Minas, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Angstrom, A. Solar and terrestrial radiation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 50, pp. 121-126, 1924.
- Bennett, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States, *Solar Energy*, 9, 145 (1965).
- Liu, B. Y. H., and R. C. Jordan. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*, Vol. 10, No. 3, 4(3):1e19. 1960.
- Collares-Pereira, M., Rabl, A. The average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, v. 22, pp. 155-164, 1979.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. 2006.
- Perez, R., R. Stewart, C. Arbogast, R. Seals and D. Menicucci. A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, *Solar Energy*, Vol. 39, pp. 221-231. 1987.
- Hay, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation on horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* 23, 301-307, 1979.
- Davies, J. A., and J. E. Hay. Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface in *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop* (J. E. Hay and T. K. Won, eds.), pp. 32-58, April 17-19, 1978.
- Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*; 44:271 e89, 1990.
- Skartviet, A., and J. A. Olseth. Modelling Slope Irradiance at High Latitudes, *Solar Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 333-344, 1986.

- Reindl, D. T. Estimating Diffuse Radiation on Horizontal Surfaces and Total Radiation on Tilted Surfaces, M.S. thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI. 1988.
- Klucher, T. M. Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces, NASA TM-78842, NASA, Lewis Research Center, Cleveland, OH, March, 1978.
- Diez-Mediavilla M, de Miguel A, Bilbao J. Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). Energy Conversion and Management; 46:2075 e92, 2005.
- Loutzenhiser PG, Manz H, Felsmann C, Strachan PA, Frank T, Maxwell GM. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. Solar Energy; 81:254 e67, 2007.
- Demain, C., Jouné, M. Bertránd, C. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces. Renewable Energy; 50:710-720, 2013.
- Notton G et al. Predicting hourly solar irradiations on inclined surfaces based on the horizontal measurements: performances of the association of well-known mathematical models. Energy Conversion Management 47, 1816-1829, 2006.
- Evseev EG, Kudish AI. The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. Solar Energy; 83:377e88. 2009.
- Ineichen, P. Global Irradiance on tilted and oriented planes: model validations. Technical report. University of Geneva, february, 2011.
- Utrilla, M; Martinez-Lozado A... Performance Evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model. Solar Energy Vol.53, No2, 155-162, 1994.
- Gueymard, C. An Anisotropic Solar Irradiance Model for Tilted Surfaces and its Comparison with Selected Engineering Algorithms, Solar Energy, Vol. 38, No. 5, pp. 367-386. Erratum, Solar Energy, 1988, Vol. 40, No.2, pp. 175, 1987.
- Gueymard, C. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications Solar Energy, Vol.83, No. 5, pp. 432-444. Erratum, Solar Energy, 1988, Vol. 40, No.2, pp.175, 2009.
- David, M.; Laurent, P., Boland, J. Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location. Renewable Energy vol. 79, n. 51, p. 124-131, 2013.
- Aguiar, R. J., Collares-Pereira, M., Conde, J. P., A Simple Procedure for the Generation of Sequences of Daily Radiation Values Using Markov Transition Matrices. Solar Energy, v. 40, pp. 269-279, 1988.
- Guimarães, Ana Paula Cardoso, Estudo Solarimétrico, com base na definição de Mês padrão e Sequência de radiação diária, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, Dezembro 1995.
- Macagnan, M. H. Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1989.
- Krenzinger, A; Bugs, R. Radiasol2 Software para Sintetizar Dados de Radiação Solar, IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IVISES CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII SPES), Cuzco, 1-5, 11.2010.
- Mellit A.; Benganem M.; Hadj A. A.; Guessoum A. A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach. Solar Energy vol. 79, n. 5, p. 469-482, 2005.
- Krenzinger, A. Modelos Matemáticos para La Simulación de Sistemas Fotovoltaicos por Ordenador. In: Energías para America Latina, 1994. Energías para America Latina, v. 1. p. 27-35, 1994.
- Tiba, C.; Reis, R; Abreu, J. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. CEMIG Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte /MG, 2012.
- Stone, R. Improved Statistical Procedure for the Evaluation of Solar Radiation Estimation Models. Solar Energy, v. 51, no 4, pp. 289-291, 1993.
- Falayi, E.; Rabiou, A.; Teliat, R. Correlation to Estimate Monthly Mean of Daily Diffuse Solar Radiation in Some Selected Cities in Nigeria. Advances in Applied Science Research, v.2, no 4, pp. 480-490, 2011.
- Ineichen, P. Global Irradiance on tilted and oriented planes: model validations. technical report. University of Geneva, february, 2011.
- Gueymard, C. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications Solar Energy, Vol. 83, No. 5, pp. 432-444. Erratum, Solar Energy, 1988, Vol. 40, No.2, p. 175, 2009

SUNOUFGM: DEVELOPMENT AND VALIDATION OF COMPUTATIONAL TOOL TO ESTIMATE SOLAR RADIATION INCIDENT APPLIED TO DESIGN OF SOLAR POWER PLANTS

Abstract. In this initial work to estimate incident solar radiation based in classical mathematical models series and synthetic guidelines are presented. Initially, a literature review on solar radiation and its direct and diffuse components was performed and analyzed and evaluated some of the main models used to estimate the solar resource. After this step, began the implementation of software called SunoUFGM, MATLAB® R2013a, whose main purpose is to estimate solar radiation for any Brazilian location using the main mathematical models cited in the literature and validate them and compare them with field collected via solarimetric data stations in order to contribute to the project development of solar power plants. In this first version, the classic Liu & Jordan (Isotropic) and Perez (anisotropic). Mathematical models have been implemented, tested and compared with data from a Solarimetric station. The stochastic model based on the method of Markov transition matrices (MTM) has also been implemented, tested and validate.

Key words: Mathematical models to estimate solar radiation, Markov Transition Matrices, Data Validation.